การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง

นางสาว สาวิตรี แสงแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0426-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC NOZZLES

Miss Sawitree Saengkaew

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic year 2000
ISBN 974-13-0426-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง
โดย	นางสาว สาวิตรี แสงแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจนัจที)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4170579821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD : ULTRASONIC NOZZLES/ ATOMIZATION/ SPRAY
SAWITREE SAENGKAEW : DESIGN AND STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC NOZZLE, THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. HATHAICHANOK DURIYABUNLENG, Ph.D., 452 pp. ISBN 974-13-0426-9

The objective of this research is to design and to study the characteristics of the ultrasonic nozzles, in which are used to generate the uniform droplets. The ultrasonic nozzles of which were made of two types of different transducers i.e. the piezoelectric and resonator transducers were investigated the parameters affecting on the characteristics of the nozzles. Those parameters are the frequency and intensity of ultrasonic wave, the liquid flow rate and properties and the operating air pressure. Furthermore, the dust suppression efficiency in the rock crushing plant obtaining from the nozzles was compared with those obtained from the conventional nozzles.

In the first part of the study, it is found that water droplet sizes produced from the piezoelectric transducer ultrasonic nozzles operating with the frequency ranges of 34 – 56 kHz are in the range of 42 – 59 microns. The higher operating frequency, the smaller droplet sizes. Meanwhile the droplet sized is increased in the range of ±15 microns by lowering the intensity of ultrasonic wave from 2 – 8 watts or increasing the liquid flow rate from 22 – 250 mm^3/s. Further study in effects of the liquid properties, it is revealed that the liquid with low surface tension gives rise to smaller droplets. The high viscosity liquid is found unable to be atomized. Spray pattern from this nozzle was cylindrical with its diameter of 1 cm.

For another type of the nozzle, i.e. the resonator, it is seen that the water droplet sizes are between 25 and 39 microns. Likewise, the droplet size is increased either in the range of ±10 microns by reducing the operating air pressure from 2 – 3 kg/cm^2 or in the range of ±12 microns by increasing the liquid flow rate from 833 – 7,600 mm^3/s. It is also clear that the liquid properties have no significant effect on the droplet sizes. Importantly, this nozzle can be used to atomize the high viscosity liquid. The conical-cone spray pattern is obtained from this nozzle with a cone angle of 35 degree and a diameter of 20 cm.

The smaller droplet sizes and the narrower size distributions are obviously obtained from both types of the nozzles compared to those obtained from the other conventional nozzles. Taken the dust suppression efficiency of these two nozzles into considerations, it is found that the efficiency beyond 90% is obtained from the resonator nozzle with the liquid flow rate as low as 8,500 mm^3/s. In addition, it is interesting to note that the use of the ultrasonic nozzle would reduce the problem of the nozzle clogging and the humid of the water-sprayed processing rock. In an economic aspect, it is shown that for the single ultrasonic nozzle, the capital and installation cost is 1.5 times and the operating cost 0.4 times of the nozzles used in the present rock crushing plant.

Department.....Chemical Engineering..... **Student's signature**.....
Field of study.....Chemical Engineering..... **Advisor's signature**.....
Academic year.....2543.....

สาวิตรี แสงแก้ว : การออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง (DESIGN AND STUDY OF CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC NOZZLES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง, 452 หน้า. ISBN 974-13-0426-9

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดที่ใช้เทคนิคของคลื่นเหนือเสียงในการผลิตละอองน้ำที่มีขนาดสม่ำเสมอกัน ซึ่งหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่จะสร้างในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีด อันได้แก่ ความถี่และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง อัตราการไหลของของเหลว คุณสมบัติของของเหลว และความดันอากาศ รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นกับหัวฉีดชนิดอื่น เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

จากผลการศึกษาในส่วนที่หนึ่ง สำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ในช่วง 34 – 56 กิโลเฮิร์ซ พบว่า ขนาดของหยดละอองน้ำที่สามารถผลิตได้มีค่าในช่วง 42 – 59 ไมครอน โดยเมื่อหัวฉีดที่ใช้มีความถี่สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของหยดละอองที่ได้ลดลง และสามารถเพิ่มขนาดของหยดละอองน้ำโดยด้วยการลดความเข้มของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้ในช่วง ±15 ไมครอน เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 8 วัตต์ หรือโดยการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้ในช่วง ±13 ไมครอน เมื่ออัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าเท่ากับ 22 – 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของของเหลวที่ใช้ พบว่า คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้มีผลต่อขนาดของหยดละอองน้ำ โดยของเหลวที่มีแรงตึงผิวน้อยจะมีผลทำให้หยดละอองน้ำมีขนาดเล็กลง และของเหลวที่มีความหนืดสูงจะไม่สามารถฉีดพ่นได้ รูปแบบของสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้เป็นแบบทรงกระบอกเต็ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง คือ เท่ากับ 1 เซนติเมตร

จากผลการศึกษาในส่วนที่สอง สำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง พบว่า ขนาดของหยดละอองน้ำที่หัวฉีดสามารถผลิตได้มีค่าในช่วง 25 – 39 ไมครอน โดยสามารถเพิ่มขนาดของหยดละอองน้ำได้โดยการลดความดันอากาศ ซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้ในช่วง ±10 ไมครอน เมื่อความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือโดยทำการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองในช่วง ±12 ไมครอน เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าอยู่ระหว่าง 833 – 7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ พบว่า คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ไม่มีผลมากต่อขนาดของหยดละอองที่ได้ และหัวฉีดชนิดนี้สามารถฉีดพ่นของเหลวที่มีความหนืดสูงได้ รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้เป็นแบบกรวยเต็ม มีองศาในการฉีดพ่นประมาณ 35 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ประมาณ 20 เซนติเมตร

หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงทั้งสองชนิด สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็ก และมีการกระจายขนาดของหยดละอองที่แคบกว่าหัวฉีดอื่นที่ใช้กันทั่วไปมาก จากผลการทดลองวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นในระบบปิด ด้วยการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูงเกินกว่า 90% โดยอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าต่ำเพียง 8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที การใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงจะช่วยลดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด และปัญหาของความชื้นของหินที่ผ่านกระบวนการกำจัดฝุ่นด้วยการสเปรย์น้ำ เมื่อเปรียบเทียบการประเมินราคาการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่อหัวฉีด 1 หัว พบว่า การใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีค่าต้นทุนในการสร้างและติดตั้งคิดเป็น 1.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน และมีค่าใช้จ่ายต่อเดือนคิดเป็น 0.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน

ภาควิชา.....วิศวกรรมศาสตร์..... **ลายมือชื่อนิสิต**.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมศาสตร์..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**.....

ปีการศึกษา.....2543.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะความเข้าใจต่างๆมากมายตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ทองทด วานิชศรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

เนื่องจากทุนการวิจัยนี้บางส่วนได้รับมาจาก โครงการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อแก้ไขปัญหามลพิษจากฝุ่นในพื้นที่การทำเหมือง และโรงโม่หินยริเวณตำบลหน้าพระลาน และบริเวณใกล้เคียง จังหวัดสระบุรี โดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ เป็นหัวหน้าโครงการ และทุนผู้ช่วยวิจัย โครงการเมธีอาวุโส ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล – สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค และ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือวัดแรงตึงผิวและความหนืดของของเหลว ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง High Volume Sampler และเครื่องสอบเทียบอัตราการไหลของเครื่อง High Volume Sampler ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ให้ยืมใช้เครื่อง Smoke Opacity Meter รวมถึง คุณวัชรินทร์ แก้วมณีวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างมากในการทำการทดลองที่โรงโม่หิน

ขอขอบพระคุณ โรงงานศิลาเลิศจิต ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ พี่ต้อน พี่บี พี่ป้อมชาย พี่ป้อมหญิง และสมาชิกทุกๆคนในห้องวิจัยเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในยามมีปัญหา คอยให้กำลังใจ และเอาใจใส่ เสมอมาในระหว่างที่ทำการศึกษาวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้ให้ความรัก ดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญรูป..... ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ต

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 มูลเหตุจูงใจ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์..... 4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมลภาวะทางอากาศอันเนื่องจากฝุ่น..... 9
3.1 คำศัพท์และความหมาย..... 9
3.2 ผลกระทบของฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน..... 11
3.3 โรงโม่หินและกระบวนการผลิต..... 15
3.4 แหล่งกำเนิดฝุ่นและระบบกำจัดฝุ่นในโรงโม่หิน..... 22

บทที่ 4 ระบบกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ..... 34
4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ..... 35
4.2 ชนิดของหัวฉีดละออง..... 38
4.2.1 หัวฉีดแบบใช้ความดัน..... 38
4.2.2 หัวฉีดแบบจานหมุน..... 42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 Air-Assist Atomizer 44
4.2.4 หัวฉีดแบบพ่นลม 45
4.2.5 หัวฉีดแบบใช้พลังงานไฟฟ้า 45
4.2.6 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 46
4.3 วิธีการวัดหยดละออง 48
4.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดขนาดของหยดละออง 49
4.3.2 วิธีการวัดทางกล (Mechanical Method) 50
4.3.3 วิธีการวัดทางทัศนศาสตร์ (Optical Method) 53

บทที่ 5 การออกแบบหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 54
5.1 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 55
5.1.1 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานกล 55
5.1.2 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานไฟฟ้า 55
5.2 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 55
5.2.1 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 55
5.2.1.1 กระบวนการฉีดพ่นของของเหลว 55
5.2.1.2 การออกแบบหัวฉีด 56
5.2.2 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 60
5.2.2.1 กระบวนการฉีดพ่นของของเหลว 65
5.2.2.1 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการฉีดพ่น ขนาดของหยดละออง และลักษณะของการสเปรย์ 66
5.2.2.3 การออกแบบหัวฉีด 69
5.2.2.4 คุณสมบัติของโลหะที่ใช้สร้างหัวฉีด 70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย..... 75

6.1 วิธีการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีด..... 75

6.1.1 อุปกรณ์..... 76

6.1.2 สารเคมี..... 77

6.1.3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง..... 77

6.1.3.1 สภาวะในการทดลอง..... 77

6.1.3.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 79

6.1.4 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง..... 81

6.1.4.1 สภาวะในการทดลอง..... 81

6.1.4.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 83

6.2 การทดลองวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด..... 84

6.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของฝุ่น..... 84

6.2.2 สภาพพื้นที่ที่ทำการตรวจวัด..... 86

6.2.3 ขั้นตอนการตรวจวัดหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด..... 90

6.2.4 การสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ..... 91

6.2.4.1 อุปกรณ์..... 91

6.2.4.2 สภาวะในการทดลอง..... 92

6.2.4.3 ขั้นตอนในการทดลอง..... 93

บทที่ 7 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 95

7.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง..... 96

7.1.1 อิทธิพลของความถี่ต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ..... 97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.1.2 อิทธิพลของความเข้มเสียงต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ..... 100
7.1.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ..... 102
7.1.4 รูปแบบของการสเปรย์..... 107
7.1.5 อิทธิพลของขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำและรูปแบบของการสเปรย์..... 109
7.1.6 อิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ..... 112
7.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง..... 115
7.2.1 ผลของรูปร่างของหัวฉีด..... 115
7.2.2 อิทธิพลของความดันอากาศที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ..... 120
7.2.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ..... 122
7.2.4 อิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ..... 125
7.2.5 รูปแบบของการสเปรย์..... 127
7.3 ผลการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด..... 129
7.3.1 คุณสมบัติของฝุ่นที่ทำการตรวจวัด..... 129
7.3.2 คุณลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น..... 130
7.3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด..... 132
7.4 การประเมินราคาต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน..... 137

บทที่ 8 สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ..... 140

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..... 147
ภาคผนวก..... 149
ภาคผนวก ก. ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำเมื่อจำนวนหยดที่นับ
มีค่าแตกต่างกัน..... 150
ภาคผนวก ข. ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของของเหลว..... 168
ภาคผนวก ค. ผลการวัดความถี่ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิด
คลื่นเหนือเสียง..... 172
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองด้านคุณสมบัติของฝุ่น..... 180
ภาคผนวก จ. ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของฝุ่นและหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์ในรูป
ของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง..... 182
ภาคผนวก ฉ. ผลการสอบเทียบอุปกรณ์ต่างๆ..... 186
ภาคผนวก ช. ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่สภาวะต่างๆ..... 194
ประวัติผู้เขียน..... 452

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี พ.ศ. 2539 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540).....	16
3.2	คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี เดือน ม.ค. – ก.พ. พ.ศ.2540 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)	17
3.3	จุดกำเนิดฝุ่นสำคัญและลักษณะการเกิดฝุ่นในกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน.....	27
3.4	แหล่งปล่อยฝุ่นและการควบคุมฝุ่นของโรงโม่หิน.....	33
4.1	แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมการจับฝุ่นด้วยการฉีดหยดละอองน้ำ (η_{total}) เมื่อใช้หัวฉีดประเภทที่ 1-1, 1-2 และ 1-3 การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-1, ก-2 และ ก-3 [6]	36
4.2	ตารางสรุปลักษณะของหัวฉีด.....	47
4.3	อิทธิพลของจำนวนตัวอย่างต่อความแม่นยำของการวัดขนาดของหยด.....	49
5.1	แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกันที่ใช้ในการทดลอง.....	59
5.2	แสดงความถี่และความยาวในแต่ละส่วนของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง.....	73
6.1	แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่จะทำการศึกษา.....	77
6.2	ตารางแสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	78
6.3	แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่จะทำการศึกษา.....	81
6.4	แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน.....	82
6.5	ตารางแสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	82
7.1	แสดงอิทธิพลของความถี่ที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9].....	99
7.2	แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Berger [17].....	105
7.3	แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

7.4 แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง..... 107

7.4 แสดงอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อขนาดของหยดละออง..... 112

7.5 แสดงอิทธิพลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9]..... 113

7.6 แสดงอิทธิพลของความหนืดของของเหลวที่มีผลต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9]..... 114

7.7 แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน..... 118

7.8 แสดงอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่ผลต่อขนาดของหยดละออง..... 125

7.9 แสดงผลการวัดองศาของการฉีดพ่นและรัศมีที่หัวฉีดสามารถครอบคลุมได้..... 127

7.10 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของฝุ่น..... 129

7.11 แสดงคุณลักษณะของหัวฉีดแต่ละชนิด..... 130

7.12 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด (ทำการวัดในวันที่ 21 พ.ย.2543)..... 132

7.13 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด (ทำการวัดในวันที่ 22 พ.ย. 2543)..... 133

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	3
1.2	ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	3
2.1	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภท Ultrasonic Vibrating Element	5
2.2	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภทโซนิคคอร์อะตอมไมซิ่ง (Sonicore Atomizing Nozzle)	6
2.3	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ J.Michael Soth [7]	6
2.4	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ Daniel Sindayihebura et al. [8]	7
2.5	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ Lacas et al. [9]	8
3.1	แสดงผังการโม่หินของโรงโม่หินทั่วไป	20
3.2	จุดกำเนิด และลักษณะการเกิดฝุ่นภายในโรงโม่หิน	26
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ (η_{total}) กับขนาดของอนุภาคฝุ่น(D_p) และหยดละอองน้ำ (D_w) [6]	35
4.2	แสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดประเภทที่ 1-1, 1-2 และ 1-3 ซึ่งขนาดเฉลี่ยของหยดละอองเท่ากับ 193.14 ไมครอน [6]	36
4.3	แสดงลักษณะและรูปแบบของการสเปรย์ของหัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยแบบกลวงข้างใน (Hollow Cone Spray) และหัวฉีดหัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยเต็ม (Solid Cone Spray)	39
4.4	แสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น	39
4.5	แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบใบพัด (Fan Spray Nozzles)	40
4.6	ลักษณะของหัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลชนิดที่เป็น Duplex	41
4.7	ลักษณะของหัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลชนิดที่เป็น Dual orifice	41
4.8	แสดงกลไกการเกิดการฉีดพ่นที่เกิดจากหัวฉีดแบบจานหมุน	42
4.9	แสดงการเกิดการเลื่อนไถลของของเหลว	43
4.10	แสดงลักษณะของจานหมุนชนิดต่างๆ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	หัวฉีดชนิดผสมภายใน (Internal-Mixing)	44
4.12	หัวฉีดชนิดผสมภายนอก (External-Mixing)	44
4.13	แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบพ่นลม(Airblast Atomizer)	45
4.14	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	46
4.15	แสดงหลักการการวิเคราะห์ขนาดด้วยเทคนิค Laser Diffraction	53
5.1	แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	56
5.2	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	57
5.3	ไดอาแกรมแสดงส่วนประกอบภายในของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	57
5.4	ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	58
5.5	แสดงตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง	61
5.6	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	62
5.7	แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์	64
5.8	แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์	64
5.9	แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์	64
5.10	แสดงลักษณะของคลื่นเล็กๆ (Capillary wave) ที่มีรูปร่างคล้ายโครงร่างตาข่าย	65
5.11	แสดงกลไกการหลุดออกของหยดละอองออกจากยอดของคลื่นเล็กๆ (Capillary wave) ที่ไม่เสถียร	65
5.12	แสดงลักษณะของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองในแบบต่างๆ	68
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)	70
5.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแต่ละชนิด	71
5.15	ไดอาแกรมแสดงลักษณะของหัวคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทดลอง	72
5.16	แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทดลอง	73
5.17	แสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.1	ภาพถ่ายแสดงชุดอุปกรณ์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	80
6.2	ไดอาแกรมแสดงชุดอุปกรณ์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	80
6.3	ภาพถ่ายของเครื่อง High Volume Sampler	84
6.4	ภาพถ่ายของเครื่อง Smoke Opacity Meter	85
6.5	ภาพถ่ายแสดงสภาพพื้นที่ของโรงโม่ 1 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกจากตะแกรงคัดหินขั้นสุดท้าย เพื่อลำเลียงหินไปยังกองหินเบอร์	87
6.6	ภาพถ่ายแสดงสภาพพื้นที่แหล่งกำเนิดที่โรงโม่ 4 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอย	88
6.7	แสดงระบบปิดที่ทำการตรวจวัดฝุ่น	88
6.8	แสดงตำแหน่งของหัวฉีด และ Opacity meter ที่ทำการติดตั้งไว้ในระบบที่จะทำการตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด	89
6.9	แสดงลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่	90
6.10	แสดงชุดอุปกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น	92
7.1	ภาพถ่ายแสดงลำดับกระบวนการฉีดพ่นของของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	96
7.2	กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของหัวฉีดกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข.)	97
7.3	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกัน (โดยกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 2 วัตต์)	98
7.4	กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเสียงกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข.)	100
7.5	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่ 34.53 กิโลเฮิร์ซ เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าต่างกัน	101
7.6	กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข)	102
7.7	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าต่างกัน	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.8	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของการสเปรย์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มสูงขึ้น.....	104
7.9	กราฟแสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9].....	105
7.10	แสดงกระบวนการฉีดพ่นที่เกิดการหลุดออกจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียรและจากการเกิดคาวิเทชั่น.....	106
7.11	ภาพถ่ายแสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	108
7.12	กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์ของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองกับ ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข.).....	109
7.13	แสดงการแผ่ขยายของฟิล์มของของเหลวเมื่อพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดใหญ่ขึ้น.....	110
7.14	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 47.17 กิโลเฮิร์ซ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีค่าแตกต่างกัน.....	111
7.15	ภาพถ่ายแสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง.....	116
7.16	กราฟแสดงผลการทดลองวัดการกระจายขนาดที่ได้จากหัวฉีดที่มีเรโซเนเตอร์และไม่มีเรโซเนเตอร์ติดอยู่ที่ปลายของหัวฉีด.....	116
7.17	ภาพถ่ายแสดงลักษณะการสเปรย์ของหัวฉีดที่ไม่มีเรโซเนเตอร์และมีเรโซเนเตอร์.....	117
7.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ.....	120
7.19	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 5 เมื่อความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าแตกต่างกัน.....	121
7.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ..	122
7.21	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 2 เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าแตกต่างกัน.....	123
7.22	ภาพถ่ายแสดงแสดงลักษณะการสเปรย์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น.....	124
7.23	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1 เมื่อของเหลวที่ใช้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน.	126

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
7.24	ภาพถ่ายแสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	128
7.26	กราฟแสดงการกระจายขนาดของหัวฉีดแต่ละชนิด	130

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

a	คือ	ระยะห่างระหว่างส่วนปลายของหัวฉีดกับส่วนหน้าของเรโซเนเตอร์	(มิลลิเมตร)
A_c	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค	(เมตร)
A_i	คือ	พื้นที่หน้าตัดของส่วนประกอบของหัวฉีด	(เมตร)
b	คือ	ความลึกของเรโซเนเตอร์	(มิลลิเมตร)
C	คือ	ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง	(เมตรต่อวินาที)
C_c	คือ	ความเร็วเสียงในเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค	(เมตร/วินาที)
C_i	คือ	ความเร็วเสียงในโลหะที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหัวฉีด	(เมตร/วินาที)
C_i	คือ	ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบในขณะที่ไม่ได้สเปรย์น้ำ	(มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
C_o	คือ	ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบในขณะที่สเปรย์น้ำ	(มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
D_p	คือ	ขนาดของอนุภาคฝุ่น	(ไมครอน)
D_w	คือ	ขนาดของหยดละอองน้ำ	(ไมครอน)
D_{10}	คือ	ค่าขนาดเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean drop size)	(ไมครอน)
D_{20}	คือ	ค่าขนาดเฉลี่ยโดยพื้นที่หน้าตัด (area mean drop size)	(ไมครอน)
D_{30}	คือ	ค่าขนาดเฉลี่ยโดยปริมาตร (volume mean drop size)	(ไมครอน)
D_{32}	คือ	ค่าขนาดเฉลี่ยแบบ Sauter (Sauter mean diameter)	(ไมครอน)
$D_{N,0.5}$	คือ	number mean diameter	(ไมครอน)
D_1	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเรโซเนเตอร์	(มิลลิเมตร)
D_2	คือ	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ริฟิช	(มิลลิเมตร)
λ	คือ	ความยาวคลื่น	(เมตร)
λ_c	คือ	ความยาวคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียรบนผิวหน้าของฟิล์มของของเหลว	(เมตร)
f	คือ	ความถี่ของเสียง	(เฮิร์ซ)
ρ_c	คือ	ความหนาแน่นของเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค	(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร))
ρ_i	คือ	ความหนาแน่นของโลหะที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหัวฉีด	(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว	(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
σ	คือ	แรงตึงผิวของของเหลว	(มิลลินิวตัน/เมตร)
$\boldsymbol{\sigma}$	คือ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	(-)
υ	คือ	ความหนืดของของเหลว	(ตารางมิลลิเมตร/วินาที)
η	คือ	ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ	(-)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มูลเหตุจูงใจ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก มีการเร่งรัดเพื่อจะพัฒนาโครงการสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐาน โดยเฉพาะถนนและเส้นทางคมนาคมต่างๆเพื่อเพิ่มประโยชน์ทั้งในด้านการขนส่งและการเดินทางของประชาชนให้เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมการก่อสร้างในอัตราที่สูง ทำให้ความต้องการการใช้หินเพื่อการก่อสร้างในประเทศมีมากขึ้น การขยายตัวของกิจการระเบิดและย่อยหินจึงเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลที่ตามมา คือ ปัญหามลภาวะทางอากาศ โดยฝุ่นที่เกิดจากกิจกรรมเหล่านี้เกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ตั้งแต่การระเบิดหิน การขนถ่ายหินก้อนใหญ่จากหน้าเหมืองเข้าไปสู่กระบวนการโม่หิน กระบวนการบดย่อยหิน จนกระทั่งการขนถ่ายหินที่ย่อยแล้วออกไปกองหรือนำไปจำหน่าย ฝุ่นที่เกิดขึ้นจะฟุ้งกระจายในอากาศซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะผู้ที่ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมนี้และประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนใกล้เคียง ก่อให้เกิดโรคต่างๆที่เกี่ยวข้องกับฝุ่น เช่น โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ โรคเกี่ยวกับตา และโรคเกี่ยวกับผิวหนัง รวมไปถึงโรคภูมิแพ้ต่างๆ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความหงุดหงิดรำคาญใจ มีผลทำให้สุขภาพจิตเสื่อมลง ซึ่งอาจมีผลต่อไปถึงสุขภาพด้านร่างกายได้อีกด้วย [1]

วิธีแก้ไขปัญหามลภาวะฝุ่นที่ดีที่สุด คือ การป้องกันหรือการลดปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน เนื่องจากอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดใหญ่หลายสิบไมครอนจะสามารถตกลงสู่พื้นได้เองในระยะเวลาอันสั้น แต่อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2-3 ไมครอน โอกาสที่จะตกสู่พื้นได้เองนั้นเป็นไปได้ยาก การติดตั้งหัวฉีดสเปรย์ที่จุดต่างๆของกระบวนการผลิตสามารถลดอัตราการฟุ้งกระจายของฝุ่นได้ [2] เนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดอนุภาคจะเพิ่มแรงเกาะติดระหว่างอนุภาค การฉีดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กจำนวนมากจะทำให้อนุภาคฝุ่นมีโอกาสที่จะชนและถูกจับโดยหยดน้ำเพิ่มมากขึ้น หยดน้ำที่จับอนุภาคฝุ่นไว้จะสามารถตกลงสู่พื้นได้โดยไม่ฟุ้งกระจายไปไกลจากแหล่งกำเนิด

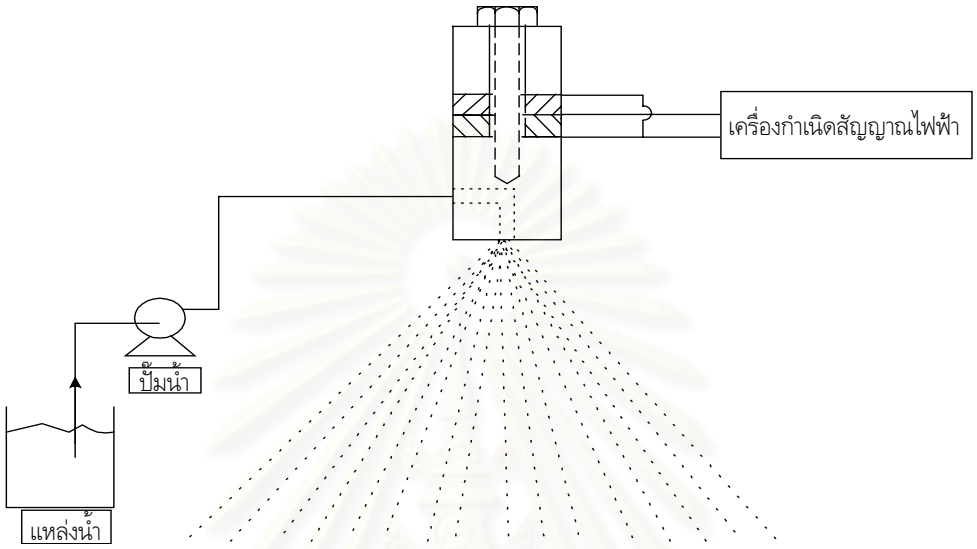
ข้อดีของการใช้ระบบบำบัดฝุ่นแบบฉีดละอองน้ำ คือ เป็นระบบที่ง่าย ลงทุนน้อย ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำ และสามารถติดตั้งบำรุงรักษาได้เองโดยไม่ยุ่งยาก สำหรับประสิทธิภาพในการจับฝุ่นด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของหัวฉีด ความเข้มข้นของฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย ขนาดของฝุ่น ลักษณะขนาดและทิศทางของลมที่พัดผ่าน เป็นต้น โดยตัวแปรสำคัญที่สามารถควบคุมเพื่อกำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้ คือ *ชนิดของหัวฉีด* เนื่องจากเป็นตัวแปรที่จะกำหนดขนาดของหยดละออง และการ

กระจายขนาดของหยดละออง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น นอกจากนั้นแล้ว การเลือกชนิดของหัวฉีดที่มีอัตราการของน้ำต่ำก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง การใช้ปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดผลเสียข้างเคียงหลายประการ อาทิเช่น คุณภาพและสีของหิน เกิดปัญหาทางเชิงกลเกี่ยวกับลูกปืนและจารบี นอกจากนี้การมีหินเปียกน้ำที่มีความคมกลิ้งอยู่เหนือสายพานจะทำให้สายพานเป็นรอยและอาจขาดได้ในเวลาอันสั้น เกิดโคลนติดตามเครื่องมือและพื้นของโรงงาน รวมทั้งยังก่อความรำคาญให้แก่ผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย นอกจากนั้นส่วนใหญ่อุตสาหกรรมโรงโม่หินมักจะอยู่ในแหล่งพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากมีการใช้หัวฉีดเพื่อการกำจัดฝุ่น โดยต้องมีการใช้ปริมาณน้ำเป็นจำนวนมาก จะก่อให้เกิดปัญหาของแหล่งน้ำตามมาด้วย สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น จำเป็นต้องออกแบบหัวฉีดให้ขนาดของหยดละอองน้ำในระบบสเปรย์อยู่ในช่วงขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่ต้องการกำจัด เพื่อให้สามารถจับฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากถ้าขนาดของหยดละอองน้ำใหญ่เกินไป ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลอ้อมรอบละอองน้ำไปได้โดยไม่มีการสัมผัสซึ่งกันและกัน แต่ถ้าขนาดของหยดละอองน้ำเล็กเกินไป การไหลของฝุ่นจะผลักไล่ละอองน้ำโดยไม่ได้ทำให้ฝุ่นเปียกแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังต้องออกแบบหัวฉีดให้สามารถผลิตการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำอยู่ในช่วงแคบอีกด้วย เนื่องจากการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่กว้างจะมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น

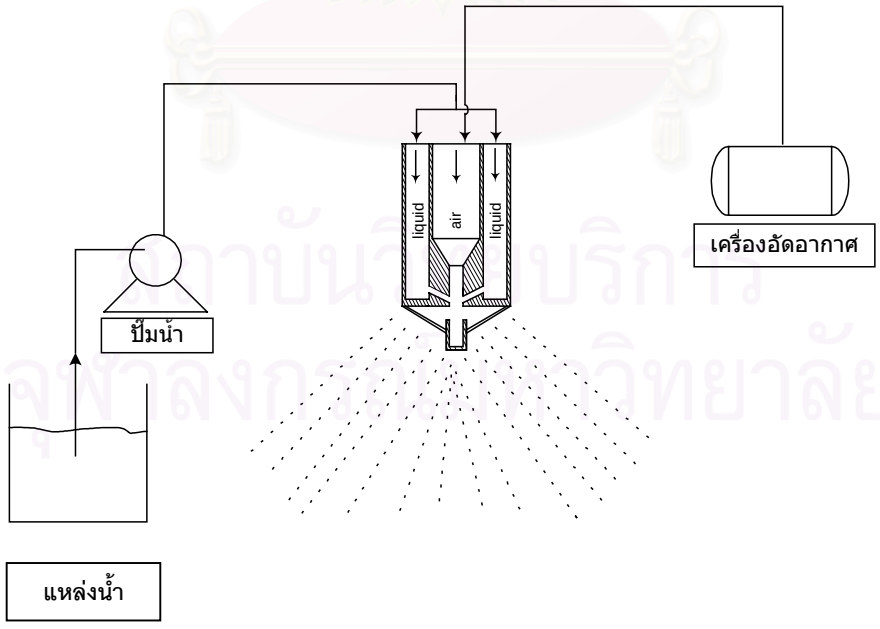
ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาหัวฉีดที่ใช้เทคนิคของคลื่นเหนือเสียงในการผลิตละอองน้ำที่มีขนาดสม่ำเสมอกันและสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานต่างๆ โดยมีอัตราการไหลของน้ำต่ำ หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่จะสร้างและศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (piezoelectric ceramic) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงดังรูปที่ 1.1 กับชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงดังรูปที่ 1.2 โดยหัวฉีดชนิดแรกจะใช้ไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียง ส่วนหัวฉีดชนิดหลังนั้นใช้เครื่องอัดอากาศ (air compressor) อัดอากาศผ่านหัวฉีดที่มีลักษณะเป็นเรโซเนเตอร์ (resonator) ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียงขึ้น และจะทำการศึกษาคุณลักษณะเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของหัวฉีดทั้งสองชนิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป ในระยะที่ผ่านมาได้มีผู้นำเอาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ [7,8,10,11] เช่น กระบวนการผลิตยา กระบวนการเคลือบผิว กระบวนการจุดระเบิดของเตาเผา เป็นต้น พบว่าหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงสามารถผลิตหยดละอองของของเหลวที่มีขนาดใกล้เคียงกันและช่วยลดปริมาณของของเหลวที่ใช้ได้อีกด้วย ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น

หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ใช้หลักการการสั่นสะเทือนของคลื่นความถี่เหนือเสียง เพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ปลายทางออกของหัวฉีด นำไปสู่การฉีดพ่นของของเหลวในที่สุด ซึ่งแตกต่างไปจากหัวฉีดธรรมดาทั่วไปที่ต้องอาศัยแรงดันน้ำสูงหรือความเร็วของก๊าซสูงเพื่อทำให้เกิดการฉีดพ่นของเหลวขึ้น ข้อดีของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่คาดว่าจะได้รับ คือ สามารถผลิตหยดละอองน้ำได้ขนาดเล็กตามต้องการ มีการ

กระจายขนาดของหยดละอองน้ำในช่วงแคบ และไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด รวมทั้งสามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ได้อย่างมากอีกด้วย ซึ่งเป็นผลดีกับพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำน้อย



รูปที่ 1.1 *ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*



รูปที่ 1.2 *ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบกับหัวฉีดชนิดอื่น เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง
2. ตรวจสอบขนาดของหยดละอองน้ำที่เกิดจากการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่สร้างขึ้น
3. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อขนาดของหยดละอองน้ำและรูปแบบของการสเปรย์
    - ความถี่และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง
    - อัตราการไหลของของเหลว
    - ความดันของก๊าซ
4. เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย รูปแบบของการสเปรย์ ขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่เกิดจากการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่สร้างขึ้นกับการใช้หัวฉีดชนิดต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำและรูปแบบของสเปรย์ที่ได้รับจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

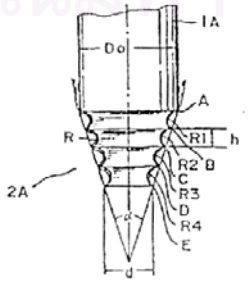
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

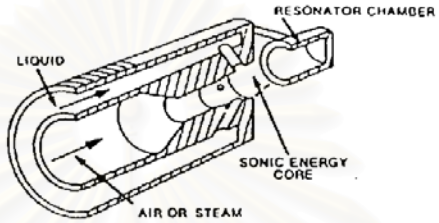
การนำเทคนิคของคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้ในการทำหัวฉีด ได้เริ่มขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 โดยได้นำหัวฉีดไปประยุกต์ใช้ในการจุดระเบิดในเตาเผาน้ำมันที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงสามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด รวมทั้งปริมาณของเหลวที่ใช้ในการฉีดพ่นก็น้อย จึงมีผู้สนใจที่จะนำเอาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กระบวนการผลิตยา ซึ่งต้องการส่งหรือฉีดพ่นวัตถุดิบในปริมาณที่แน่นอน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นตามต้องการ กระบวนการจุดระเบิดของเตาเผาและเครื่องยนต์ กระบวนการเคลือบผิว การนำไปใช้ในระบบกำจัดฝุ่น และการประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรม เป็นต้น ความสามารถในการพัฒนาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงขึ้นอยู่กับความเข้าใจในการนำไปใช้ โครงสร้างพื้นฐานของหัวฉีดและของเหลวที่นำมาใช้ ซึ่งในระยะที่ผ่านมีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องอยู่บ้าง ดังต่อไปนี้

Kokubo, Kakuro [7] ได้สร้างหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง เพื่อใช้เป็นวาล์วฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน (Vibration Element) ที่มีรูปทรงเป็นสันเว้าทั้งภายในและภายนอกของหัวฉีดต่อเนื่องกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดหลั่นกันไปตามลำดับ โดยแต่ละชั้นจะเชื่อมกันด้วยผิวโค้ง ติดตั้งอยู่ที่ส่วนปลายของหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนนี้ถูกทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในขณะเดียวกันของเหลวจะถูกส่งมายังปลายของหัวฉีดทางด้านนอก ก่อให้เกิดการฉีดพ่นของของเหลวจำนวนมากอย่างรวดเร็ว จากผลการทดลองพบว่าหัวฉีดชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบให้ส่วนปลายของหัวฉีดมีลักษณะเป็นสันเว้า ซึ่งจะช่วยทำให้ของเหลวที่ถูกส่งมายังปลายของหัวฉีดมีลักษณะเป็นฟิล์มของของเหลวบางๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณแต่ละสันขอบจะช่วยลดอัตราการไหลของของเหลวได้อีกด้วย



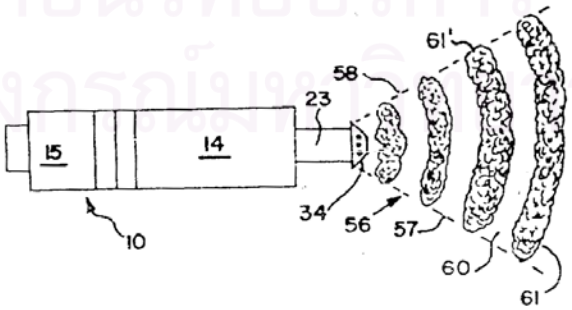
<u>รูปที่ 2.1</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภท Ultrasonic Vibrating Element*

Sonic Enviromental System Inc. [3] ได้ออกแบบและสร้าง Sonic Atomizing Nozzle เพื่อใช้กำจัดฝุ่นในโรงโม่หิน ซึ่งสามารถทำให้ของเหลวเป็นละอองได้ด้วยการให้น้ำไหลผ่านบริเวณคลื่นเสียงความถี่สูง อากาศจะถูกเร่งให้มีความเร็วเหนือความเร็วเสียงด้วยการไหลผ่าน Convergent/Divergent Orifice แล้วสะท้อนกลับพร้อมทั้งก่อให้เกิด Shock Wave ขึ้น ของเหลวที่ถูกส่งไปสัมผัสกับ Shock Wave ก็จะถูกทำให้เป็นละอองเล็กๆ อากาศที่ผ่านไปรอบ Resonator จะพาละอองเหล่านี้ออกมาในรูปของสเปรย์ที่ความเร็วต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



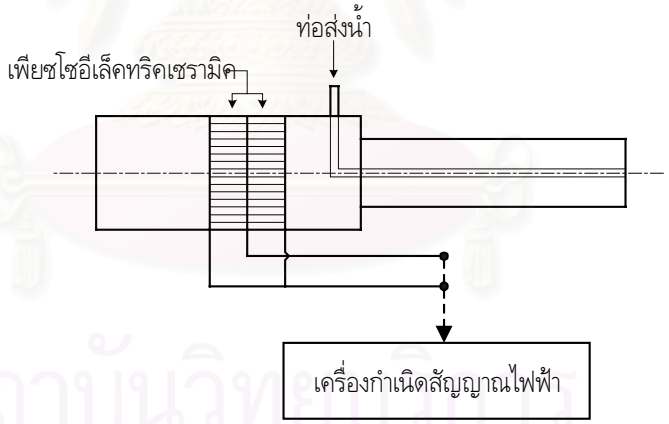
รูปที่ 2.2 *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภทโซนิคอร์อะตอมไมซิ่ง (Sonicore Atomizing Nozzle)*

J.Michael Soth [8] ได้สร้างหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่ประกอบด้วย Piezoelectric Transducer ซึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนตามความถี่ของคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic) ตามพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้า การสั่นสะเทือนนี้จะเพิ่มมากขึ้นและส่งผ่านไปยังพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง (Atomizing Surface) ซึ่งเป็นบริเวณที่ของเหลวจะถูกทำให้เป็นละออง โดยของเหลวจะถูกส่งผ่านมาตามท่อส่งของเหลวด้านใน เกิดเป็นฟิล์มของของเหลวที่พื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Resonance Frequency) ของหัวฉีด จะทำให้เกิดแอมปลิจูดของการสั่นสูงสุดที่พื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง ทำให้ฟิล์มของของเหลวที่เกิดขึ้นกลายเป็นละอองน้ำที่มีขนาดเล็กจำนวนมากอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การปรับความถี่ของพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของหัวฉีดและการมีช่องช่วยส่งของเหลว จะช่วยทำให้รูปแบบในการสเปรย์มีความสม่ำเสมอและชัดเจนมากขึ้น



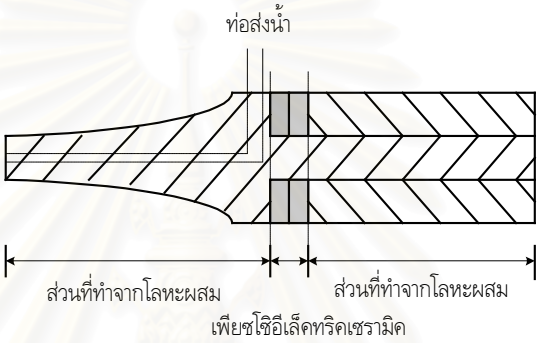
รูปที่ 2.3 *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ J.Michael Soth [8]*

Daniel Sindayihebura et al. [9] ได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบของการสเปรย์ที่เกิดขึ้นจากการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภทที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่มีลักษณะของหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทำการวัดความหนาของฟิล์มของของเหลวและศึกษาอิทธิพลของฟิล์มของของเหลว คุณสมบัติทางกายภาพของของเหลว และคุณสมบัติของหัวฉีด ที่มีผลต่อขนาดของหยดละอองน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งในการทดลองได้เลือกใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 4 หัว ที่มีความถี่ในการทำงานที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า 1) ความหนาของฟิล์มของของเหลวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองจะแปรผันจากตรงกลางถึงขอบของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง โดยจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มมากขึ้น 2) จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองน้ำที่เกิดจากการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงด้วยเครื่อง Malvern 2600 Particle Sizer พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดละอองน้ำจะมีขนาดลดลงเมื่อความถี่ในการทำงานของหัวฉีดเพิ่มมากขึ้น 3) การลดความตึงผิวของของเหลวที่ใช้มีผลต่อการลดขนาดของความยาวคลื่นที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นบนฟิล์มของของเหลว ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของขนาดของหยดละอองน้ำ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เสนอทฤษฎีในการทำนายการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของ Maximum Entropy Formalism (M.E.F) พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องกันกับค่าที่ได้จากการวัดเป็นอย่างมากภายใต้ขอบเขตของสภาวะการทำงาน



<u>รูปที่ 2.4</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ Daniel Sindayihebura et al. [9]*

Lacas et al. [10] ได้ทำการศึกษาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงประเภทที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจุดระเบิดในเตาเผา โดยหัวฉีดที่ใช้มีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 100 กิโลเฮิร์ซ ซึ่งมีลักษณะของหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่า หยดละอองที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้จะมีขนาดใกล้เคียงกัน และหยดละอองที่ได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อหัวฉีดที่ใช้มีความถี่สูงขึ้น และยังพบว่า ที่ความถี่ของหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 55 กิโลเฮิร์ซ และของเหลวที่ใช้เป็นเฮปเทน (Heptane) การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของของเหลวในช่วง 30 – 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที จะไม่มีผลต่อขนาดของหยดละอองที่ได้



<u>รูปที่ 2.5</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่ใช้ในการทดลองของ Lacas et al. [10]*

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้กันทั่วไปมี 2 รูปแบบใหญ่ คือ หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และพบว่าหัวฉีดทั้ง 2 ชนิดนี้ สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็ก มีการกระจายขนาดของหยดละอองที่แคบ และใช้น้ำในปริมาณที่น้อย ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานครั้งนี้ โดยตัวแปรที่มีผลต่อขนาดและการกระจายขนาดของหยดละออง ได้แก่ ความถี่และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง อัตราการไหลของของเหลว ความดันของอากาศ และคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ เป็นต้น เราจึงเลือกออกแบบหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 2 ชนิดนี้ และทำการศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงทั้งสอง เพื่อเปรียบเทียบ ข้อดี – ข้อเสีย ในการประยุกต์ใช้หัวฉีดประเภทนี้เพื่อกำจัดฝุ่นในโรงโม่หิน รวมทั้งเปรียบเทียบกับหัวฉีดอื่นๆที่มีการใช้งานในโรงโม่ในปัจจุบันด้วย

บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมลภาวะทางอากาศเนื่องจากฝุ่น

เนื่องจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่จะทำการการออกแบบและสร้างหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง 2 ชนิด คือ ชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิก (Piezoelectric Ceramic) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง กับชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และทำการศึกษาผลของความถี่และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง อัตราการไหลของของเหลวและความดันของอากาศที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีด เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน ในเบื้องต้นจะขอกล่าวถึงศัพท์บางคำที่เกี่ยวกับอนุภาคฝุ่นและมลภาวะอากาศที่มักพบบ่อยๆ เพื่อให้มีความหมายและความเข้าใจตรงกัน จากนั้นจึงกล่าวถึงขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน จุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นในกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน ตลอดจนอันตรายของฝุ่นต่อสุขภาพของคนงานที่ทำงานอยู่ในโรงโม่หิน ชุมชนที่อยู่รอบๆโรงโม่หิน และอันตรายของฝุ่นต่อสภาพแวดล้อม นอกจากนี้จะกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง และวิธีการควบคุมฝุ่นละออง ตลอดจนข้อดีและข้อเสียของการกำจัดฝุ่นโดยใช้วิธีการฉีดหยดละอองน้ำเปรียบเทียบกับการกำจัดฝุ่นด้วยวิธีการอื่นๆ

สำหรับในช่วงท้ายของบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหัวฉีดละอองน้ำชนิดต่างๆ และวิธีการวัดขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีด ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยที่มีผลต่อการวัดขนาดของหยดละออง วิธีการวัดขนาดของหยดละอองน้ำด้วยวิธีเชิงกลที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับงานวิจัยนี้ และวิธีการวัดขนาดของหยดละอองน้ำด้วยวิธีทางทัศนศาสตร์ (Optical method) ซึ่งเป็นวิธีวัดที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

3.1 คำศัพท์และความหมาย

มีศัพท์หลายคำเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่น และมลพิษทางอากาศที่จะต้องถูกอธิบายให้มีความหมายและความเข้าใจตรงกัน ซึ่งคำศัพท์เหล่านี้ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีความหมายใกล้เคียงกัน Hesketh [12] ได้ให้ความหมายของศัพท์เหล่านี้ไว้ดังนี้

- **วัสดุอนุภาค** (Particulate Matter) คือ วัตถุหรือสสารที่เป็นของเหลวหรือของแข็งใดๆ ที่อยู่ในอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.0002 – 500 ไมครอน
- **แอโรซอล** (Aerosol) คือ อนุภาคของแข็ง หรือของเหลวขนาดเล็กซึ่งแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ โดยทั่วไปได้แก่อนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 50 ไมครอน เล็กลงไปจนไม่ถึง 1 ไมครอน ซึ่งสิ่งที่ถูกจัดรวมเป็นละอองไอได้แก่ ฝุ่น หมอก ฟูม ควัน ละอองน้ำ และเมฆหมอก

- **ฝุ่น** (Dust) คือ อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการแตกตัว การถูกบดอัด หรือการสลายตัวที่เกิดจากกระบวนการทางกล โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึงหลายร้อยไมครอน อนุภาคฝุ่นโดยทั่วไปมีรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอน
- **มลภาวะอากาศ** (Air Pollution) คือ การดำรงอยู่ของสสารหรือวัตถุผิดปกติ (Abnormal) ในอากาศหรือบรรยากาศที่เป็นผลให้เกิดอันตรายหรือผลร้ายต่อสุขภาพหรือสวัสดิภาพของสิ่งมีชีวิต

องค์การป้องกันสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (U.S. Environment Protection Agency) ได้ให้ความหมายของศัพท์ที่อธิบายถึงขนาดของอนุภาคต่างๆ ที่นิยมเขียนเป็นสัญลักษณ์ในภาษาอังกฤษ ดังนี้

- **TSP** (จำนวนอนุภาคทั้งหมดที่แขวนลอยในบรรยากาศ, Total Suspended Particulate) คือ จำนวน (ปริมาณ) ของอนุภาคที่สามารถถูกเก็บตัวอย่าง และตรวจวัดได้โดยเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูง TSP มีช่วงของขนาดอนุภาคค่อนข้างกว้าง จากการทดสอบในอุโมงค์ลม เครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูงสามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนได้เกือบ 100 % จนกระทั่งสามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับ 100 ไมครอน ได้เพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เพราะว่าเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดปริมาตรสูงมิได้มีการบ่งชี้ถึงช่วงของขนาดอนุภาคที่เก็บตัวอย่าง อย่างไรก็ตามได้ระบุถึงค่า Effective Cut Point ที่สามารถเก็บตัวอย่างอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ได้เท่ากับ 30 ไมครอน
- **PM-10** คือ อนุภาคฝุ่นผงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์เล็กกว่า 10 ไมครอน
- **IP** (ฝุ่นที่สามารถหายใจเข้าไปได้, Inhalable Particulate) คือ ฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์เล็กกว่า 15 ไมครอน บางครั้งจะใช้สัญลักษณ์เป็น PM -15
- **FP** (ฝุ่นละเอียด, Fine Particulate) คือ ฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์ไม่โตเกินกว่า 2.5 ไมครอน บางครั้งจะใช้สัญลักษณ์เป็น PM - 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ผลกระทบของฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนผลิตของโรงโม่หิน

กระบวนการผลิตหินของโรงโม่หินไม่ว่าจะเป็นการระเบิดหิน การขนถ่ายหิน การโม่บด หรือย่อยหิน ล้วนมีศักยภาพสูงในการก่อให้เกิดต้นเหตุของปัญหามลภาวะทางอากาศที่สำคัญคือ ฝุ่นละออง ซึ่งฝุ่นละอองเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบและผลเสียต่างๆที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างมากมาย ซึ่งสามารถจำแนกผลกระทบของฝุ่นได้หลายประเภทดังนี้

3.2.1 ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพของคนในบริเวณที่มีมลภาวะ

ผลกระทบนี้จะมีผลทั้งคนงานที่ทำงานอยู่ในโรงโม่หิน ผู้ประกอบการ ชุมชนที่อาศัยอยู่บริเวณโดยรอบโรงโม่หิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเขตที่มีโรงโม่หินตั้งอยู่เป็นจำนวนมาก รวมถึงผู้ที่เดินทางสัญจรไปมาผ่านโรงโม่ ฝุ่นจำนวนมากเหล่านี้จะลอยอยู่ในบรรยากาศซึ่งส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อดวงตา และที่สำคัญที่สุดคือ เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและปอดเมื่อเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่อง [4]

3.2.1.1 กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อฝุ่นละอองเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ

ปกติแล้วอากาศที่คนเราหายใจเข้าไปนั้นประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจน 78.0% ก๊าซออกซิเจน 20.9% นอกจากนั้นเป็น อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ นีออน ฮีเลียม มีเทน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนไดออกไซด์ และโอโซน รวมกันประมาณ 1.1% ดังนั้นฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนเข้ามาในอากาศจะทำให้คุณภาพของอากาศเปลี่ยนไป โดยฝุ่นละอองจะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจโดยการหายใจ อากาศที่หายใจจะเข้าสู่จมูก คอ ผ่านสู่หลอดลม ขั้วปอด และจากขั้วปอดจะแยกออกสู่ปอดทั้งสองข้างและกระจายออกเป็นท่อขนาดเล็ก ท่อฝอยและถุงลมปอดในที่สุด ซึ่งที่ถุงลมปอดจะมีเส้นเลือดฝอยและท่อน้ำเหลืองอยู่รอบ ๆ ด้วย

แต่ละส่วนของระบบทางเดินหายใจจะมีกลไกในการป้องกันที่จะดักจับสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามากับอากาศที่เราหายใจอยู่ อนุภาคของฝุ่นขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 10 ไมครอน) ส่วนใหญ่จะถูกดักจับภายในช่องจมูกและคอ ฝุ่นที่สามารถลอดผ่านไปได้บางส่วนจะถูกจับโดยการคัดหลั่งน้ำเมือกออกจากผิวของหลอดลมและท่อลมสาขา เมือกและอนุภาคที่ถูกจับเหล่านี้จะถูกดันขึ้นมาโดยขนขนาดเล็ก (Hairs or Cilia) จำนวนมากที่ทำให้เมือกหรือเสมหะเหล่านี้เคลื่อนที่ออกมาจากหลอดลม ด้วยอัตราครึ่งนิ้วต่อนาที และจะถูกขับออกในที่สุด อนุภาคที่เหลือที่เล็กกว่านี้ซึ่งส่วนใหญ่จะเล็กกว่า 5 ไมครอนอาจจะผ่านเข้าสู่ถุงลมปอดในที่สุด ที่นี่จะมีเซลล์ชนิดหนึ่งที่เคลื่อนที่ได้เก็บอนุภาคที่หลุดเข้ามา (Mobile Scavenger Cell) เรียกว่า Phagocyte ซึ่งจะดูดกลืนอนุภาคเหล่านี้และนำอนุภาคเหล่านี้ออกไปยังหลอดลมฝอยซึ่งจะถูกผลักดันออกไปโดยขนขนาดเล็กในที่สุด แต่อนุภาคบางส่วนที่เหลืออยู่จะผ่านทะลุถุงลมปอดและฝังตัวอยู่ในเนื้อเยื่อปอดและจะทะลุเข้าท่อน้ำเหลืองไปยังต่อมน้ำเหลืองซึ่งทำหน้าที่คล้ายตัวกรองซึ่งฝุ่นจำนวนหนึ่งจะติดอยู่ที่นั่น บาง

ส่วนจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเส้นใยหรือการเกิดขึ้นของเยื่อเหนียวหรือเยื่อพังผืดที่ปอด ซึ่งจะเกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อที่ฝุ่นฝังตัวหรือติดอยู่ ส่วนอนุภาคที่เหลือซึ่งโดยมากมีขนาดเล็กมากจะออกมากับลมหายใจออก

3.2.1.2 ผลร้ายของฝุ่นละอองต่อระบบทางเดินหายใจ

ฝุ่นละอองโดยทั่วไปจะมีผลต่อร่างกายมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับชนิดของฝุ่น ปริมาณที่ได้รับ ระยะเวลาที่สัมผัส ความแข็งแรง หรือภูมิต้านทานของผู้ที่สูดเข้าไป โดยฝุ่นซึ่งตัวอย่างของโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ อันเนื่องมาจากฝุ่นละอองมีดังนี้

1. *โรคภูมิแพ้* (Allergic Reaction) โรคภูมิแพ้เกิดขึ้นโดยการหายใจเอาอนุภาคฝุ่นบางชนิดเข้าไปแล้วเกิดการกระตุ้นที่เนื้อเยื่อ ทำให้ปล่อยเยื่อเมือกออกมาห่อหุ้มและค่อยๆขับออกมาโดยขนเล็กๆ การสะสมของฝุ่นอยู่ที่ผิวของระบบทางเดินหายใจจะทำให้ระบบทางเดินหายใจเกิดอาการนี้ขึ้นชั่วครั้งชั่วคราวเป็นอาการที่ไม่รุนแรงมาก

2. *นิวโมโคนิโอซีส* (Pneumoconiosis) หมายถึง ปอดที่มีอาการผิดปกติหรือโรคปอดที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นอนินทรีย์ (Inorganic Dust) จากบรรยากาศเข้าไปสะสมในปอด ลักษณะของอนุภาคที่ทำให้เกิดนิวโมโคนิโอซีสนั้นจะเป็นเส้นใยค่อนข้างแข็งที่ติดอยู่กับปอด ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อปอด ปอดจึงจะสร้างเยื่อเหนียวหรือเส้นใยมาห่อ ดังนั้นยิ่งหายใจเอาฝุ่นเข้าปอดมากเท่าไรโอกาสที่จะเป็นโรคปอดแข็งหรือนิวโมโคนิโอซีสมาเท่านั้น และถ้าเป็นโรคปอดแข็งประสิทธิภาพการทำงานของปอดจะลดลง อาการขั้นแรกของโรค คือ หายใจลำบาก ฝุ่นที่ก่อให้เกิดโรคนี้มีหลายชนิด โรคที่เกิดขึ้นจะมีชื่อเรียกตามชนิดของฝุ่นที่ก่อให้เกิดโรค เช่น ซิลิโคซีส แอสเบสโตซีส เบอริลลิโอซีส เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงฝุ่นที่มีมากในเหมืองหิน และโรงโม่หิน คือ ซิลิโคซีส

3. *ซิลิโคซีส* (Silicosis) เป็นโรคปอดที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นทรายหรือฝุ่นซิลิกาเข้าไป เมื่อหายใจเอาฝุ่นซิลิกาที่เป็นผลึกแหลมคมเข้าไปในปอดสะสมอยู่ในปอด ปอดจะสร้างเยื่อพังผืดมาห่อหุ้มผลึกเหล่านั้นไว้ อาการของโรคนี้ คือ หายใจลำบากต้องหายใจลึกๆ สั้นๆ ปริมาตรปอดลดลง เหนื่อยง่าย ทำงานได้น้อยลง อ่อนเพลีย ซึ่งอาจจะนำมาสู่การติดเชื้อวัณโรคได้ง่าย แต่ อุตสาหกรรมโม่หินส่วนใหญ่ในประเทศไทย จะทำการโม่หินโดยใช้วัตถุดิบหินปูนซึ่งมีซิลิกาในหินที่เป็นวัตถุดิบต่ำมากหรือไม่มีเลย

3.2.2 ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสภาพแวดล้อม การทำงาน และการดำเนินชีวิต

มลพิษจากฝุ่นนอกจากจะก่อให้เกิดความรำคาญ รู้สึกระคายเคือง และลดการมองเห็น อันเป็นสาเหตุที่ทำให้ทำงานได้ไม่สะดวกและส่งผลให้ทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพแล้ว ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหินเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความเป็นอยู่และการดำเนินชีวิตของคนเราเลวร้ายลงไปด้วย เช่น อาจจะต้องปิดบ้านอยู่ตลอดเวลา ทำให้อยู่อย่างอึดอัด ต้องทำการป้องกันเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ จากฝุ่น เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า เสื้อผ้า และอื่นๆ ซึ่งถ้ามีฝุ่นสะสมอยู่มาก ก็อาจเสียหายได้ หรือใช้ประโยชน์ได้

น้อย ต้องทำการปกปิดอาหารที่ประกอบขึ้นรับประทานในครัวเรือน การออกกำลังกายไม่อาจทำได้อย่างสะดวกสบาย รวมทั้งชีวิตความเป็นอยู่อื่นๆ ก็อยู่ในสภาพไม่ดีไปด้วย ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่ก่อให้เกิดปัญหาเหล่านี้ได้แก่ อนุภาคฝุ่นเกือบทุกขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ [4] นอกจากนั้นยังมีฝุ่นจำนวนหนึ่งสามารถลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานานและสามารถลอยไปได้ไกล ซึ่งถ้าบริเวณนั้นเกิดฝุ่นเป็นจำนวนมากจะทำให้ลดการมองเห็นลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้บริเวณนั้นมืดลงและมีปัญหาในการสัญจรไปมาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเช้ามืดและช่วงเย็นถึงค่ำ

ดังเช่นบริเวณตำบลหน้าพระลาน จังหวัดสระบุรี ซึ่งมีโรงโม่หินตั้งอยู่เป็นจำนวนมากตลอดเส้นทางที่รถบรรทุกวัตถุดิบแล่นผ่านจะมีสภาพของฝุ่นละอองฟุ้งกระจายทั้งบริเวณโรงงานและบ้านเรือนใกล้เคียง สภาพบ้านเรือนในตำบลนี้จะมีฝุ่นละอองจับ [1]

3.2.3 ผลกระทบของฝุ่นละอองทางด้านเศรษฐกิจ

ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหินนั้นนอกจากจะส่งผลกระทบทางด้านสุขภาพของคน และชีวิตความเป็นอยู่แล้วยังส่งผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจอีกด้วย ซึ่งสามารถแยกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการป้องกันและควบคุมฝุ่นละอองให้อยู่ในมาตรฐานเพื่อมิให้รบกวนและเป็นอันตรายต่อบริเวณชุมชนใกล้สถานที่ประกอบการ
2. ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้านรักษาสุขภาพของเจ้าหน้าที่และคนงาน
3. กิจการหรือธุรกิจบางอย่างไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้หากตั้งอยู่ในบริเวณใกล้กับสถานประกอบการ เช่น ร้านอาหาร ธุรกิจท่องเที่ยว
4. รัฐอาจจะต้องจัดโครงการเพื่อที่กำจัดหรือลดฝุ่นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ทำให้เสียงบประมาณแผ่นดิน

3.2.4 ผลกระทบในส่วนที่เกี่ยวกับขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง

ในการพิจารณาผลกระทบที่มีต่อมนุษย์จากอนุภาคของฝุ่นละอองขนาดต่างๆนั้น พบว่าขนาดของอนุภาคฝุ่นจะแปรผกผันกับผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ดังนั้นอาจแบ่งฝุ่นที่มีผลกระทบต่อร่างกายเป็น 3 ขนาด [1] ดังนี้

3.2.4.1 อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน

อนุภาคฝุ่นขนาดนี้ส่วนใหญ่จะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ไม่นานก็จะตกสู่พื้นดิน เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจทำให้เกิดอาการ เช่น หายใจไม่สะดวก จาม คัดจมูก แต่จะไม่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจมากนัก ยกเว้นได้รับในปริมาณมากๆ และเป็นเวลานาน แต่อนุภาคฝุ่นขนาดนี้จะทำให้เกิดปัญหาต่อการมองเห็นอย่างมาก อันนำมาสู่ปัญหาของการทำงาน การสัญจรและการทำงานของเครื่องจักร และจะทำให้ผู้ที่สัมผัสเดือดร้อนรำคาญอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อผิวหนัง หู และดวงตา

3.2.4.2 อนุภาคฝุ่นที่มีขนาด 0.1 ถึง 10 ไมครอน

อนุภาคฝุ่นขนาดนี้สามารถเข้าไปถึงส่วนต่างๆของระบบทางเดินอากาศ จึงเป็นฝุ่นที่อาจเป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆภายในระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากอนุภาคฝุ่นขนาดนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าฝุ่นเหล่านี้ฟุ้งกระจายอยู่ในบริเวณใดบ้าง เป็นผลให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงฝุ่นเหล่านี้ได้ นอกจากนี้อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (แต่ละเม็ด) จะมีน้ำหนักน้อยมาก ทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้เป็นเวลานาน จึงมีโอกาสที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ตลอดเวลาหากไปอยู่ในบริเวณที่มีฝุ่นเหล่านี้

อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กบางชนิดที่สามารถเคลื่อนตัวไปถึงปลายสุดของถุงลมปอด และอาจจะก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง ประเภทของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่อันตรายอาจพบในอุตสาหกรรมโม่บดและย่อยหิน ได้แก่ ฝุ่นจากซิลิกาซึ่งส่วนใหญ่มาจากหินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) จะก่อให้เกิดโรคซิลิโคซีส ซึ่งโรคทั้งสองอาจทำให้ถึงตายได้หรืออาจก่อให้เกิดโรคแทรกซ้อนอื่น เช่น วัณโรค มะเร็ง เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่ผู้ประกอบการเหมืองหินและโรงโม่หินในประเทศไทยจะพยายามหลีกเลี่ยงหินที่มีแร่ซิลิกาสูงอยู่แล้ว เนื่องจากหินที่มีแร่ซิลิกาหรือควอทซ์จะเป็นหินที่แข็งมาก ทำให้เครื่องโม่หินสึกหรอมาก อายุการใช้งานต่ำ

3.2.4.3 อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน

อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก โดยสามารถเคลื่อนตัวได้คล้ายก๊าซ (Mean Free Path = 0.1 ไมครอน) ดังนั้นอนุภาคฝุ่นขนาดนี้จะเข้าหรือออกจากระบบทางเดินหายใจได้คล้ายก๊าซ และส่วนมากมักถือว่าไม่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

3.3 โรงโม่หินและกระบวนการผลิต

ไม่มีใครสามารถปฏิเสธได้ว่าอุตสาหกรรมเหมืองหิน อุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน รวมถึงการขนส่งหินออกจากโรงงานโม่หินที่ปราศจากการติดตั้งระบบควบคุมฝุ่นละอองที่มีประสิทธิภาพนั้น มีผลโดยตรงทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบๆ เหมืองและโรงโม่หิน

เนื่องจากต้นทุนในการบรรทุกขนส่งหินมีสัดส่วนที่สูงมาก ซึ่งจะส่งผลให้หินที่ส่งถึงแหล่งบริโภคมีราคาแพงจนกระทั่งแพงกว่าราคาหินที่รับซื้อจากแหล่งผลิตโดยตรงหลายเท่า มีการคำนวณว่าค่าใช้จ่ายในการขนส่งด้วยรถบรรทุกโดยการบรรทุกหินทั้งขาไป และขากลับอยู่ในช่วง 0.85 – 0.95 บาท/ตัน/กม. [1] ดังนั้นจึงทำให้มีความจำเป็นต้องจัดตั้งโรงโม่หินให้ใกล้แหล่งที่มีความต้องการใช้หินมากที่สุด ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถพบโรงโม่หินจำนวนมากอยู่ในเขตจังหวัดสระบุรีซึ่งเป็นแหล่งหินขนาดใหญ่ที่ใกล้กรุงเทพฯมากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี ที่มีโรงโม่หินจำนวนมากตั้งอยู่ใกล้เคียงกัน ปัญหาฝุ่นละอองในบริเวณนั้นอยู่ในขั้นที่รุนแรงมาก การตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศแวดล้อมโรงงาน โดยสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี ในบางเดือนมีค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) เกินมาตรฐานทุกวัน เช่น ในเดือนมีนาคม [3] ส่วนในเดือนอื่นๆ จำนวนวันส่วนใหญ่ค่าที่วัดได้ก็เกินจากมาตรฐานที่กำหนด และค่าเฉลี่ยที่ได้ของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนก็มีค่าสูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ดังนั้นเราจะควบคุมอย่างไรให้อุตสาหกรรมนี้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยเน้นการกำจัดฝุ่นที่เกิดจากอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการโม่ บด และย่อยหินซึ่งจัดเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นที่สำคัญนอกเหนือจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เกิดจากการระเบิดหินจากเหมืองหิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 *คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี พ.ศ. 2539 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)*

เดือน	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM-10) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ($\mu g/m^3$)		
	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน
ม.ค.	129.0	22.8	0	70.0	18.0	0	3.0	1.2	0	677.0	382.0	29
ก.พ.	86.0	6.9	0	101.0	18.5	0	3.0	1.0	0	660.1	256.2	21
มี.ค.	157.0	8.8	0	78.0	23.4	0	4.0	0.8	0	582.8	297.2	31
เม.ย.	42.0	5.2	0	82.0	21.8	0	1.6	0.7	0	506.3	264.4	26
พ.ค.	72.0	4.7	0	73.0	19.9	0	16.3	3.7	0	677.5	365.6	30
มิ.ย.	49.0	6.1	0	68.0	19.2	0	2.1	0.6	0	702.3	441.8	29
ก.ค.	43.0	5.5	0	43.0	16.2	0	1.7	0.4	0	642.2	329.0	24
ส.ค.	39.0	5.2	0	49.0	14.1	0	7.9	0.4	0	623.7	415.2	25
ก.ย.	57.0	2.7	0	46.0	12.5	0	8.6	0.6	0	504.8	237.7	21
ต.ค.	20.0	2.7	0	35.0	9.2	0	8.4	0.7	0	351.3	103.6	8
พ.ย.	21.7	2.7	0	79.0	14.8	0	1.4	0.4	0	629.8	201.5	12
ธ.ค.	39.3	3.0	0	53.0	10.3	0	1.3	0.5	0	399.9	247.1	16
ค่ามาตรฐาน	**300**			**170**			**30**			**120**		

ตารางที่ 3.2 *คุณภาพอากาศบริเวณโรงเรียนหน้าพระลาน ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี เดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ.2540 (กรมควบคุมมลพิษ, 2540)*

เดือน	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)			ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM-10) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ($\mu g/m^3$)		
	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	จำนวนครั้งที่สูงกว่ามาตรฐาน
ม.ค.	106.0	5.5	0	72.0	21.0	0	2.8	0.7	0	731.3	346.9	28
ก.พ.	59.0	4.4	0	120.0	25.2	0	1.8	0.5	0	465.6	229.6	22
ค่ามาตรฐาน	**300**			**170**			**30**			**120**		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 กระบวนการผลิต

อุตสาหกรรมการโม่ บด และย่อยหินโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการผลิตหินในรูปแบบสายการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [2] กระบวนการผลิตภายในโรงโม่หินเริ่มจากการนำหินออกมาจากเหมืองหินโดยการเจาะและระเบิด หลังจากการระเบิดเกิดขึ้นจะเกิดฝุ่นเล็ดลอดฟุ้งกระจาย (Fugitive Dust) หินจะแตกออกและตกจากหน้าผาสูงลงสู่พื้นเหมือง จากนั้นจะถูกรถตัก (Front-End Loader) ตักหินใส่รถบรรทุก ปริมาณฝุ่นที่ฟุ้งกระจายจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของซิลท์ (Silt Content คือ สัดส่วนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน) ในหินและความสูงชันของหน้าผาที่ตกลงมา หลังจากนั้นหินจะถูกบรรทุกมายังโรงโม่หินซึ่งช่วงนี้ก็จะเกิดฝุ่นฟุ้งกระจายจากหินที่บรรทุกในท้ายรถและจากล้อรถที่บดและสัมผัสกับหิน ดินและฝุ่นที่ตกอยู่บนพื้นถนน โรงโม่หินควรจะอยู่ใกล้เหมืองหินเพื่อประหยัดค่าขนส่ง และเพื่อลดปริมาณฝุ่นที่จะเกิดขึ้นขณะขนส่งให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

หินซึ่งผ่านการระเบิดจะถูกลำเลียงจากหน้าเหมืองเพื่อนำมาย่อยในโรงโม่หิน ซึ่งปกติมักจะถูกลำเลียงมาโดยรถเทท้าย (Dump Truck) เพื่อป้อนเข้ายุ้งเก็บ (Bin or Hopper) จากนั้นหินก็จะถูกส่งผ่านไปย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นต้นหรือปากโม่ (Primary Crusher) ซึ่งมักจะเป็นเครื่องโม่ชนิดจอว์ (Jaw Crusher) เครื่องป้อนหิน (Feeder) จะถูกใช้ในการป้อนหินจากยุ้งเข้าสู่เครื่องโม่ขั้นต้น โดยทั่วไปมักนิยมใช้เครื่องป้อนแบบ Plate Feeder หรือ Vibrating Grizzly Feeder [5]

- เครื่องป้อนแบบ Grizzly จะเป็นเครื่องป้อนที่มีกลไกทำให้มีการสั่น ประกอบด้วยแท่งเหล็กขนานกัน มีช่องว่างให้หินขนาดเล็กลอดผ่านออกไปโดยไม่ต้องผ่านเครื่องโม่ขั้นต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณหินที่จะผ่านเครื่องโม่ และเพื่อลดความเสี่ยงที่หินขนาดเล็กจะเข้าตามช่องว่างทำให้เกิดการอัดแน่น (Packing) และเครื่องโม่เกิดความเสียหายได้
- เครื่องป้อนแบบแผ่น (Plate Feeder) เครื่องป้อนแบบนี้จะติดตั้งอยู่ข้างใต้ยุ้งปากโม่ การปรับอัตราการป้อนหินสามารถควบคุมได้โดยมีการเคลื่อนไหวชักไป-มา (ปรับความเร็วและช่วงชักได้) มักขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เหมาะสำหรับใช้ป้อนหินที่ไม่แข็งมากนัก เช่น หินปูน

เมื่อหินถูกป้อนเข้าสู่ปากโม่ หินก็จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงและถูกควบคุมขนาดด้วยปากทางออก (Set) หินที่มีขนาดเล็กลงจะถูกลำเลียงด้วยสายพานลำเลียงไปคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่น(Vibrating Screen) ซึ่งจะทำหน้าที่คัดหินออกให้มีขนาดต่างๆกัน ดินและหินที่ลอดผ่านตะแกรงสั่นขั้นต้นก็จะมารวมปนกันกลายเป็นกอง เรียกกันว่า กองหินคลุก ส่วนหินอื่นๆจะถูกลำเลียงไปยังกระบวนการต่อไป

อย่างไรก็ตามหินที่ผ่านการย่อยขั้นต้นจะยังคงมีขนาดโตเกินกว่าที่จะนำมาใช้เป็นหินก่อสร้างได้ หินขนาดโตเหล่านี้จะถูกย่อยซ้ำให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สอง (Secondary Jaw Crusher) ซึ่งมักจะเป็นเครื่องโม่ทรงกรวย (Cone Crusher) หรือจอว์ (Jaw Crusher) ที่มีขนาดปากเล็กและรูปร่างค่อนข้างแบนซึ่งมักเรียกว่า ปากซอย ซึ่งหลังจากผ่านการย่อยซ้ำแล้วหินจะถูกนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่นอีกชุดหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่คัดขนาดหินที่ผ่านการย่อยมาแล้วให้ได้ขนาดต่างๆ ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง อย่างไรก็ตามอาจมีหินขนาดโตเกินกว่าที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง หินเหล่านี้จะถูกตะแกรงสั่นคัดออกมา และมักถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สาม (Tertiary Crusher) ซึ่งมักใช้ชนิด Impact Mill หรือ Hammer Mill หรือ Rotary Crusher หินที่ถูกย่อยด้วยเครื่องโม่ขั้นที่สามมักจะถูกนำมาคัดขนาดด้วยตะแกรงสั่นชุดเดิมอีกครั้งหนึ่ง

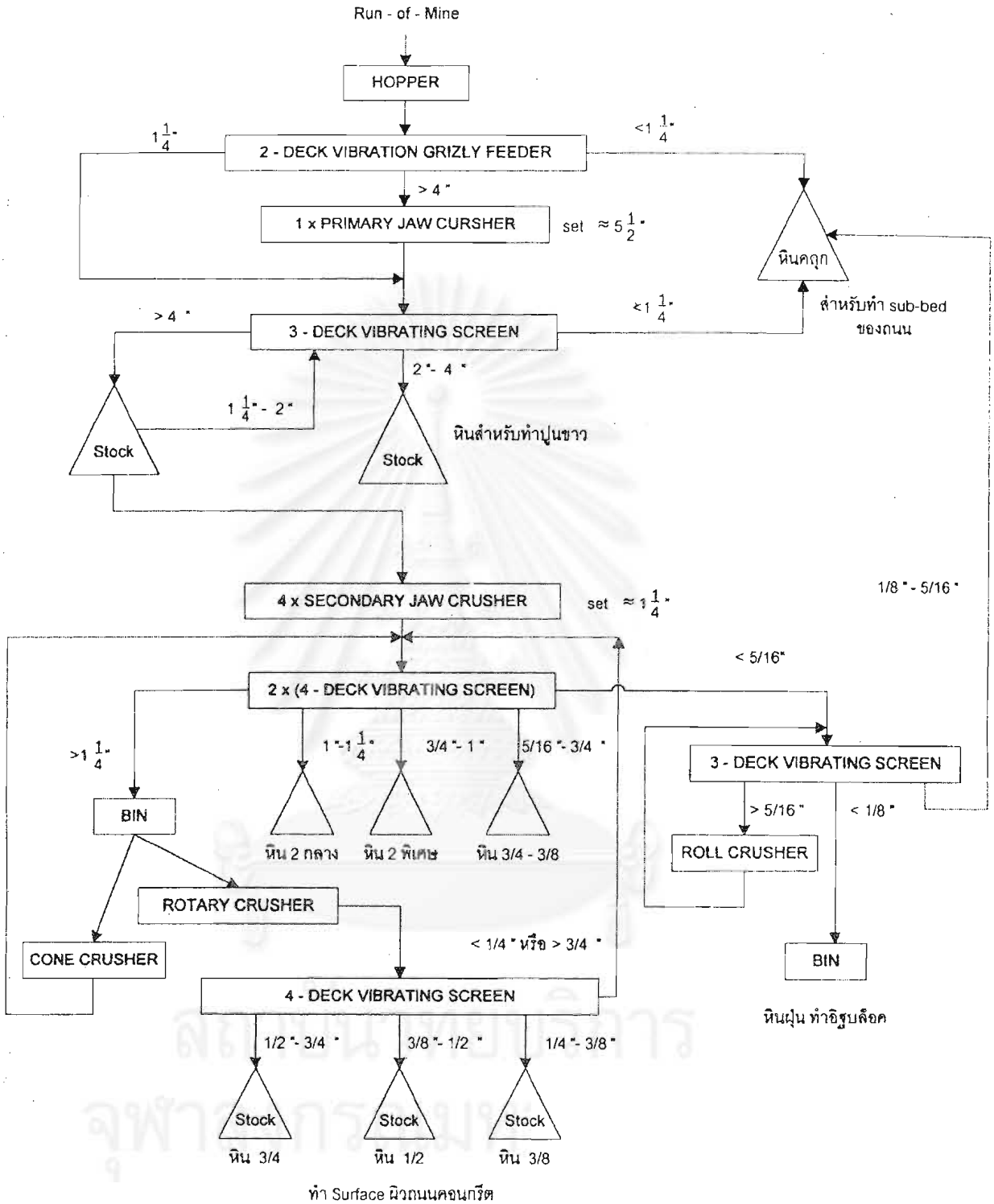
หินที่ผ่านตะแกรงสั่นขั้นที่สองก็จะถูกลำเลียงโดยสายพานและตกลงสู่กองหินซึ่งกองตามขนาดหินต่างๆ และจะถูกรถตักตักใส่รถบรรทุกเพื่อลำเลียงออกขายต่อไป สำหรับหินขนาดเล็ก เช่น หินฝุ่นซึ่งก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายมากจะต้องจัดเก็บในยุ้ง และให้รถบรรทุกมารับหินจากก้นยุ้ง

เครื่องจักรที่สำคัญภายในโรงโม่หินแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้ [5]

3.3.1.1 เครื่องโม่ขั้นต้น (Primary Crusher)

เครื่องโม่ขั้นต้นที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือ เครื่องโม่จอว์ (Jaw Crusher) ลักษณะสำคัญคือ ประกอบด้วยแผ่นย่อย 2 แผ่น แผ่นหนึ่งอยู่กับที่ (Fixed Jaw) แต่อีกแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่เข้าและออกจากแผ่นแรก (Swing Jaw) โดยทำงานคล้ายๆกับขากรรไกรเคี้ยวอาหาร แผ่นย่อยทั้งสองจะทำมุมแหลม (Acute Angle) ซึ่งกันและกัน เมื่อนำหินที่ต้องการย่อยมาผ่านแผ่นทั้งสองก็จะถูกกดหรือหนีบ แล้วปล่อยออกมา หินก็จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงแล้วเคลื่อนที่ลงไปข้างล่างด้วยแรงโน้มถ่วง แล้วก็จะถูกกดซ้ำอีกจนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากปากทางออก (Set) ไป หินที่ถูกย่อยโดยเครื่องโม่ขั้นต้นจะถูกย่อยให้มีขนาดประมาณ 7.5 – 30 เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 แสดงผังการโม่หินของโรงโม่หินทั่วไป

3.3.1.2 เครื่องโม่ขั้นที่สอง (Secondary crusher)

เครื่องโม่ขั้นที่สองนี้มักมีน้ำหนักเบา และทำงานเบากว่าเครื่องโม่ขั้นต้น เนื่องจากมักทำการย่อยหินที่มาจากเครื่องโม่ขั้นต้น หินที่ป้อนเข้ามามักมีขนาดเล็กกว่า 15 เซนติเมตร นอกจากนั้นแล้วระบบการลำเลียงขนส่งตลอดจนระบบป้อนหินเข้าย่อยก็ไม่จำเป็นต้องเป็นระบบที่แข็งแรงมากเท่ากับที่ใช้ในการย่อยขั้นต้น เครื่องโม่ที่นิยมใช้มากได้แก่ เครื่องโม่จอว์ (Secondary Jaw Crusher) เครื่องโม่ทรงกรวย (Cone Crusher) และ เครื่องโม่แบบลูกกลิ้ง (Roll Crusher)

3.3.1.3 เครื่องโม่ขั้นที่สาม (Tertiary crusher)

เครื่องโม่ขั้นที่สามที่นิยมใช้ในโรงโม่หิน ได้แก่ เครื่องโม่แบบแรงกระแทก (Impact Crusher) ซึ่งอาจเรียกทั่วๆไปว่าเครื่องโม่โรตารี (Rotary Crusher)

เครื่องโม่แบบแรงกระแทกจะใช้หลักการของแรงกระแทก (Impact) ในการทำให้เกิดการแตกหักของหิน แรงกระแทกจะมาจากวัสดุแข็งมากระแทกกับหินที่ปล่อยให้หล่นลงมา (Free Falling Rock) โดยมีความเร็วสูง วัสดุแข็งหรือตัวตี (Beater) จะส่งผ่านพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ไปยังวัตถุที่ต้องการย่อยโดยการกระทบ ความเครียดภายใน (Internal Stress) ของวัตถุจะมากพอที่จะทำให้วัตถุเกิดการแตกกระจาย แรงกระแทกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อวัตถุไปกระทบแผ่นแข็ง (Breaker Plate) อีกข้างหนึ่ง

3.3.1.4 เครื่องคัดขนาด (Sizing Screen)

เครื่องคัดขนาดที่นิยมใช้ในโรงโม่ ได้แก่ ตะแกรงสั่น (Vibrating Screen) สามารถคัดหินได้ใหญ่ที่สุด 25 เซนติเมตร และเล็กลงไปถึง 250 ไมครอน การสั่นจะอยู่ในแนวนอนโดยการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวไปมา (Reciprocating Device) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แรงสั่นจะส่งผ่านไปยังโครง (Casing) ของตะแกรง หรือบางแบบอาจใช้การสั่นที่มาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของหินลอดผ่านตะแกรงในชั้นที่มีขนาดของรูต่างๆกัน ตะแกรงสั่นสามารถทำงานที่ความชัน (Slope) ต่ำโดยใช้ความสูง (Head room) น้อย ตะแกรงสั่นหลายชั้น (Multi-deck Vibrating Screen) จะมีการป้อนเข้ามาคัดขนาดโดยตะแกรงรูใหญ่จะอยู่ข้างบน ส่วนตะแกรงถัดมาจะมีขนาดรูเล็กลงตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคัดหินออกมาได้หลายขนาด

3.4 แหล่งกำเนิดฝุ่นและระบบกำจัดฝุ่นในโรงโม่หิน

อุตสาหกรรมการโม่ บด และย่อยหินนั้น เป็นต้นกำเนิดของฝุ่นละอองที่หลุดออกมาสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก โดยสามารถจำแนกออกได้เป็น [13]

- **ฝุ่นจากกระบวนการ** (Process Source) หมายถึง ฝุ่นที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการ ซึ่งสามารถดักจับ และควบคุมได้โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม
- **ฝุ่นฟุ้งกระจาย** (Fugitive Dust) หมายถึง ฝุ่นจากพื้นหรือที่เกาะอยู่ตามเครื่องจักร แล้วถูกทำให้ฟุ้งกระจายในอากาศโดยลม การเคลื่อนไหวหรือสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

สิ่งที่มีผลกระทบต่อการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง ได้แก่ [4]

1. ชนิด และองค์ประกอบของหิน
2. ขนาดและการกระจายขนาดของหิน
3. ความชื้นของหิน
4. อัตราการผลิต
5. ชนิดของเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการโม่ บด และย่อยหิน
6. ลักษณะและวิธีการทำงาน
7. สภาพพื้นที่และสภาพภูมิอากาศ

โดยสภาพพื้นที่และสภาพภูมิอากาศของโรงโม่หิน เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองเป็นอันดับแรก คือ ลมและความชื้นของหิน

ลักษณะลมเปลี่ยนแปลงตามภูมิภาค ฤดูกาล และสภาพภูมิอากาศ เราสามารถคาดเดาได้ว่าแหล่งกำเนิดที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมจะมีการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองอย่างรุนแรงในเวลาลมแรง

ความชื้นของหินเปลี่ยนแปลงตามภูมิภาค ที่ตั้ง ฤดูกาล และสภาพอากาศเช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง ในพื้นที่แห้งแล้งจะมากกว่าในพื้นที่ฝนตกชุก และปริมาณฝุ่นในฤดูแล้งจะมากกว่าฤดูฝน ความชื้นของหินมีผลอย่างมากต่อปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง ผลกระทบนี้เห็นได้ชัดเจนในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ผิวที่เปียกน้ำจะทำให้ฝุ่นรวมตัวกันหรือจับเกาะกับหินเป็นการลดปริมาณฝุ่น อย่างไรก็ดีเมื่อหินถูกย่อยหรือกระแทกทำให้เกิดฝุ่นจำนวนใหม่ขึ้น หรือเมื่อความชื้นระเหยไปประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นจะน้อยลงหรือหายไปด้วย ดังนั้นโรงโม่หินซึ่งใช้การฉีดน้ำรักษาความชื้นไว้สูงตลอดจะสามารถควบคุมฝุ่นไว้ได้ตลอดกระบวนการ ความชื้นของหินจากเหมืองอาจมีค่าศูนย์หรือหลายเปอร์เซนต์ขึ้นกับสภาพอากาศ โดยปริมาณความชื้นจริงต่อพื้นที่ผิวจะแปรผกผันกับขนาดของหิน โดยทั่วไปหินที่เปียกจะมีน้ำ 1.5 – 4 % หรือมากกว่า

3.4.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง

การทำเหมืองหินก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองออกมาเป็นจำนวนมาก กิจกรรมหลักในเหมืองหิน คือ การทำให้หินแตกออกจากกันโดยการเจาะและการระเบิด การฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจะมีจำนวนมากเมื่อมีการระเบิด และเมื่อผนังของหินแยกตัวออกและถล่มลงมาที่พื้นเหมือง หินที่แตกแยกออกมาแล้วจะถูกลำเลียงใส่รถบรรทุกโดยรถตัก ปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลท์และระยะความสูงของหินที่ตกใส่รถบรรทุก หลังจากนั้นรถบรรทุกก็จะลำเลียงหินไปยังโรงโม่หิน ระหว่างการขนส่งฝุ่นจากหินในรถบรรทุกอาจจะปล่อยออกมาตามถนนหรือตกลงยังพื้นถนนได้

บริเวณหรือกระบวนการที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองจากกระบวนการผลิตหิน รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ตั้งแต่การนำหินก้อนใหญ่จากเหมืองหินสู่กระบวนการโม่หิน จนกระทั่งส่งหินที่ย่อยแล้วออกไปจำหน่ายล้วนก่อให้เกิดฝุ่นละอองได้ในทุกขั้นตอน [14] จากการพิจารณาแหล่งกำเนิดฝุ่นต่างๆ ในโรงโม่หินพบว่า สามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฝุ่นได้เป็นสองประเภท คือ แหล่งกำเนิดหลัก และแหล่งกำเนิดรอง ดังนี้ [5]

- **แหล่งกำเนิดหลัก**

แหล่งกำเนิดหลัก หมายถึง แหล่งกำเนิดที่เป็นต้นกำเนิดของฝุ่นจริงๆ โดยแหล่งกำเนิดหลักจะปล่อยฝุ่นออกไปยังที่ต่างๆ รวมทั้งที่แหล่งกำเนิดรองด้วย โดยสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการต่างๆ ได้ดังนี้

1. การขนส่งบรรทุกหินจากเหมืองเข้าสู่โรงโม่หิน
2. การเทหินลงสู่ยุ้งรับหิน (Hopper)
3. การบดย่อยหินของเครื่องโม่ชนิดต่างๆ
4. จุดที่หินซึ่งย่อยแล้วตกกระทบลงบนสายพานลำเลียงหิน (Transfer Point)
5. การสั่นสะเทือนที่บริเวณตะแกรงสั่นคัดขนาด
6. การเทหินบริเวณกองหิน
7. บริเวณที่รถตักทำการตักหินใส่รถบรรทุก หรือเพื่อเปลี่ยนสถานที่กองหินต่างๆ
8. บริเวณที่มีการลำเลียงขนส่งด้วยรถบรรทุกในเขตโรงโม่หินก่อนออกสู่ถนนใหญ่
9. ลมที่พัดผ่านโรงโม่หิน ทำให้เกิดฝุ่นฟุ้งกระจายในหลายจุด เช่น
    - สายพานที่ไม่มีวัสดุคลุม
    - กองหินต่างๆ
    - ตะแกรง และเครื่องโม่ที่ไม่มีช่องเปิด
    - พื้นที่โรงงาน หรือถนนที่มีฝุ่นตกอยู่ เป็นต้น

- **แหล่งกำเนิดรอง**

แหล่งกำเนิดรอง หมายถึง แหล่งกำเนิดที่ได้รับฝุ่นมาจากที่อื่น แล้วมีปัจจัยที่ทำให้ฝุ่นเหล่านั้นฟุ้งกระจายไปที่อื่นต่อไป ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดรองนี้ได้แก่ เส้นทางลำเลียงที่ราดยางหรือเทคอนกรีต และบริเวณพื้นที่อื่นๆ ในโรงโม่หินที่มีฝุ่น

กลไกการเกิดฝุ่นโดยการปล่อยหินให้ตกลงมาในอุปกรณ์โม่หิน หรือกองกับพื้น หรือปล่อยให้หินตกลงมาระหว่างการเคลื่อนย้ายโดยใช้สายพานเพื่อขนถ่ายหินเข้าสู่กระบวนการอื่นต่อไป แบ่งได้เป็น 2 กลไก ดังนี้คือ [15]

1. ฝุ่นที่เกิดขึ้นโดยตรงจากการเทหรือปล่อยหินให้ตกลงมาเป็นสาย (Stream Line)
2. ฝุ่นที่เกิดจากหินที่เทหรือปล่อยลงไปกระทบกับกองหินที่อยู่ด้านล่าง

หินที่ตกลงมากระทบกับกองหิน ทำให้อากาศที่อยู่ภายในกองหินเกิดการเคลื่อนที่ออกมา อากาศที่เคลื่อนที่ออกมาทำให้เกิดเป็นแรงทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Force) จึงทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจาย

แต่ทั้งนี้ ตามมาตรฐาน US EPA 1991 กำหนดให้แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่สำคัญภายในโรงโม่หิน ได้แก่

1. เครื่องโม่

ฝุ่นจะเกิดขึ้นและถูกปล่อยออกจากจุดนี้มากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณช่องป้อนหินเพื่อทำการโม่ และทางออกของหินที่โม่แล้ว ความชื้นและชนิดของเครื่องโม่ที่ใช้จะมีผลต่อการปล่อยฝุ่นออกมาอย่างมาก สัดส่วนการลดขนาดของเครื่องจักร การกระจายขนาดของหินที่โม่แล้ว สัดส่วนของอนุภาคละเอียดและพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในอนุภาคละเอียดเหล่านั้นจะมีผลต่อการปล่อยฝุ่นออกมาโดยตรง

เครื่องโม่ที่ใช้การตีหรือการกระแทกจะทำให้เกิดสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดละเอียดในสัดส่วนที่มากกว่าการใช้การอัด นอกจากนั้นเครื่องโม่แบบกระแทกยังมีตัวหมุนกระแทกหินที่มีลักษณะคล้ายใบพัด ทำให้เกิดลมภายในที่พัดฝุ่นออกมามาก ด้วยเหตุผลเหล่านี้เครื่องโม่แบบกระแทกที่ไม่มีการควบคุมฝุ่นจะก่อให้เกิดการปล่อยฝุ่นออกมาต่อจำนวนตันวัตถุดิบที่ป้อนเข้ามามากกว่าเครื่องโม่ชนิดอื่น การปล่อยฝุ่นออกมาจากเครื่องโม่ขั้นที่สอง เครื่องโม่ขั้นที่สาม และเครื่องโม่แบบทรงกรวย จะก่อให้เกิดฝุ่นมากกว่าเครื่องโม่จอว์ เพราะจะก่อให้เกิดอนุภาคละเอียดมากกว่า

2. ตะแกรงคัดขนาด

ฝุ่นที่ปล่อยออกมาจากการทำงานของตะแกรงเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของหินที่แห้ง ระดับของการปล่อยฝุ่นในกรณีที่ไม่มีการควบคุมจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนอนุภาคละเอียดที่อยู่ในหินที่ป้อน อัตราส่วนความชื้นของหิน และประเภทของตะแกรง โดยทั่วไปตะแกรงที่ใช้คัดขนาดหินที่มีขนาดเล็กกว่า

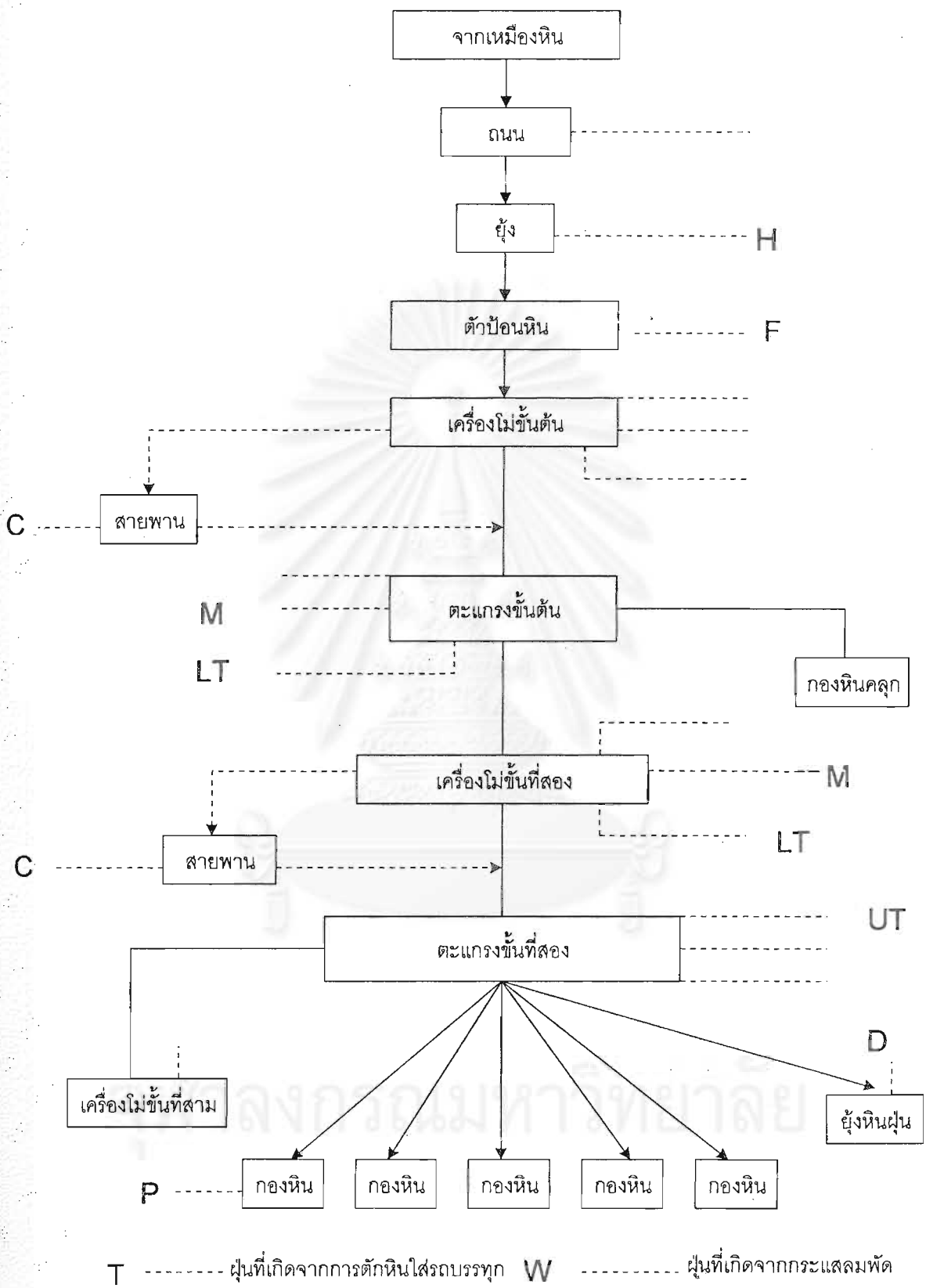
จะปล่อยฝุ่นออกมามากกว่าตะแกรงที่ใช้คัดขนาดหินที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกันตะแกรงที่มีการสั่นที่แอมพลิจูดหรือความถี่สูงกว่าจะปล่อยฝุ่นออกมามากกว่าตะแกรงที่มีการสั่นที่แอมพลิจูดหรือความถี่ต่ำกว่า

3. จุดถ่ายโอนสายพาน

ฝุ่นที่ปล่อยออกมาจากจุดถ่ายโอนสายพานจะขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดหินบนสายพาน สัดส่วนความชื้นอัตราเร็วของสายพาน ความเร็วลมจากสิ่งแวดล้อม และระยะการตกอิสระของหินระหว่างสายพาน (Drop Height)

จุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นจำนวนมากและลักษณะการเกิดฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่างๆ ภายในโรงโม่หินแสดงในรูป 3.2 และตารางที่ 3.3 ซึ่งลักษณะโรงโม่หินที่แสดงในรูปนี้เป็นรูปแบบสายการผลิตที่นิยมใช้ทั่วๆไปในประเทศไทย [4]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 3.2</u> จุดกำเนิด และลักษณะการเกิดฝุ่นภายในโรงโม่หิน

ตารางที่ 3.3 *จุดกำเนิดฝุ่นสำคัญและลักษณะการเกิดฝุ่นในกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน*

ตำแหน่ง	จุด	ลักษณะการเกิดฝุ่น
1. ถนน (Road)	R	เกิดจากการวิ่งบนถนนของรถบรรทุกหินทั้งขาเข้าและขาออก โดยฝุ่นเกิดจาก 3 กรณี กรณีแรกเกิดจากฝุ่นฟุ้งกระจายออกจากรถบรรทุก กรณีที่สองเกิดจากล้อรถสัมผัสกับพื้นถนนที่ไม่มีวัสดุคลุม และมีเศษหิน ดินและฝุ่นตกหรือฟุ้งออกจากรถบรรทุก กรณีที่สามเกิดจากระแสลมที่พัดให้ฝุ่นหรือหินที่ตกอยู่บนถนนฟุ้งกระจายขึ้นมา
2. ยุ้งเทหิน (Hopper)	H	เกิดจากการถ่ายเทหินออกจากรถบรรทุกลงยุ้ง จะเกิดเป็นช่วงๆ แต่มีจำนวนมากโดยเฉพาะหากไม่มีวัสดุปกคลุมเหนือยุ้ง แต่จะเป็นระยะช่วงเวลาไม่นานนักหลังจากการเทหิน
3. ตัวป้อนหิน (Feeder)	F	เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวป้อนหินที่ค่อยผลักดันหินหรือสั่นเพื่อให้หินตกลงสู่ปากโม่ใหญ่ ทำให้หินเกิดการเคลื่อนที่ สั่นสะเทือน และเสียดสีกันระหว่างหินกับหิน และระหว่างหินกับเครื่องจักร
4. จุดถ่ายโอนหินด้านบนของเครื่องจักร (Upper Transfer)	UT	ฝุ่นที่บริเวณด้านบนของเครื่องโม่ จะเกิดใน 2 กรณี คือ กรณีแรกเกิดจากการที่หินตกกระทบลงบนเครื่องโม่ กรณีที่สองฝุ่นที่เกิดจากการโม่บางส่วนจะฟุ้งกระจายออกทางด้านเหนือปากโม่ เครื่องโม่ขั้นที่สองจะเกิดฝุ่นมากกว่าเครื่องโม่ขั้นต้น เนื่องจากมีฝุ่นขนาดเล็กซึ่งฟุ้งกระจายได้ง่ายเป็นจำนวนมาก และด้านบนของเครื่องโม่ขั้นต้นจะเกิดฝุ่นเป็นจำนวนมากจากการเทหินทั้งหมดลงจากรถบรรทุก หินบางส่วนจะตกลงสู่เครื่องโม่ทันที แต่เกิดฝุ่นเป็นระยะเวลาสั้นๆ ส่วนฝุ่นที่บริเวณด้านบนของตะแกรง เกิดจากการที่หินตกกระทบกับตะแกรงและจากการที่ฝุ่นที่เกิดภายในตะแกรงฟุ้งกระจายออกด้านบน โดยตะแกรงขั้นที่สองจะเกิดฝุ่นจำนวนมากกว่าตะแกรงขั้นที่หนึ่ง
5. จุดถ่ายโอนหินด้านล่างของเครื่องจักร (Lower Transfer)	LT	เป็นฝุ่นที่เกิดจาก 2 กรณี คือ กรณีแรกเกิดจากฝุ่นบางส่วนที่เกิดจากการโม่ภายในเครื่องโม่หรือเกิดจากการสั่นและคัดขนาดของตะแกรงคัดขนาด ฟุ้งออกมาทางช่องทางออกที่อยู่ใต้เครื่องโม่หรือตะแกรง กรณีที่สองเกิดจากหินตกกระทบลงยังสายพานลำเลียงที่คอยรับหินอยู่ด้านล่างทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นออกมา

ตารางที่ 3.3 *(ต่อ)*

ตำแหน่ง	จุด	ลักษณะการเกิดฝุ่น
6. ระหว่างจุดถ่ายโอนทั้งสอง	M	ในกรณีของเครื่องโม่ คือ ฝุ่นที่เกิดจากการโม่ภายในเครื่องโม่ที่ฟุ้งออกมาตามรอยชำรุด รอยต่อหรือขอบต่างๆของตัวเครื่องโม่ ถ้าเครื่องโม่มีสภาพที่สมบูรณ์จะเกิดฝุ่นในกรณีนี้ต่ำหรือต่ำมาก ส่วนตะแกรงคัดขนาดฝุ่นที่เกิดบริเวณด้านหลังหรือด้านข้างของตะแกรง เกิดจากการกระทบกันของหินกับตะแกรงชั้นต่างๆ และการสั่นสะเทือนทำให้เกิดฝุ่นภายในตะแกรงและบางส่วนฟุ้งกระจายออกด้านข้างของตะแกรง บริเวณจุดนี้ตะแกรงขั้นที่สองจะเกิดฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูง และปริมาณมากกว่าตะแกรงขั้นต้นมาก เนื่องจากมีตะแกรงหลายชั้นและฝุ่นตกค้างจำนวนมากจากการโม่ในเครื่องโม่ขั้นที่สอง บางครั้งอาจจะเห็นเป็นกลุ่มหมอกฟุ้งกระจายอย่างต่อเนื่อง
7. สายพาน (Conveyor)	C	เฉพาะกรณีที่มีสายพานไม่ได้ลำเลียงโดยวิ่งเป็นเส้นเดียวกัน จะเกิดการถ่ายโอนหิน ความสั่นสะเทือนทำให้เกิดฝุ่น
8. กองหินคลุก และกองหิน (Pile)	P	เกิดฝุ่นในสามกรณี คือ กรณีแรกเกิดในช่วงเวลาที่หิน ดิน และฝุ่นตกจากสายพานและลอยอยู่ในอากาศ ฝุ่นในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของซิลท์ ความเร็วของลม ความชื้น และความสูงที่ลอยอยู่ในอากาศ กรณีทีสองเกิดจากการที่หิน ดิน และฝุ่นตกกระทบกับกองหิน ทำให้เกิดความสั่นสะเทือนและฟุ้งกระจาย กรณีสุดท้าย เกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านกองหินทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจายขึ้นมา
9. ยุ้งหินฝุ่น (Dust Hopper)	DH	หินที่โม่จากเครื่องโม่จะตกลงยุ้งปิด จะเกิดฝุ่นในขณะที่เปิดด้านล่างของยุ้งออกเพื่อให้หินฝุ่นตกลงใสยังกระบะท้ายของรถบรรทุก ฝุ่นจะฟุ้งกระจายออกมา
10. การตักหินใส่รถบรรทุก	T	หินที่กองไว้จะถูกตักใส่รถบรรทุก จะเกิดฝุ่นฟุ้งกระจายจำนวนมากจากจุดนี้
11. ลม (Wind)	W	กระแสลมจะพัดให้ฝุ่นที่ติดค้างอยู่ตามสายการผลิตต่างๆรวมทั้งพื้นโรงงานภายในโรงโม่ฟุ้งกระจายไปทั่ว ถ้าหากมีการจัดการไม่ให้เกิดฝุ่นภายในโรงโม่หินก็จะเกิดฝุ่นตกสะสมจำนวนน้อย ฝุ่นที่เกิดจากกรณีนี้ก็จะน้อยลง

3.4.2 แนวทางการควบคุมปริมาณฝุ่นจากโรงโม่หิน

แนวทางการควบคุมปริมาณฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการโม่ บด และย่อยหินแบ่งได้เป็น 3 แนวทาง ดังนี้ [1]

1. ควบคุมไม่ให้เกิดฝุ่นละอองหรือให้เกิดฝุ่นละอองน้อยที่สุด รวมถึงการกำจัดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นแล้วนั้นไม่ให้ฟุ้งกระจายออกจากแหล่งกำเนิด อันได้แก่ การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เกิดฝุ่นน้อยที่สุด การฉีดพ่นหยดละอองน้ำ หรือการสร้างระบบรวมรวมและส่งผ่านฝุ่นไปยังถุงกรองเพื่อกำจัดฝุ่น
2. ควบคุมไม่ให้ฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดออกไปสู่ชุมชนหรือภายนอกโรงโม่หิน เช่น การหาวัสดุมาคลุมบริเวณที่เกิดฝุ่น การสร้างอาคารโรงโม่หินที่ปิดมิดชิด การล้อมรั้วสูงทึบรอบโรงโม่หิน และการปลูกต้นไม้รอบโรงงาน และปลูก หญ้า หรือพืชคลุมดิน ในบริเวณที่ว่างรอบๆ โรงโม่หิน เป็นต้น
3. ควบคุมเพื่อลดโอกาสที่ฝุ่นละอองจะสัมผัส หรือเข้าสู่ระบบหายใจของคนงาน และประชาชนในบริเวณใกล้เคียง เช่น การสร้างห้องทำงานที่ปิดมิดชิด คนงานไม่ต้องเข้าไปทำงานสัมผัสกับฝุ่น การสวมหน้ากากป้องกัน เป็นต้น

การกำจัด การควบคุม หรือการลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองจากกระบวนการผลิตภายในโรงโม่หินมีหลายวิธีที่ประยุกต์ใช้ในการควบคุมฝุ่นจากโรงโม่หินซึ่งก็มีข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธี แต่ระบบที่มีการใช้กันอยู่มากและมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ สามารถจำแนกใหญ่ๆ ได้ 2 วิธี

1. ระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก โดยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำเหนือแหล่งกำเนิดฝุ่น
2. ระบบดูด ท่อส่งฝุ่นและรวบรวมฝุ่น ซึ่งระบบกำจัดฝุ่นในระบบนี้ยังสามารถจำแนกตามระบบรวบรวมฝุ่นออกได้เป็น 2 วิธี
   - ระบบรวบรวมฝุ่นโดยใช้ถุงกรอง
   - ระบบรวบรวมฝุ่นโดยการใช้หอสเปรย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบควบคุมฝุ่นแต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียเมื่อประยุกต์ใช้กับโรงโม่หิน ดังนี้คือ [2]

- **ระบบควบคุมฝุ่นโดยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำ**

ข้อดี

1) ระบบมีโครงสร้างที่ง่ายๆ ใช้เงินลงทุนน้อย
2) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ
3) สามารถประกอบและติดตั้งได้ง่าย
4) การบำรุงรักษาได้ง่าย

ข้อเสีย

1) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นแปรเปลี่ยนได้มาก ขึ้นกับขนาดฝุ่นละอองและชนิดของหัวฉีดที่เลือกใช้
2) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นละเอียดไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นระบบเปิดและได้ผลกระทบจากกระแสลมจากสิ่งแวดล้อม
3) มีปัญหาการอุดตันของหัวฉีดถ้าน้ำมีคุณภาพต่ำ
4) อาจก่อให้เกิดการเกาะติดของผงหิน และการอุดตันบางส่วนบนตะแกรงคัดขนาด
5) ละอองน้ำและอากาศที่มีความชื้นสูง อาจนำไปสู่ปัญหาการผุกร่อนของเครื่องจักรและการรั่วของไฟฟ้า และหากใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปอาจทำให้มีน้ำขังบริเวณโดยรอบ
6) ไม่เหมาะกับโรงงานที่ขาดแคลนน้ำหรือมีน้ำบาดาลคุณภาพต่ำมาก

- **ระบบควบคุมฝุ่นแบบถุงกรอง**

ข้อดี

1) ประสิทธิภาพในการจับฝุ่นสูงกว่า 95-99% แม้ว่าจะเป็นฝุ่นละเอียด
2) ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำช่วย
3) เหมาะกับการกรองฝุ่นจากลมปริมาณที่ค่อนข้างมากซึ่งมีความเข้มข้นของฝุ่นในระดับต่ำถึงปานกลาง

ข้อเสีย

1) มักต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์ดูดและรวบรวมฝุ่น (Hood)
2) ต้องการเงินลงทุนค่อนข้างสูง
3) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบดูดรวบรวมฝุ่นค่อนข้างสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างสูง
5) ต้องติดตามการทำงานของถุงกรอง โดยสังเกตจากผลต่างความดันคร่อมทั้งสองฝั่งของระบบกรอง เพื่อทราบปัญหาการรั่วเสียหายของถุง
6) ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งพอสมควร

- **ระบบควบคุมฝุ่นแบบหอสเปรย์**

ข้อดี

1) มีประสิทธิภาพในการจับฝุ่นค่อนข้างสูง แต่ต่ำกว่าระบบถุงกรอง
2) เหมาะกับการเก็บฝุ่นจากลมในปริมาณน้อยถึงปานกลาง
3) โครงสร้างง่าย ราคาประหยัด
4) การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยากเหมือนระบบถุงกรอง
5) เงินลงทุนไม่สูง (เมื่อไม่คิดรวมระบบดูดรวบรวมฝุ่น)

ข้อเสีย

1) มักต้องใช้ร่วมกับระบบดูดรวบรวมฝุ่น
2) ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งปานกลาง (น้อยกว่าระบบถุงกรอง)
3) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบดูดรวบรวมฝุ่นค่อนข้างสูง (น้อยกว่าระบบถุงกรอง แต่สูงกว่าระบบฉีดพ่นหยดละอองน้ำ)
4) ไม่เหมาะกับโรงงานที่ขาดแคลนน้ำ หรือที่มีน้ำบาดาลคุณภาพต่ำมาก
5) ลมที่ปล่อยออกมาหากมีความชื้นสูงอาจก่อให้เกิดปัญหาการผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการควบคุมปัญหามลภาวะอากาศจากโรงโม่หินไม่สามารถหาคำตอบที่ตายตัวได้โดยง่าย หรือรวดเร็ว ในกรณีที่จำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบของการกำจัดฝุ่นในแต่ละโรงงานอันได้แก่

- วัตถุดิบที่ใช้
- ชนิดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้
- แผนผังและขนาดโรงงาน
- กำลังการผลิต
- สภาพท้องถิ่น
- กฎหมาย และการบังคับควบคุมมลภาวะอากาศ

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์อย่างระมัดระวังเพื่อให้ระบบกำจัดฝุ่นมีประสิทธิภาพสูงสุดและมีต้นทุนต่ำสุด

ข้อแนะนำในการกำจัดฝุ่นในบางจุด [4]

- **จุดเทหิน**

  เพราะจุดเทหินมีขนาดใหญ่มาก มีรถขนาดใหญ่เข้าออก และจะต้องเทหินเข้าสู่ปากโม่ขั้นต้น ดังนั้นการใช้ระบบดูด และรวบรวมฝุ่นไม่สามารถกระทำให้ปกคลุมพื้นที่กำเนิดฝุ่นทั้งหมดได้ ในกรณีนี้จะใช้น้ำทำให้หินเปียกเพื่อควบคุมฝุ่น

- **เครื่องโม่ขั้นที่สองหรือปากซอย**

  โดยทั่วไปสามารถที่จะปิดคลุม (Enclosure) ทั้งหมดและระบายอากาศโดยผ่านระบบดูดและรวบรวมฝุ่น เช่น ระบบถุงกรอง สามารถใช้ได้จะรวมทั้งจุดที่หินตกสู่สายพานด้วย

- **ตะแกรงคัดขนาดและบริเวณจุดถ่ายโอนหิน**

  โดยทั่วไปฝุ่นที่ปล่อยออกจากทั้งสองจุดสามารถถูกปิดคลุมทั้งหมดและดูดไปยังถุงกรองได้

- **กองหิน**

  ฝุ่นจากกองหินโดยทั่วไปไม่สามารถปิดคลุมได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการฉีดพ่นหยดละอองน้ำทำให้หินเปียก การพิจารณาว่าหินมีความชื้นเพียงพอหรือไม่อาจมองได้โดยใช้สายตา บริเวณจุดที่หินตกกระทบลงบนกองหินถ้าวัสดุแห้งและประกอบด้วย (Silt) ถูกปล่อยลงสู่กองหิน ฝุ่นจำนวนมากจะถูกปล่อยออกมา โดยเฉพาะเมื่อมีลมพัดผ่าน ฝุ่นจะเกิดการฟุ้งกระจาย วิธีอื่นในการลดฝุ่นในจุดนี้ คือ การลดความสูงของจุดปล่อยหินให้ใกล้กองหินที่สุด หรือใช้บันไดหิน

รายละเอียดแหล่งปล่อยฝุ่นและการควบคุมฝุ่นแสดงในตารางที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 *แหล่งปล่อยฝุ่นและการควบคุมฝุ่นของโรงโม่หิน [4]*

แหล่งปล่อยฝุ่น	การควบคุม
รถบรรทุกหินมายังโรงโม่หิน (Hauling)	การทำให้ถนนเปียกด้วยน้ำ การราดถนนด้วยสารลดแรงตึงผิว การปรับสภาพดินให้มั่นคง (soil stabilization) การราดด้วยวัสดุคลุมผิวหน้าถนน การควบคุมจราจร
การโม่	การกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำ การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
ตะแกรง	การกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำ การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
สายพานลำเลียง (จุดถ่ายโอน)	การกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำ การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
กองหิน	บันไดหิน (stone ladder) สายพานกองหิน (stacker conveyor) ฉีดหยดละอองน้ำที่จุดปล่อยหินจากสายพาน
ยุ้งเก็บ (storage bin)	การดูดจับและรวบรวมฝุ่น
สายพานจุดอื่นๆ	วัสดุปิดคลุม การกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดพ่นหยดละอองน้ำ
ลมพัดกองหิน	การทำให้เปียกด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิว การปิดคลุม (ไซโล, ยุ้ง อื่นๆ) ตัวกันลม
ลมพัดฝุ่นบนถนนและพื้นที่โรงงาน	การทำให้เปียกด้วยน้ำ การใช้น้ำมัน (oiling) สารลดแรงตึงผิว การทำให้ดินมั่นคง การราดด้วยวัสดุคลุมผิวหน้าถนน การกวาด
การบรรทุกใส่รถ	การทำให้เปียก การดูดจับและรวบรวมฝุ่น

บทที่ 4

ระบบกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ

การกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำเป็นการใช้ของเหลวในการควบคุม ลด และกำจัดฝุ่นที่ลอยอยู่ในอากาศ (Airborne Dust) หรือกำจัดฝุ่นที่แหล่งกำเนิดโดยตรง โดยกระบวนการเกี่ยวข้องมีดังนี้ [4]

1. การกักขัง (Confinement) ฝุ่นที่เกิดขึ้นเหนือบริเวณพื้นที่กำเนิดฝุ่นด้วยม่านความชื้น (Curtain of Moisture)
2. การทำให้ฝุ่นเปียกโดยการสัมผัสโดยตรงระหว่างอนุภาคฝุ่นและหยดละอองน้ำ
3. การเกิดการจับเป็นกลุ่มก้อน (Formation of Agglomerate) ที่หนักเกินกว่าจะลอยในอากาศ หรือหนักเกินไปที่จะกลายเป็นฝุ่นที่ลอยในอากาศ โดยการผสมกันระหว่างอนุภาคฝุ่นด้วยกันเองและหยดละอองน้ำ

ระบบกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำเป็นวิธีการให้ความชื้นโดยใช้น้ำแก่ฝุ่นผงที่เกิดขึ้น เมื่อฝุ่นผงมีความชื้นสูงเกินกว่าระดับหนึ่งก็จะไม่สามารถฟุ้งกระจายได้ เนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างเม็ดอนุภาคจะเพิ่มแรงเกาะติดระหว่างอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดใหญ่หลายสิบไมครอนจะมีความเร็วตกตัวบั้นปลาย (Terminal Settling Velocity) ในอากาศถึงหลายสิบเซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้จึงตกลงถึงพื้นดินหรือพื้นด้านล่างในเวลาอันสั้น แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2-3 ไมครอนจะมีความเร็วตกตัวบั้นปลายในอากาศช้ามาก การฉีดละอองน้ำขนาดเล็กจำนวนมากจะทำให้อนุภาคฝุ่นมีโอกาสที่จะชนและถูกจับโดยหยดน้ำเพิ่มมากขึ้น หยดน้ำที่จับฝุ่นไว้จะตกลงถึงพื้นที่ความเร็วตกตัวบั้นปลายของหยดน้ำ

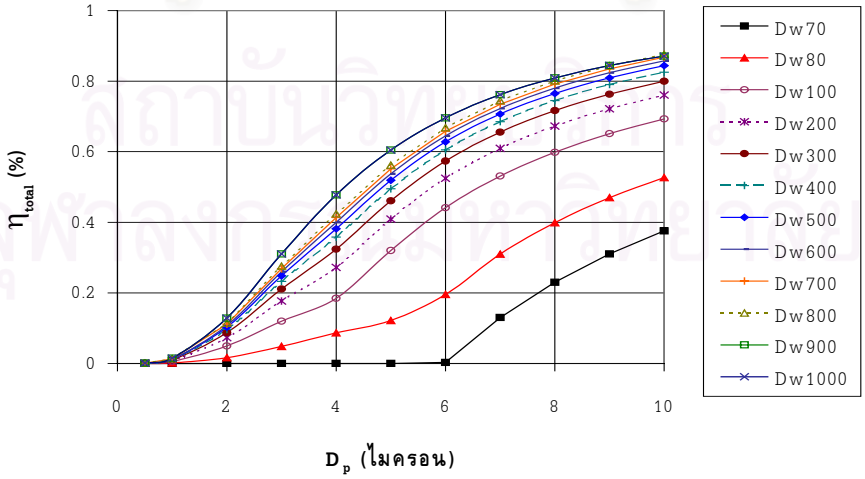
ระบบกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำเป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดในโรงโม่หินทั่วโลก [3] แม้ว่าการฉีดละอองน้ำอาจใช้ได้เฉพาะบางจุดและกับอุปกรณ์บางตัวในโรงโม่หินก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำเป็นระบบที่ง่าย ลงทุนน้อย ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำ สามารถติดตั้งและบำรุงรักษาได้เองโดยไม่ยุ่งยาก และนอกจากจะช่วยกำจัดฝุ่นได้โดยตรงโดยการกระทำของละอองน้ำที่ฉีดแล้ว ยังช่วยป้องกันการเกิดฝุ่นในกระบวนการที่เกิดในภายหลังโดยการเพิ่มความชื้นให้กับวัสดุด้วย

4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ

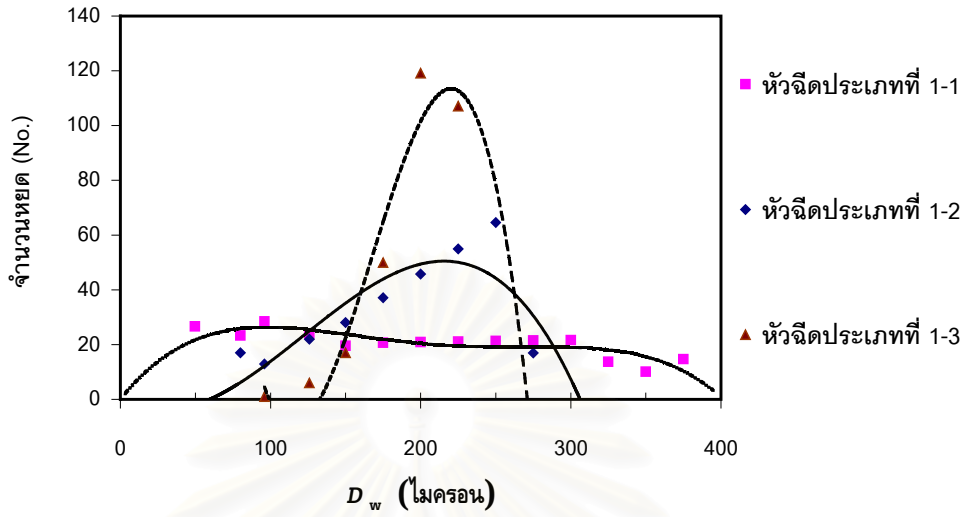
ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการอาทิเช่น

1. ชนิดของหัวฉีด
2. ความเข้มข้นของฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย
3. ขนาดของฝุ่น
4. ลักษณะขนาดและทิศทางของลมที่พัดผ่าน

จากตัวแปรดังกล่าวทั้งสี่นี้ จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรเพียงตัวเดียวที่สามารถควบคุมเพื่อกำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นได้นั่น คือ *ชนิดของหัวฉีด* จากการศึกษาของสุชาดา [6] ซึ่งได้ทำการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกำจัดฝุ่นในที่เปิดโล่งด้วยการฉีดละอองน้ำ และประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ โดยใช้แบบจำลองดังกล่าว พบว่า ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น โดยขนาดของหยดละอองน้ำควรมีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่ต้องการกำจัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อพิจารณาผลของการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีการกระจายขนาดที่แตกต่างกันแต่มีขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำเท่ากัน ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่มีรูปแบบในการกระจายขนาดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า หัวฉีดที่สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือมีการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำแคบ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูงกว่าหัวฉีดที่มีการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนั้นแล้วหัวฉีดที่ใช้ควรมีพื้นที่ในการฉีดพ่นที่กว้างด้วย เพื่อครอบคลุมพื้นที่ในการกำจัดฝุ่นให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 4.1 *แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ (η_{total}) กับขนาดของอนุภาคฝุ่น(D_p) และหยดละอองน้ำ (D_w) [6]*



รูปที่ 4.2 *แสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดประเภทที่ 1-1, 1-2 และ 1-3 ซึ่งขนาดเฉลี่ยของหยดละอองเท่ากับ 193.14 ไมครอน [6]*

ตารางที่ 4.1 *แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมการจับฝุ่นด้วยการฉีดหยดละอองน้ำ (η_{total}) เมื่อใช้หัวฉีดประเภทที่ 1-1, 1-2 และ 1-3 การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-1, ก-2 และ ก-3 [6]*

หัวฉีด / อนุภาค	η_{total} (%)		
	ประเภทที่ 1-1	ประเภทที่ 1-2	ประเภทที่ 1-3
รูปแบบ ก-1	19.65	21.12	21.45
รูปแบบ ก-2	21.31	22.83	23.16
รูปแบบ ก-3	22.02	23.35	23.85

หมายเหตุ - **การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-1** เป็นกรณีอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก (< 5 ไมครอน) มีความเข้มข้นมากกว่าการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-2 และ ก-3 แต่อนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ (> 7 ไมครอน) มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยค่า σ = 1.55

- **การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-2** เป็นกรณีอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ (> 7 ไมครอน) มีความเข้มข้นมากกว่าการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-1 และค่า σ = 1.27

- **การกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-3** อนุภาคฝุ่นมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยค่า σ = 1.11 และไม่พบอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กๆ (0.5 – 1 ไมครอน) ส่วนอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ (> 7 ไมครอน) มีความเข้มข้นมากกว่า เมื่อเทียบกับการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นรูปแบบ ก-1 และ ก-2

ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ หัวฉีดที่เลือกใช้ควรมีลักษณะสรุปได้ดังนี้

1. สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของละอองน้ำให้อยู่ในช่วงขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่ต้องการกำจัด เนื่องจากถ้าขนาดของหยดละอองน้ำใหญ่เกินไป ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลอ้อมรอบละอองน้ำไปได้โดยไม่มีการสัมผัสซึ่งกันและกัน แต่ถ้าขนาดของหยดละอองน้ำเล็กเกินไป การไหลของฝุ่นจะผลักไล่ละอองน้ำโดยไม่ได้ทำให้ฝุ่นเปียกแต่อย่างใด
2. สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงแคบ เนื่องจากกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่กว้างจะมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น
3. มีพื้นที่ในการฉีดพ่นกว้าง เพื่อทำให้พื้นที่ที่หยดละอองน้ำสามารถครอบคลุมแหล่งกำเนิดฝุ่นมีมากขึ้น
4. รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดควรมีลักษณะเป็นกรวยเต็ม (full cone) เพื่อทำให้ฝุ่นและหยดละอองน้ำมีโอกาสที่จะสัมผัสกันมากขึ้นและทั่วถึงกัน

นอกจากนั้นแล้ว สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้หัวฉีด คือ 1) ควรเป็นหัวฉีดที่มีการใช้น้ำปริมาณน้อยโดยยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูง เนื่องจากการใช้น้ำปริมาณมากส่งผลเสียหลายประการ อาทิเช่น คุณภาพและสีของหิน, อาจก่อให้เกิดปัญหาทางเชิงกลเกี่ยวกับลูกปืนและจารบี, หินที่เปียกน้ำที่มีความคมกลิ้งอยู่เหนือสายพานจะทำให้สายพานเป็นรอยและอาจขาดได้ในเวลาอันสั้น, เกิดโคลนติดตามเครื่องมือและพื้นของโรงงานก่อความรำคาญให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน และยังก่อปัญหากับพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำน้อยอีกด้วย 2) ไม่เกิดปัญหาเรื่องอุดตัน 3) ใช้พลังงานน้อย 4) มีต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา บำรุงรักษาง่าย สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อการใช้งานได้สะดวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ชนิดของหัวฉีดละออง

หัวฉีดมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมีกลไกการทำงานและข้อดีแตกต่างกันออกไป เช่น ความอิสระจากการอุดตัน (Freedom from Plugging) รูปแบบการพ่น (Pattern of Spray) การกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ถูกพ่นออกจากหัวฉีดและปริมาณพลังงานที่ใช้ เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของหัวฉีดตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้คือ

4.2.1 หัวฉีดแบบใช้ความดัน (Pressure Nozzles)

หลักการทำงานของหัวฉีดชนิดนี้ คือ การเปลี่ยนความดันให้เป็นพลังงานการเคลื่อนไหว เพื่อทำให้เกิดความเร็วสูงระหว่างของเหลวและก๊าซที่อยู่รอบๆ หัวฉีดแบบใช้ความดันสามารถแบ่งหลายชนิด เช่น หัวฉีดแบบ Simplex หัวฉีดแบบใบพัด (Fan Spray Nozzles) หัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหล (Wide-Range Nozzles) แต่ละชนิดมีลักษณะการทำงานดังนี้

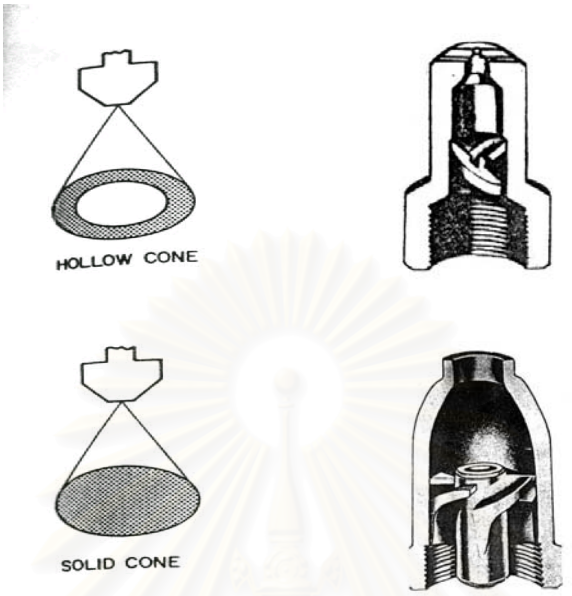
4.2.1.1 หัวฉีดแบบ simplex

เป็นหัวฉีดที่อาศัยการอัดตัวของของเหลวให้มีความดันแล้วฉีดออกจากท่อที่ไหลวนหรือหมุนเป็นรูปของแผ่นกรวย (Conical Sheet) ออกมาจากหัวฉีด มีมุมของการฉีดพ่นกว้างกว่าหัวฉีดแบบท่อธรรมดา หัวฉีดแบบ simplex สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการฉีดพ่นที่ได้คือ

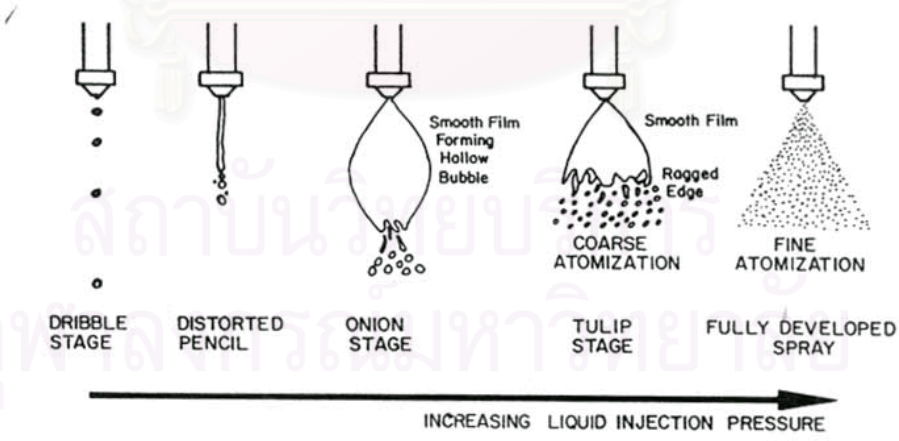
1. หัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยเต็ม (Solid Cone Spray) รูปแบบของการฉีดพ่นจะมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ขนาดของอนุภาคที่ได้ตรงกลางกรวยจะมีขนาดใหญ่กว่าตรงขอบนอก

2. หัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยแบบกลวงข้างใน (Hollow Cone Spray) รูปแบบของการฉีดพ่นจะมีความหนาแน่นที่บริเวณขอบของกรวย

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะและรูปแบบของการสเปรย์ของหัวฉีดทั้ง 2 ชนิด จุดด้อยของหัวฉีดแบบนี้ก็คือรูปแบบของการสเปรย์จะแปรเปลี่ยนตามความดัน ลักษณะของการสเปรย์ที่ได้จึงไม่แน่นอน รูปที่4.4 แสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่ศูนย์จนถึงความดันที่ทำให้เกิดการสเปรย์ที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.3 *แสดงลักษณะและรูปแบบของการสเปรย์ของหัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยแบบกลวงข้างใน (Hollow Cone Spray) และ หัวฉีดหัวฉีดที่มีการฉีดพ่นออกมาเป็นรูปทรงกรวยเต็ม (Solid Cone Spray)*



รูปที่ 4.4 *แสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น*

4.2.1.2 หัวฉีดแบบใบพัด (Fan Spray Nozzles)

เป็นหัวฉีดที่อาศัยการอัดตัวของของเหลวให้มีความดัน แล้วฉีดออกมาเป็นรูปแผ่นแบน กว้าง มีลักษณะคล้ายพัด ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จะหยาบ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ รูปแบบของการสเปรย์จะมีมุมเท่ากับ 120° หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหัวฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของการสเปรย์เป็นรูปพัดจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.5(a) และ 4.5(b) แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบใบพัดแบบต่างๆ หัวฉีดที่แสดงในรูปที่ 4.5(b) รูทางออกของของเหลวจะบากเป็นรูปตัววีเชื่อมติดกับท่อส่งของเหลวที่ส่วนปลายของหัวฉีด ทำให้เกิดการฉีดพ่นที่มีลักษณะเป็นแผ่นของของเหลวขนานกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทางออกของของเหลว หัวฉีดชนิดนี้เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง สเปรย์ที่ได้มีลักษณะเป็นรูปไข่แคบ และมีขอบที่เรียวเล็ก

(a) (b)

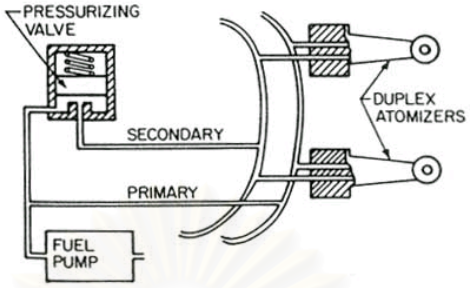
<u>รูปที่ 4.5</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบใบพัด (Fan Spray Nozzles)*

4.2.1.3 หัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหล (Wide-Range Nozzles)

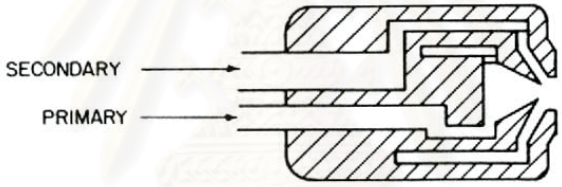
หัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลมีการผลิตขึ้นมาหลายชนิด แต่จุดประสงค์ในการผลิตจะคล้ายคลึงกัน คือต้องการให้เกิดการสเปรย์ได้ดี ในทุกช่วงของอัตราการไหลที่ส่งมายังหัวฉีดโดยใช้ปั๊มอัดความดัน (Air compressor) หัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลสามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

1. Duplex เป็นหัวฉีดที่ออกแบบให้ใช้ได้กับของเหลวที่มีแรงดันสูงและมีแรงดันต่ำ โดยจะแบ่งท่อส่งของเหลวออกเป็น 2 ส่วน มีวาล์ววัดความดัน (Pressuring Valve) เป็นตัวควบคุมการปิด - เปิดของท่อส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ลักษณะการทำงาน คือ ของเหลวจะถูกส่งมายังส่วนที่ไหลวนปฐมภูมิ (Primary Swirl Port) โดยที่วาล์ววัดความดันยังไม่เปิด วาล์ววัดความดันจะเปิดก็ต่อเมื่อของเหลวมีแรงดันเกินขีดจำกัดของวาล์ว เมื่อวาล์วเปิดของเหลวจะไหลไปได้ทั้งในส่วนที่ไหลวนปฐมภูมิ (Primary Swirl Port) และส่วนที่ไหลวนทุติยภูมิ (Secondary Swirl Port)

2. Dual orifice มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบไปด้วยหัวฉีด 2 หัวที่วางอยู่ในแนวเดียวกัน โดยวางหัวฉีดปฐมภูมิไว้ด้านในและจัดทิศทางการสเปรย์ของหัวฉีดปฐมภูมิไม่ให้ขัดขวางทิศทางการสเปรย์ของหัวฉีดทุติยภูมิ มีหลักการทำงานคล้ายกับหัวฉีดแบบ Duplex



รูปที่ 4.6 *ลักษณะของหัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลชนิดที่เป็น Duplex*



รูปที่ 4.7 *ลักษณะของหัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหลชนิดที่เป็น Dual orifice*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

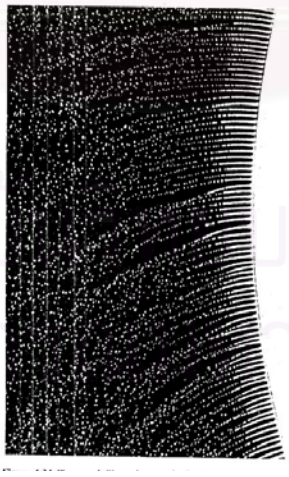
4.2.2 หัวฉีดแบบจานหมุน (Rotary Nozzles)

การทำงานของหัวฉีดแบบจานหมุนนั้น ของเหลวจะถูกป้อนเข้าไปในบริเวณใจกลางของจานที่กำลังหมุนด้วยความเร็วสูง และกระจายตัวเป็นละอองที่บริเวณรอบๆจานหมุนอย่างสม่ำเสมอด้วยแรงหนีศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 รูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่หมุนมีหลายแบบด้วยกัน เช่น แบบจานแบน แบบถ้วย และแบบถังที่เป็นร่อง หัวฉีดแบบนี้มีความสามารถพิเศษในการฉีดพ่นของเหลวทั้งที่มีความหนืดสูงและมีความหนืดต่ำได้ดี สิ่งสำคัญในการควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มของของเหลว ซึ่งมีผลต่อขนาดของหยดละอองที่ออกมาอย่างสม่ำเสมอนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของของเหลวและความเร็วในการหมุนของหัวฉีด โดยปรกติเราสามารถปรับปรุงคุณภาพของการฉีดพ่นได้โดย

1. การเพิ่มความเร็วของการหมุน
2. ลดอัตราการไหลของของเหลว
3. ลดความหนืดของของเหลว
4. ลักษณะของขอบฟันปลาที่อยู่ด้านนอก

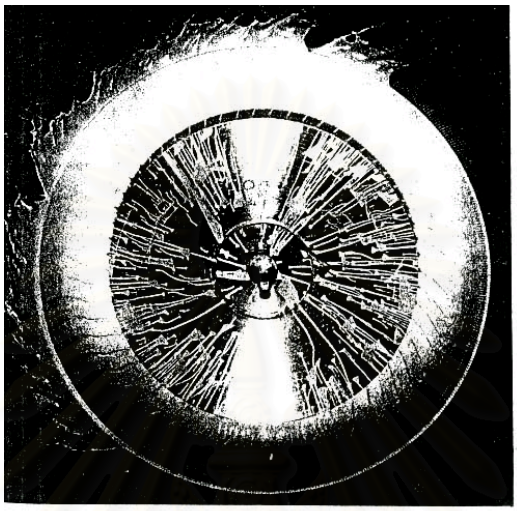
อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะให้ได้ความหนาของฟิล์มของของเหลว และขนาดของหยดละอองที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น ควรจะมีสภาวะการทำงานดังต่อไปนี้

1. แรงหนีศูนย์กลางควรจะมากกว่าแรงโน้มถ่วง
2. การหมุนควรจะปราศจากการสั่น
3. อัตราการไหลของของเหลวควรจะคงที่
4. พื้นผิวของจานหมุนควรจะเรียบ

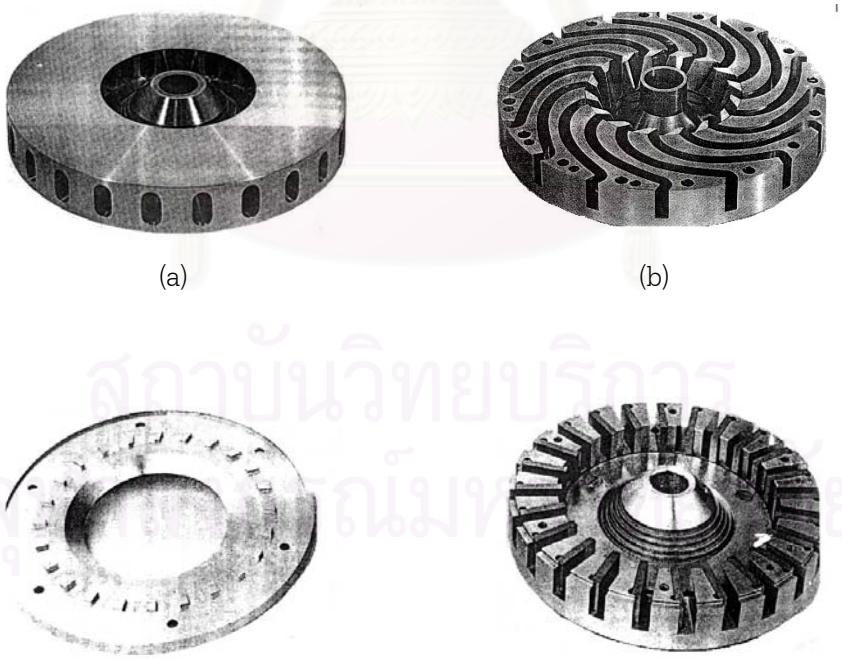


<u>รูปที่ 4.8</u> *แสดงกลไกการเกิดการฉีดพ่นที่เกิดจากหัวฉีดแบบจานหมุน*

ปัญหาหลักของหัวฉีดแบบจานหมุนก็คือ การเลื่อนไหลของของเหลวที่อยู่บนจานหมุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการหมุนสูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ได้มีการคิดค้นลักษณะของหัวฉีดขึ้นมาใหม่เพื่อลดปัญหานี้ โดยใช้จานหมุนแบบ Radial vanes และได้มีการคิดค้นพัฒนาหัวฉีดชนิดนี้ให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 *แสดงการเกิดการเลื่อนไถลของของเหลว*



รูปที่ 4.10 *แสดงลักษณะของจานหมุนชนิดต่างๆ*

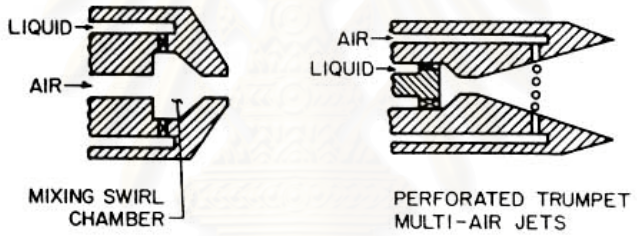
4.2.3 Air-Assist Atomizer

การทำงานของหัวฉีดชนิดนี้จะแบ่งสายของอากาศและสายของของเหลวออกจากกัน โดยจะใช้อากาศที่มีความเร็วสูงพุ่งมากระทบของเหลวที่มีความเร็วต่ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดผสมภายใน (Internal-Mixing) และ ชนิดผสมภายนอก (External-Mixing) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

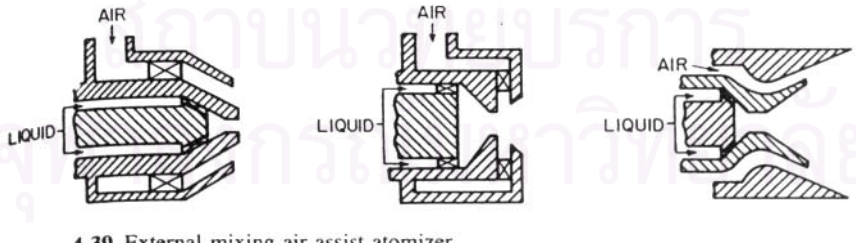
1. หัวฉีดชนิดผสมภายใน (Internal-Mixing) มุมของการพ่นจะต่ำที่สุดเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงที่สุด และมุมของการพ่นจะกว้างขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำลง หัวฉีดชนิดนี้เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูง และเกิดการฉีดพ่นได้ดีเมื่ออัตราการไหลของของเหลวต่ำลง

2. หัวฉีดชนิดผสมภายนอก (External-Mixing) สามารถออกแบบให้มุมของการฉีดพ่นมีค่าคงที่ที่อัตราการไหลของของเหลวต่างๆ

อย่างไรก็ตามการที่จะให้หัวฉีดแบบนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีนั้น จำเป็นต้องใช้แรงดันของอากาศสูง จึงเหมาะกับการใช้งานในโรงงานขนาดใหญ่



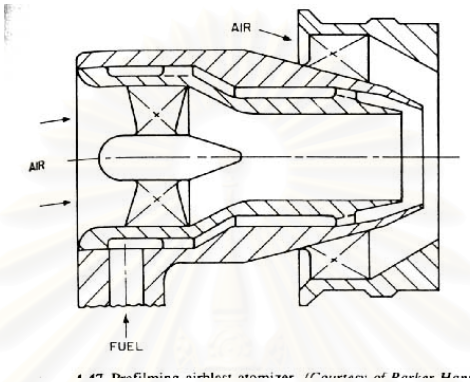
รูปที่ 4.11 *หัวฉีดชนิดผสมภายใน (Internal-Mixing)*



รูปที่ 4.12 *หัวฉีดชนิดผสมภายนอก (External-Mixing)*

4.2.4 หัวฉีดแบบพ่นลม (Airblast Atomizer)

โดยหลักการแล้วหัวฉีดแบบพ่นลมจะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับหัวฉีดแบบ Air-Assist คือ หัวฉีดทั้ง 2 ชนิดจะใช้อากาศที่มีความเร็วสูงมากระทบกับของเหลวเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวเป็นละออง แต่สิ่งที่แตกต่างกันก็คือ ปริมาณอากาศที่ใช้ และอัตราเร็วในการฉีดพ่น ซึ่งหัวฉีดแบบพ่นลมจะมีข้อจำกัดทางด้านของความเร็วสูงสุดของอากาศที่ใช้ (ประมาณ 120 เมตรต่อวินาที)



<u>รูปที่ 4.13</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบพ่นลม(Airblast Atomizer)*

4.2.5 หัวฉีดแบบใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrostatic Atomizers)

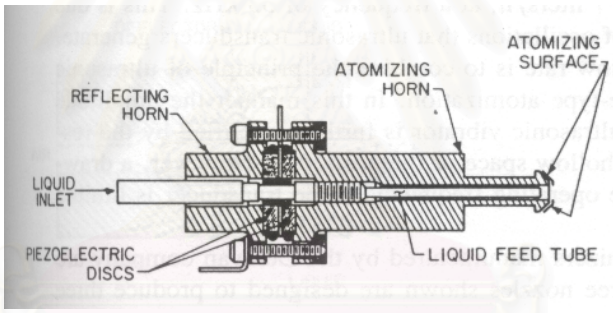
ปัจจัยพื้นฐานสำหรับการฉีดพ่นของของเหลว คือ การทำให้ผิวหน้าของของเหลวเกิดการไม่เสถียรจนเริ่มแตกตัวออกเป็นสายของของเหลว และแตกตัวออกเป็นหยดในที่สุด ในหัวฉีดแบบใช้ไฟฟ้า พลังงานที่ทำให้ของเหลวที่อยู่ที่ผิวของหัวฉีดแตกออกไปได้นั้น มาจากพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดแล้วถ่ายทอดไปยังบริเวณผิวหน้าของของเหลว โดยแรงดันทางไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการขยายตัวของพื้นผิวของของเหลว ในขณะที่แรงตึงผิวจะพยายามทำให้พื้นผิวของของเหลวเกิดการหดตัว ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงตึงผิว พื้นผิวของของเหลวจะเริ่มไม่เสถียร และเกิดการแตกตัวเป็นหยดละออง การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะมีผลทำให้หยดละอองน้ำที่ได้มีขนาดเล็กลง หัวฉีดชนิดนี้ยังสามารถฉีดพ่นได้ที่อัตราการไหลของเหลวสูง

4.2.6 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Atomizer)

ใช้หลักการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง เพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ปลายทางออกของหัวฉีด เมื่อของเหลวถูกส่งมาสัมผัสกับบริเวณที่มีความถี่สูงนี้ก็จะเกิดการแตกเป็นละอองขนาดเล็กจำนวนมากอย่างรวดเร็ว รูปที่ 4.14 แสดงรูปแบบหนึ่งของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ข้อดีของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงก็คือ

1. สามารถฉีดพ่นของเหลวได้โดยไม่ต้องอาศัยแรงดันน้ำสูงหรือความเร็วของก๊าซสูง
2. สามารถฉีดพ่นได้ดีแม้ว่าอัตราการไหลของของเหลวจะต่ำ
3. ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน
4. สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้
5. ใช้น้ำน้อย

จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ถ้าสามารถออกแบบให้หัวฉีดสามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติจะเป็นประโยชน์อย่างมาก



<u>รูปที่ 4.14</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ตารางที่ 4.2</u> *ตารางสรุปลักษณะของหัวฉีด*

ชนิดหัวฉีด	ข้อดี	ข้อเสีย
<u>หัวฉีดความดัน</u>		
(Pressure Nozzle)		
1. หัวฉีดแบบ Simplex		- รูปแบบการสเปรย์จะเปลี่ยนตามความดันของของเหลว
1.1 กรวยเต็ม (Solid Cone)	- รูปแบบการพ่นสม่ำเสมอกว่าแบบโคนกลวง	- ละอองหยาบ - ของเหลวต่างชนิดมีผลต่อรูปแบบการพ่น
1.2 กรวยกลวง (Hollow Cone)	- ประสิทธิภาพของการเกิดละอองสูง	- หยดละอองน้ำจะหนาแน่นบริเวณขอบกรวย
2. หัวฉีดแบบใบพัด (Fan or Flat Spray)	- เหมาะสำหรับการเคลือบผิวโดยการฉีดพ่น - การกระจายตัวของของเหลวจะสม่ำเสมอ - ใช้ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง	- ละอองหยาบ - ต้องพิจารณาการตั้งศูนย์ลำของไหลเป็นพิเศษ
3. หัวฉีดแบบปรับช่วงอัตราการไหล (Nozzle with Wider Range of Turndown)	- ใช้ได้ดีในช่วงอัตราการไหลที่กว้าง	
3.1 Duplex		- ที่ความดันสูง มุมของการสเปรย์ลดลง
3.2 Dual Orifice		- ต้องระวังเรื่องการจัดตำแหน่งของหัวฉีดที่ 1 และหัวฉีดที่ 2
<u>หัวฉีดแบบจานหมุน</u> *(Rotary device)*	- ขนาดของหยดละอองไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก แม้ว่าปริมาณของเหลวที่ป้อนจะแปรเปลี่ยน - สามารถสเปรย์ของเหลวที่มีความหนืดสูง	- ความซับซ้อนทางกลไกของอุปกรณ์การหมุน - อาจเกิดการเลื่อนไถลระหว่างของเหลวและจานหมุน
<u>Air-Assist Atomizer</u>		- ใช้แรงดันอากาศสูง
1. หัวฉีดแบบผสมภายใน (Internal Mixing)	- ใช้ได้กับของเหลวความหนืดสูง - ใช้ได้ดีกับของเหลวที่อัตราการไหลต่ำ	- มุมของการสเปรย์จะลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น
2. หัวฉีดแบบผสมภายนอก (External Mixing)	- มุมของการสเปรย์จะคงที่ทุกอัตราการไหล - ไม่เกิดการอุดตันของของเหลว	

ตารางที่ 4.2 *(ต่อ)*

ชนิดหัวฉีด	ข้อดี	ข้อเสีย
หัวฉีดแบบพ่นลม (Airblast Atomizer)	- ใช้ความดันอากาศต่ำแต่ให้การสเปรย์ได้แรง - การผสมของของเหลวกับอากาศเข้ากันได้ดี	
หัวฉีดแบบใช้พลังงานไฟฟ้า (Electrostatic Atomizer)	- ทนต่ออัตราการไหลที่สูงของของเหลวได้ - ขนาดของหยดละอองที่ได้จากการสเปรย์มีขนาดเล็ก	- ใช้พลังงานสูง
หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Atomizer)	- ใช้อัตราของไหลของของเหลวต่ำ - ขนาดของหยดที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน - ขนาดของหยดละอองที่ได้มีขนาดเล็ก - ไม่เกิดการอุดตัน	- ไม่สามารถใช้กับอัตราการไหลที่สูงมากๆได้

4.3 วิธีการวัดหยดละออง

เนื่องจากการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้ระบบฉีดละอองจะต้องเลือกหัวฉีดที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองให้เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นและสภาวะในการทำงาน ดังนั้นการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อทราบถึงขนาดของหยดละอองที่หัวฉีดนั้นสามารถผลิตได้ วิธีที่ใช้วัดขนาดของหยดละอองมีหลายวิธีด้วยกัน สามารถแบ่งเป็น 3 วิธี คือ [16]

1. **วิธีทางกล (Mechanical)**
   - การจับตัวอย่างของหยดละอองไว้บนสไลด์หรือในเซลล์ (Drop collection on slides or in cells)
   - เทคนิคการหลอมขี้ผึ้ง และ เทคนิคการทำให้หยดแข็ง (Molten-wax and frozen-drop techniques)
   - Cascade impactors
2. **วิธีทางไฟฟ้า (Electrical)**
   - เทคนิคการใช้ลวดประจุและเทคนิคการใช้ลวดร้อน (Charged-wire and hot-wire techniques)
3. **วิธีทางทัศนศาสตร์ (Optical)**
   - Imaging เช่น เทคนิคการถ่ายภาพ (Photography), เทคนิคการถ่ายภาพ 3 มิติ (Holography)
   - Non-imaging เช่น การใช้หลักการกระเจิงแสง (Light Scattering), การใช้เครื่อง Malvern Particle Analyzer

4.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดขนาดของหยดละอองน้ำ [16]

ในการออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดขนาดของหยดละอองน้ำมีจุดมุ่งหมายที่จะวัดขนาดของหยดละอองน้ำให้มีความแม่นยำมากที่สุด แต่ในความเป็นจริงแล้วทุก เทคนิคที่ใช้ในการวัดขนาดของหยดละอองน้ำนั้นยังมีความผิดพลาดและความไม่แม่นยำอยู่ ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากสมมติฐานที่ใช้ วิธีการที่ใช้ และคุณภาพของข้อมูลที่ได้มา ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการวัดขนาดของหยดละอองมีดังนี้

1. ขนาดของตัวอย่าง (Sample Size)

หยดละอองที่มีขนาดใหญ่จะมีอิทธิพลอย่างมากในการหาขนาดเฉลี่ยของหยดที่ได้จากการสเปรย์ แม้ว่าในสเปรย์นั้นจะมีขนาดใหญ่เพียงเล็กน้อยก็ตาม จากการศึกษาของ Lewis et. al แสดงให้เห็นว่าการมีหรือไม่มีของหยดขนาดใหญ่เพียงหนึ่งหยดในจำนวน 1,000 หยด อาจมีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่วัดได้ถึง 100% ดังนั้นการที่จะเพิ่มความแม่นยำในการวัดขนาดของหยดนั้น จำเป็นที่จะต้องวัดจำนวนหยดให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่ง Bowen and Davice พบว่าการหาขนาดเฉลี่ยของหยดโดยการวัดหยดจำนวน 5,500 หยด จะมีความแม่นยำถึง 95%

<u>ตารางที่ 4.3</u> *อิทธิพลของจำนวนตัวอย่างต่อความแม่นยำของการวัดขนาดของหยด [16]*

จำนวนตัวอย่าง	เปอร์เซนต์ความผิดพลาด
500	17
1,500	10
5,500	5
35,000	2

2. การอิ่มตัวของหยด (Drop Saturation)

การอิ่มตัวของหยดเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการวัดขนาดของหยด โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นของหยดเป็นจำนวนมากเกินกว่าความจุของเครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้วัด ซึ่งจะมีปัญหาอย่างมากเมื่อใช้วิธีการวัดขนาดของหยดด้วยการเก็บหยดบนกระจกสไลด์ หรือในตัวทำละลายที่ไม่ละลายกับหยดที่ได้จากการสเปรย์ ถ้าหยดที่เกิดจากการสเปรย์มีขนาดใหญ่ ความน่าจะเป็นที่หยดจะซ้อนทับกันนั้นมีค่าสูง เนื่องจากเครื่องมือเหล่านี้จะถูกออกแบบให้สัมผัสกับอนุภาค 1 อนุภาคใน 1 หน่วยเวลา ดังนั้น ถ้ามีจำนวนหยดมากกว่า 1 หยดใน 1 หน่วยเวลาของเส้นทางที่แสงผ่าน เครื่องมือจะบันทึกว่ามี 1 หยดที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น

3. การระเหยของหยด (Drop Evaporation)

หยดที่ได้จากการสเปรย์ของหัวฉีดนั้นมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยหยดที่มีขนาดเล็กจะเกิดการระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อออกมาสู่บรรยากาศ ดังนั้นการระเหยของหยดจึงเป็นปัญหาอย่างมากในการวัดหยดที่มีขนาดเล็กจากการสเปรย์ การระเหยเป็นสาเหตุให้ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของหยดละอองก่อนที่จะเกิดการระเหย สำหรับสเปรย์ที่มีขนาดของหยดใกล้เคียงกัน (Monodisperse Spray) การระเหยจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดมีค่าลดลงเสมอ แต่สำหรับสเปรย์ที่มีขนาดของหยดกว้าง การระเหยอาจจะทำให้ค่า Mass Median Diameter (MMD) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

4. การรวมตัวของหยด (Drop Coalescence)

การชนกันของหยดละอองในบางครั้งอาจทำให้หยดละอองเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการที่หยดละอองจะรวมตัวกันได้หรือไม่นั้นมีปัจจัยหลายอย่าง ดังนี้

- ขนาดของหยดละออง
- ความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity)
- มุมที่เกิดการชน
- ความหนาแน่นของหยดที่ได้จากการสเปรย์
- ช่วงระยะเวลาที่ชน

ดังนั้นการรวมตัวกันส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในสเปรย์ที่มีความหนาแน่นสูงและมีขนาดใหญ่

4.3.2 วิธีการวัดเชิงกล (Mechanical Methods) [16]

เป็นวิธีการจับตัวอย่างของสเปรย์ลงบนพื้นผิวที่แข็งหรือในเซลล์ที่บรรจุของเหลวที่มีคุณสมบัติพิเศษ แล้วทำการวัดขนาดของหยดละออง หรือถ่ายภาพด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายและมีตัวแปรมาก ตัวอย่างของวิธีการวัดเชิงกล ได้แก่

4.3.2.1 วิธีการจับตัวอย่างของหยดละอองไว้บนสไลด์ (Collection of drop on slide)

สไลด์ที่นำมาใช้จะต้องทำการเคลือบผิวอย่างละเอียด เพื่อที่จะสามารถทำให้เห็นรอยกดทับที่เกิดจากหยดละอองที่มีขนาดเล็กได้อย่างชัดเจน ซึ่งการเคลือบผิวอย่างละเอียดนี้สามารถทำได้โดยการเผาไส้ตะเกียงที่จุ่มอยู่น้ำมันก๊าด แล้วนำแก้วสไลด์มารับเขม่าควันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเคลือบของเขม่าควันอย่างบางๆที่พื้นผิวของสไลด์ หรือทำได้โดยการเผาแมกนีเซียมเพื่อทำให้เกิดการเคลือบอย่างบางๆของแมกนีเซียมออกไซด์ เมื่อนำสไลด์นี้ไปรองรับหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์ ขนาดของหยดละอองน้ำที่กดทับอยู่บนสไลด์จะถูกวัดด้วยการถ่ายภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง หรือใช้การวิเคราะห์ภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งขนาดของหยดละอองที่ถ่ายได้นี้จะถูกเปลี่ยนให้มีขนาดเท่ากับขนาดจริงของหยดด้วยการใช้ Correction factor ปัญหาของการวัดขนาดหยดละอองด้วยวิธีนี้ก็คือ

1. สัดส่วนของพื้นที่ที่สไลด์ถูกปกคลุมด้วยหยดละอองน้ำ เนื่องจากถ้าจำนวนหยดมากเกินไป ความน่าเป็นของการวัดที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากเกิดการซ้อนทับจะมีเพิ่มสูงขึ้น และต้องนับหยดละอองเป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีจำนวนหยดละอองน้อยเกินไป ตัวอย่างของหยดละอองที่วัดได้ก็อาจจะไม่ใช่ค่าที่แท้จริงของสเปรย์ที่วัด
2. การระเหยของหยดละอองน้ำและประสิทธิภาพในการจัดเก็บหยดละออง หยดละอองที่มีขนาดเล็กจะระเหยได้อย่างรวดเร็ว หยดละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนจะระเหยภายใน 10 วินาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ดังนั้นการระเหยจึงมีผลอย่างมากในการวัดหยดสเปรย์ที่มีขนาดเล็ก ส่วนประสิทธิภาพในการจัดเก็บหยดละอองจะมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดเก็บหยดละอองที่เกิดจากหัวฉีดพ่นลม (Airblast Atomizer) เนื่องจากจะเกิดกระแสลมไหลรอบพื้นผิวของสไลด์ที่ทำการจัดเก็บหยดละออง หยดละอองที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงเฉื่อยเพียงพอที่ตกลงไปปะทะกับพื้นผิวของสไลด์ ส่วนหยดละอองที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มว่าจะไหลไปตามกระแสลม ดังนั้นขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดพ่นลมโดยการวัดด้วยวิธีนี้จึงมีแนวโน้มว่าจะมีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริง
3. เนื่องจากการวัดขนาดของหยดละอองน้ำด้วยวิธีนี้ จะต้องใช้สไลด์เคลือบด้วยสารพิเศษไปรองรับหยดละอองที่ได้จากการสเปรย์ ซึ่งจะทำให้หยดละอองที่ถูกจับบนสไลด์แบนลงและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าความเป็นจริง ดังนั้นขนาดของหยดละอองที่วัดได้จำเป็นต้องนำมาคูณกับ Correction factor ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ขนาดของหยดละอองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเหลว และคุณสมบัติของสารเคลือบที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ค่า correction factor ของหยดน้ำมันมีค่าเท่ากับ 0.5 บนพื้นผิวรองรับที่เป็นแก้ว และจะมีค่าเท่ากับ 0.86 บนพื้นผิวที่เคลือบด้วยแมกนีเซียม

4.3.2.2 วิธีการจับหยดละอองน้ำไว้ในเซลล์ (Collection of drop in cells)

เป็นวิธีการจับ/ฉีดหยดละอองลงในเซลล์ที่มีของเหลวคุณสมบัติพิเศษซึ่งไม่ละลายกับหยดละอองที่ทำการฉีดเข้าไป มีข้อดีกว่าวิธีการจับหยดละอองด้วยสไลด์ คือ หยดละอองที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ ไม่เกิดปัญหาการระเหย ไม่เกิดปัญหาที่เกิดจากการแตกออกของหยดละอองเมื่อหยดละอองปะทะกับของเหลว ขนาดจริงของหยดละอองสามารถจะสังเกตและวัดได้โดยตรง การวัดด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะกับสเปรย์ที่มีขนาดของหยดละอองหยาบเพราะอาจเกิดการแตกของละอองเนื่องจากการชนกันของหยดละอองที่มีขนาดใหญ่ในของเหลวที่ใช้ชุบจุ่ม (Immersion Liquid) การลดปัญหาการรวมตัวกันและแตกออกของหยดละอองที่เกิดขึ้นในเซลล์สามารถทำได้โดยการเลือกใช้ของชุบจุ่มที่มีความหนืดและแรงตึงผิวน้อย [20] หยดละอองจะเคลื่อนลงสู่ด้านล่างของเซลล์ และถูกถ่ายภาพด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูง และนำภาพที่ได้ไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงค่าเฉลี่ยและค่ากึ่งกลางของหยดละอองออกมา

4.3.2.3 เทคนิคการหลอมขี้ผึ้ง (Molten Wax Technique)

แนวคิดของเทคนิคนี้เริ่มขึ้นจาก ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับขี้ผึ้งพาราฟินที่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการละลายกลายเป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันก๊าด (ความหนาแน่น 780 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, แรงตึงผิว 0.027 กิโลกรัมต่อวินาทีกำลังสอง และความหนืด 1.5×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที) วิธีการทดสอบด้วยเทคนิคนี้ คือ การนำขี้ผึ้งพาราฟินที่หลอมเหลวมาฉีดออกสู่บรรยากาศภายในถังความดันขนาดใหญ่ ซึ่งหยดละอองที่ได้ออกมานั้นจะเย็นตัวและกลายเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นนำอนุภาคของหยดละอองที่ได้ไปทำการร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเพื่อแยกออกเป็นขนาดต่างๆ ซึ่งน้ำหนักของแต่ละขนาดจะบอกถึงอัตราส่วนโดยปริมาตร (โดยมวล) ของขนาดที่วัดได้ ด้วยเหตุนี้การแจกแจงปริมาตรสะสมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมวล สามารถทำการวัดได้โดยตรงไม่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและบุคคลที่มาทำการคัดขนาดและนับอนุภาคของหยดละออง ยิ่งไปกว่านั้นสามารถใช้ตัวอย่างของหยดได้นับล้านเม็ด เพื่อแสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้ใช้ได้ดีแม้ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดเล็ก ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าจริง

ปัญหาที่สำคัญของการใช้เทคนิคนี้ คือ มีข้อจำกัดของวัตถุที่จะนำมาใช้แทนของเหลวที่ต้องการวัดจริง โดยถ้าคุณสมบัติของวัตถุหลังการนำมาหลอมเหลว เช่น ค่าความหนืด ค่าแรงตึงผิว มีค่าแตกต่างไปจากของเหลวที่ต้องการวัดจริงจะทำให้คุณลักษณะ รูปแบบและค่าขนาดของหยดที่วัดได้จากการสเปรย์มีค่าเบี่ยงเบนออกจากความเป็นจริง ปัญหาอีกปัญหาหนึ่งที่เป็นปัญหาในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการให้ความร้อนกับขี้ผึ้งพาราฟิน และความผิดพลาดในการวัดอันเนื่องจากการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคหยดของขี้ผึ้งที่เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังจากหลุดออกจากหัวฉีด คือ กระบวนการในการก่อรูปและการรวมตัวกันใหม่อีกครั้งหนึ่ง อาจจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความไม่แน่นอน

4.3.2.4 เทคนิคการควบแข็งหยดด้วยความเย็น (Drop Freezing Technique)

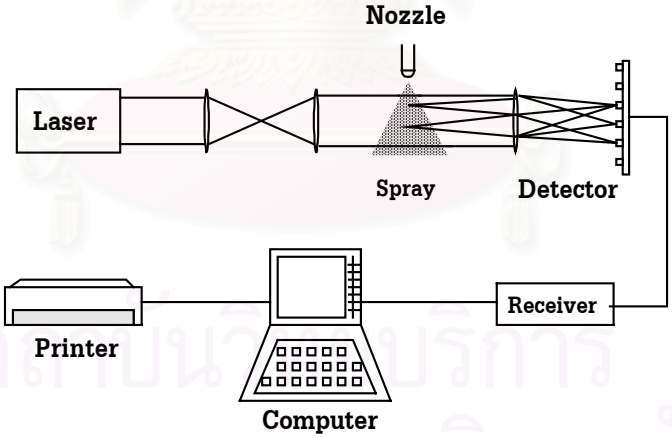
หลักการของเทคนิคนี้คือ การทำให้หยดละอองที่ได้จากการสเปรย์ของหัวฉีดแข็งตัวอย่างรวดเร็วด้วยความเย็น ในระยะที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาวิจัยการวัดขนาดของหยดละอองด้วยวิธีควบแข็งหลายท่านด้วยกัน ตัวอย่างเช่น Longwell ได้ทำการศึกษาเทคนิคการวัดหยดด้วยวิธีนี้โดยการสเปรย์น้ำมันเชื้อเพลิงลงในอ่างแอลกอฮอล์ (Alcohol Bath) ที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำแข็งแห้ง ซึ่งสามารถทำให้หยดเชื้อเพลิงแข็งตัวอยู่ในรูปทรงกลมได้ หลังจากนั้นนำหยดเชื้อเพลิงที่ได้ไปทำการแยกขนาดในขณะที่ยังแข็งอยู่ Choudhury et. al ใช้วิธีการทำให้หยดละอองแข็งตัวโดยการสเปรย์ลงในอ่างที่บรรจุไนโตรเจนเหลว โดยติดตั้งให้ปลายของหัวฉีดอยู่สูงจากผิวหน้าของไนโตรเจนเหลวประมาณ 0.4 เมตร หลังจากทำการเก็บหยดละอองได้เพียงพอแล้ว จะทำการรินไนโตรเจนเหลวออก และนำหยดละอองที่แข็งนี้ไปผ่านกระบวนการคัดขนาด ซึ่งสามารถคัดขนาดได้อยู่ในช่วง 53-5,650 ไมครอน เพื่อหลีกเลี่ยงการรวมตัวกันของหยดละอองบนผิวหน้าของไนโตรเจนเหลว ของเหลวที่ใช้สเปรย์จะต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมกับ น้ำมันก๊าด น้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำ

4.3.3 วิธีการวัดทางทัศนศาสตร์ (Optical Method)

การวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำด้วยวิธีทางทัศนศาสตร์ สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- **Imaging** เช่น เทคนิคการถ่ายภาพ (Photography), และ เทคนิคการถ่ายภาพ 3 มิติ (Holography) เป็นต้น
- **Non-imaging** เช่น การใช้เครื่อง Malvern particle analyzer, หรือ การใช้เครื่อง Phase Doppler Analyzer เป็นต้น

ส่วนใหญ่แล้วการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองโดยใช้วิธีแบบ Non-imaging จะใช้หลักเทคนิคการหักเหของแสง (Laser Diffraction) ซึ่งในปัจจุบันเป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากมีความสะดวกรวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง แต่มีราคาแพงมาก หลักการวิเคราะห์ขนาดของเครื่องวิเคราะห์ขนาดที่อาศัยเทคนิคการหักเหของแสง คือ เมื่ออนุภาคของหยดละอองเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ (Laser beam) จะทำให้แสงเกิดการกระจาย โดยมุมของการกระจายจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของหยดละออง แสงที่ถูกทำให้กระจายทั้งหมดจะถูกเก็บรวบรวมโดยตัวรับสัญญาณ (Detector) เพื่อนำมาประมวลผลการกระจายขนาดของหยดละอองด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 *แสดงหลักการการวิเคราะห์ขนาดด้วยเทคนิค Laser Diffraction*

บทที่ 5

การออกแบบหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียง คือ เสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่ามนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วง 16 เฮิร์ซ – 16 กิโลเฮิร์ซ สำหรับคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 18 กิโลเฮิร์ซ - 500 เมกะเฮิร์ซ การนำไปใช้งานจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงความถี่ คือ

1. ช่วงความถี่สูง (1-10 เมกะเฮิร์ซ) มีการประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์ เช่น ตรวจเนื้อเยื่อ กระดูก กล้ามเนื้อ ไขมัน ถุงน้ำ ที่ผิดปรกติในร่างกาย ใช้ตรวจรูปร่างทารกในครรภ์ หรือ ตรวจหาเนื้องอกในสมองที่คล้ายกับการเอ็กซ์เรย์แต่ปลอดภัยกว่า เป็นต้น
2. ช่วงความถี่ต่ำ (20-100 กิโลเฮิร์ซ) มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น การเชื่อมเส้นลวดขนาดเล็ก ในงานอิเล็กทรอนิก เครื่องวัดความหนาและตรวจหาสิ่งบกพร่องในเนื้อวัสดุ อุปกรณ์ทำความสะอาด กระบวนการแตกเซลล์ (Break Cell) และการเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือ การเคลื่อนที่จะอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน โดยอนุภาคตัวกลางจะสั่นไปมาหรือย้ายตำแหน่งในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน การเคลื่อนที่ของคลื่น (Propagation of Wave) ไปในตัวกลางของของไหล จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน (Vibrate หรือ Oscillate) เกิดเป็นส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Rarefaction) สลับไปมาแพร่กระจายในตัวกลาง บริเวณผิวหน้าของของไหลจะถูกอัดทำให้ความหนาแน่นและความดันของของไหลมากขึ้น เกิดการชนกันของโมเลกุลบริเวณนี้มาก ส่งผลให้เกิดการกดของของไหลในชั้นถัดไปเรื่อยๆ และบริเวณที่ถูกกดตอนแรกจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิม เมื่ออยู่ในส่วนขยายจะทำให้ความดันและความหนาแน่นลดลง ส่วนอัดและส่วนขยายนี้จะเดินทางด้วยความเร็วค่าหนึ่งขึ้นกับความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Compressibility) ของสารที่เป็นตัวกลาง ความยาวคลื่น (เมตร) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\lambda = c / f \qquad \text{.....(5.1)}$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (เมตรต่อวินาที)

f คือ ความถี่ของเสียง (เฮิร์ซ)

5.1 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

การทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียงจะต้องมีตัวกำเนิดที่สั่นสะเทือนด้วยความถี่สูง เครื่องมือส่วนใหญ่จะใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานแม่เหล็กเป็นพลังงานกล เครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานนี้เรียกว่า ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Transducer) ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

5.1.1 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานกล (Mechanical transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานการเคลื่อนที่ของของไหลไปเป็นพลังงานคลื่นเหนือเสียง สามารถสร้างคลื่นเหนือเสียงให้มีความถี่สูงสุด 100 kHz

5.1.2 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานไฟฟ้า (Electromechanical transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง เช่น การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetostatic Oscillators) และ เพียซโซอีเล็คทริคทรานซิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงกว้างมาก

5.2 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง

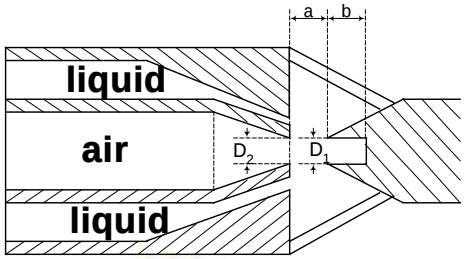
หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของการเกิดคลื่นเหนือเสียงคือ

5.2.1 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หัวฉีดชนิดนี้เป็นหัวฉีดที่สามารถผลิตคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานกล โดยใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานการเคลื่อนที่ของของไหลไปเป็นพลังงานคลื่นเหนือเสียง ซึ่งการที่จะผลิตคลื่นเหนือเสียงได้หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบ

5.2.1.1 กระบวนการฉีดพ่นของของเหลว

รูปที่ 5.1 แสดงรูปแบบหนึ่งของหัวฉีดที่ต้องใช้รูปร่างของหัวฉีดในการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของของไหลให้เป็นการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เรโซเนเตอร์ (Resonator) เป็นส่วนประกอบที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนคลื่นเหนือเสียง โดยอากาศจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงด้วยการไหลผ่านออริฟิซ (Orifice) และไปกระทบกับส่วนท้ายของโพรงในเรโซเนเตอร์ (Resonator) ทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้น แล้วจึงสะท้อนกลับซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็ว (Shock Wave) ขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างส่วนปลายของหัวฉีดกับส่วนหน้าของเรโซเนเตอร์ (Resonator) เมื่อของเหลวถูกส่งมาสัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็ว ก็จะถูกทำให้เป็นละอองขึ้น



<u>รูปที่ 5.1</u> *แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

สิ่งสำคัญในการออกแบบหัวฉีดชนิดนี้ คือ จะต้องออกแบบให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ริฟิซ (D_2), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง (D_1) ความลึกของโพรง (b) และระยะห่างระหว่างส่วนปลายของหัวฉีดกับส่วนหน้าของเรโซเนเตอร์ (a) ให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อจะทำให้เกิดการขยาย Shock Wave ที่สูงสุดนั้นเอง ส่วนคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างหัวฉีดชนิดนี้นั้นไม่มีผลต่อการเกิดคลื่นเหนือเสียง แต่ก็ควรจะเลือกวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น สเตนเลสสตีล เป็นต้น

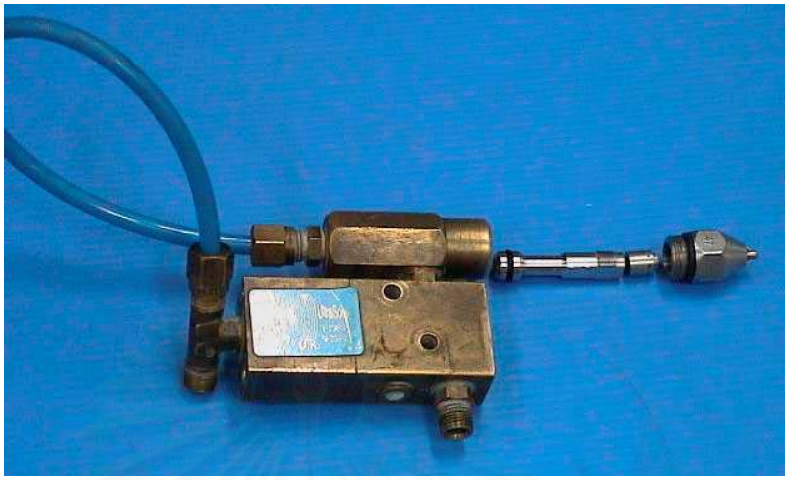
5.2.1.2 การออกแบบหัวฉีด

หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 และมีส่วนประกอบภายในดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

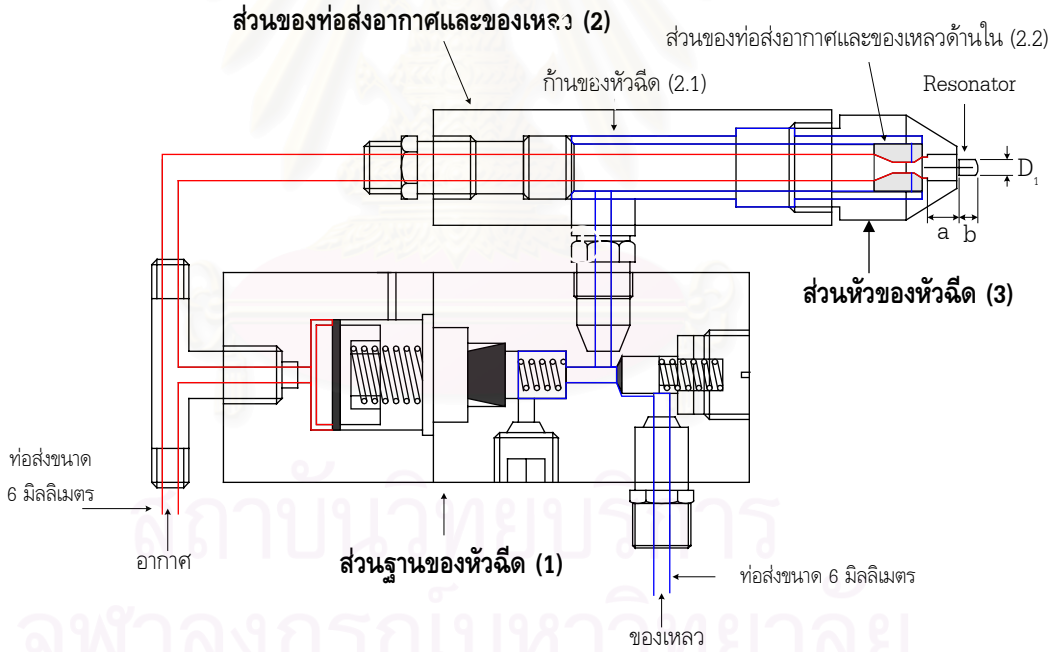
1. ส่วนฐานของหัวฉีด ประกอบไปด้วยท่อส่งอากาศและท่อส่งของเหลวด้านนอก ภายในประกอบด้วย Solenoid valve ซึ่งเป็นตัวควบคุมการไหลของของเหลว

2. ส่วนของท่อส่งอากาศและน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ส่งผ่านอากาศและน้ำไปยังส่วนหัวของของหัวฉีด ภายในประกอบไปด้วย ก้านของหัวฉีด และ ท่อส่งอากาศและน้ำด้านใน โดยอากาศจะถูกส่งมาทางแกนกลางของก้านของหัวฉีด และของเหลวจะถูกส่งมาทางด้านข้าง

3. ส่วนหัวของหัวฉีด เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียง ซึ่งส่วนที่ทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียง ก็คือ เรโซเนเตอร์ (Resonator)



รูปที่ 5.2 *ภาพถ่ายแสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*



จากรูป D_1 คือ ความกว้างของเรโซเนเตอร์

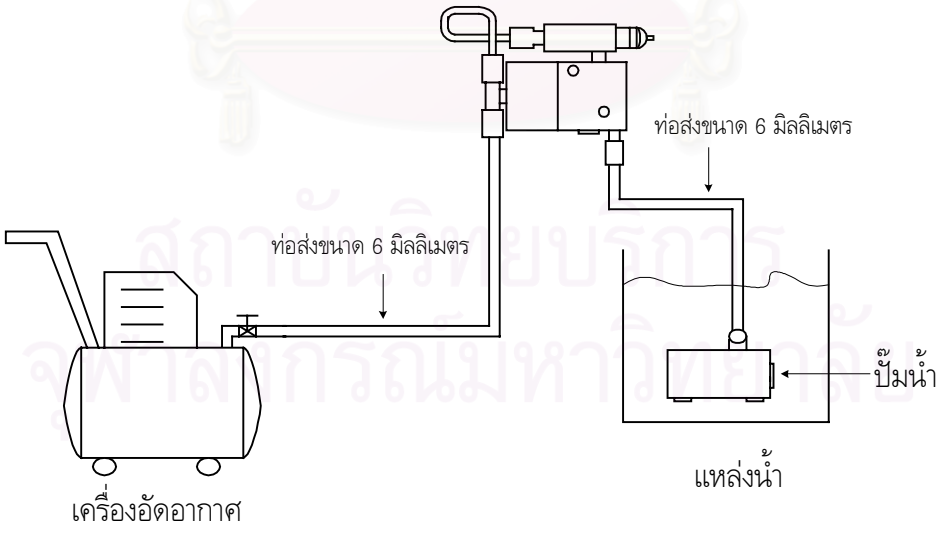
b คือ ความลึกของเรโซเนเตอร์

a คือ ระยะห่างระหว่างส่วนปลายของหัวฉีดกับส่วนหน้าของเรโซเนเตอร์

รูปที่ 5.3 *ไดอาแกรมแสดงส่วนประกอบภายในของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

หัวฉีดดังกล่าว มีหลักการทำงานดังนี้ คือ อากาศจะถูกส่งไปยังส่วนหัวของหัวฉีด (3) ทางท่อส่งอากาศ ผ่านทางแกนกลางของก้านของหัวฉีดโดยเครื่องอัดอากาศ ถ้าความดันของอากาศที่ถูกอัดโดยเครื่องอัดอากาศนี้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ก็จะทำให้โซลีนอยด์วาล์ว (Solenoid valve) ที่อยู่ภายในของส่วนฐานของหัวฉีด (1) เปิดออก ซึ่งจะทำให้ของเหลวที่ถูกส่งมายังส่วนฐานของหัวฉีด (1) สามารถไหลผ่านไปยังส่วนหัวของหัวฉีด (3) ผ่านทางท่อส่งอากาศและของเหลวภายในหัวฉีดได้ อากาศจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูง. โดยการไหลผ่านออร์ริฟิช (Orifice) (ซึ่งอยู่ภายในของชิ้นส่วนของท่อส่งอากาศและของเหลวภายใน (2.2)) และไปกระทบกับส่วนท้ายของโพรงในเรโซเนเตอร์ (Resonator) ทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้น แล้วจึงสะท้อนกลับซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็วขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างส่วนปลายของหัวฉีดกับส่วนหน้าของเรโซเนเตอร์ (Resonator) เมื่อของเหลวถูกส่งมาสัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็ว ก็จะถูกทำให้เป็นละอองขึ้น

จะเห็นได้ว่าสำหรับหัวฉีดชนิดนี้นั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องอัดอากาศที่สามารถอัดอากาศได้มากกว่า 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อทำให้โซลีนอยด์วาล์ว (Solenoid valve) เปิด และของเหลวสามารถไหลผ่านไปยังหัวฉีดได้ สำหรับขนาดของปั๊มน้ำที่ใช้นั้น เนื่องจากหัวฉีดชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแรงดันของน้ำในการทำให้เกิดการฉีดพ่น ปั๊มน้ำขนาดเล็ก (น้อยกว่า 93.25 วัตต์) ที่สามารถส่งของเหลวไปยังหัวฉีดได้ก็เพียงพอแล้วแก่การนำมาใช้ ซึ่งระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 *ไดอาแกรมแสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้นำหัวฉีดต้นแบบนี้มาประยุกต์ใช้ โดยกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิช (D_2) มีค่าคงที่ และทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงในเรโซเนเตอร์ (D_1) และความลึกของโพรงในเรโซเนเตอร์ (b) ให้มีขนาดต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.1 เพื่อศึกษารูปแบบของการสเปรย์ ขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดแต่ละหัว โดยเลือกใช้สเตนเลสสตีลในการสร้างหัวฉีดเพื่อป้องกันการเกิดสนิม

<u>ตารางที่ 5.1</u> *แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกันที่ใช้ในการทดลอง*

หัวฉีด (เบอร์)	**ความกว้างของหัวฉีดเรโซเนเตอร์, D_1 (มิลลิเมตร)**	**ความลึกของหัวฉีดเรโซเนเตอร์, b (มิลลิเมตร)**
1	2	1.5
2	2.5	1.5
3	3	1.5
4	2	3
5	2.5	3
6	3	3
7	2	4.5
8	2.5	4.5
9	3	4.5
10	2	6
11	3	6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หัวฉีดชนิดนี้เป็นหัวฉีดที่สามารถผลิตคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานไฟฟ้า โดยเลือกใช้เพียซโซอีเล็คทริคทรานซิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง ทั้งนี้เนื่องจากเพียซโซอีเล็คทริคทรานซิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียงสูงกว่าแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงชนิดอื่น การส่งพลังงานเป็นระเบียบ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการปฏิบัติงานรวมถึงการควบคุม และยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆได้มากมาย

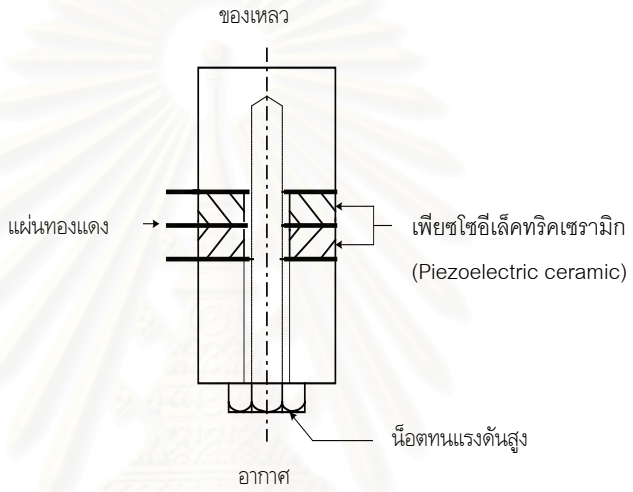
โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตคลื่นเหนือเสียง ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ

1. เครื่องให้สัญญาณความถี่ไฟฟ้า (Electrical Generator) จะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่ไฟฟ้าตามที่ต้องการ

2. ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Transducer) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยใช้หลักการเพียซโซอีเล็คทริคซิตี้ (Piezoelectricity) คือ การให้โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวของไดโพล (Electric Dipole) อย่างเป็นระเบียบ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นและมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ (Capacitor) การทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวของประจุเป็นโครงร่างผลึกในทิศทางเดียวกัน ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริค (Piezoelectric Material) จนถึงอุณหภูมิระดับหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) จะทำให้ไดโพล (dipole) เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่จุดนี้จะใส่ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปและลดอุณหภูมิลง ทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นหากนำมาใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) จะทำให้เสียคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริคซิตี้ (Piezoelectric) ของวัสดุไปและทำให้ไดโพลกับเข้าสู่การเรียงตัวแบบสุ่ม (Random) เช่นเดิม

วัสดุที่มีคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริค (Piezoelectric Material) โดยมากจะเป็นผลึกใสที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติได้แก่ ผลึกควอทซ์ (Quartz) ผลึกเกลือ หรือพลอยสีต่างๆ ปัจจุบันมีการพัฒนานำเอาเซรามิคมาใช้แทน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เฉื่อยต่อปฏิกิริยา ควบคุมคุณสมบัติได้ แข็งแรง ราคาถูก ทนต่อแรงกดดันได้สูง

การนำเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) มาใช้ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ จึงมีการปรับปรุงเพื่อที่จะผลิตคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูง โดยสร้างเป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่าแซนวิชทรานสดิวเซอร์ (Sandwich Transducer) หรือคอมโพซิททรานสดิวเซอร์ (Composite Transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง เนื่องจากมีโครงสร้างง่ายและให้ประสิทธิภาพสูง ประกอบด้วย เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค 2 ชิ้น และ โลหะ 2 ชิ้น ยึดเข้ากันด้วยน็อตทนแรงดันสูงดังรูปที่ 5.5



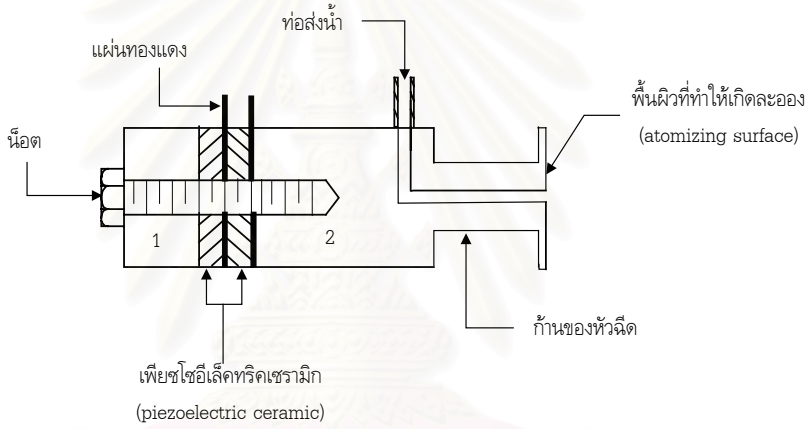
<u>รูปที่ 5.5</u> *แสดงตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง*

ในการออกแบบตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงนี้ จะต้องเลือกชนิดของโลหะและเซรามิคที่ใช้ให้เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านพลังงานไปยังตัวกลางที่ต้องการได้มากที่สุด ในขั้นแรกของการออกแบบจะต้องกำหนดความถี่ที่ต้องการก่อน แล้วจึงคำนวณหาความยาวของคลื่นเหนือเสียง โดยทั่วไปความยาวทั้งหมดของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงที่เหมาะสมมีค่าโดยประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$)

ในการออกแบบหารูปร่างที่เหมาะสมของหัวฉีดชนิดนี้ ขั้นแรกได้ทำการออกแบบให้หัวฉีดมีลักษณะเหมือนกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง โดยเพิ่มท่อส่งของเหลวที่ส่วนหน้าของหัวฉีด และทำการออกแบบที่ความถี่แตกต่างกันคือ 82.4, 76.5, 62.1, 50.3, 42.8, 34.1 และ 26.4 กิโลเฮิร์ซ โดยเลือกใช้โลหะชิ้นหลังเป็นสเตนเลสสตีลและโลหะชิ้นหน้าเป็นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ จากการทดสอบการสเปรย์ของหัวฉีดพบว่า การสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดทุกหัวจะเบาบางมาก มีรูปแบบการสเปรย์ที่ไม่แน่นอนและฟุ้งกระจายได้โดยง่ายเมื่อมีลมเพียงเล็กน้อย แม้ว่าจะเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพื่อเป็นการเพิ่มแอมปลิจูดของการสั่นให้สูง

ขึ้นแต่การสเปรย์ที่ได้ก็ยังคงเบาบางอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มเสียงที่ได้ไม่เพียงพอต่อการฉีดพ่น ดังนั้นการออกแบบหัวฉีดให้มีลักษณะเหมือนกับตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานและศึกษาต่อไป

ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบโดยเพิ่มความยาวส่วนหน้าของหัวฉีดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนประกอบของหัวฉีดด้านหน้าและด้านหลังประกบคู่อยู่ระหว่างเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) และยึดติดกันด้วยน็อต ส่วนหน้าของหัวฉีดประกอบด้วยส่วนประกอบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน โดยส่วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเรียกว่าก้านของหัวฉีด ซึ่งจะเชื่อมติดกับพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง และมีท่อส่งของเหลวอยู่ตรงกลางที่ส่วนหน้าของหัวฉีดเพื่อส่งของเหลวที่จะทำการฉีดพ่นมายังพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง



<u>รูปที่ 5.6</u> *แสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

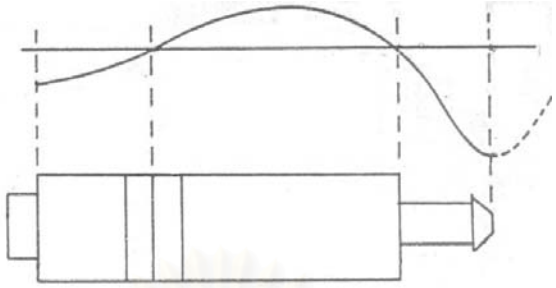
สาเหตุที่จะต้องทำให้ส่วนหน้าของหัวฉีดหรือก้านของหัวฉีดมีขนาดเล็กกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากแอมปลิจูดของการสั่นที่เกิดจากหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าๆกันทั้งหมดไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการฉีดพ่นของของเหลวได้ การลดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ส่วนหน้าของหัวฉีดจะช่วยขยายแอมปลิจูดของการสั่นและทำให้เกิดการฉีดพ่นของของเหลวได้ที่พลังงานไฟฟ้าต่ำ จากการทดสอบขั้นต้นพบว่ารูปแบบของการสเปรย์ที่ได้มีความแน่นอนมากยิ่งขึ้น คือมีลักษณะเป็นกรวยเต็มและสเปรย์ที่ได้ก็มีความหนาแน่นของหยดละอองน้ำสูง ดังนั้นจึงได้เลือกหัวฉีดลักษณะนี้ในการศึกษาต่อไป ซึ่งหลักการทำงานของหัวฉีดชนิดนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่หัวฉีดเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง และถ่ายทอดพลังงานนี้ไปยังส่วนหน้าและส่วนหลังของหัวฉีด ถ้าความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดนี้มีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของหัวฉีด ก็จะทำให้แอมปลิจูดของการสั่นถูกขยายและมีค่ามากที่สุดที่ปลายของหัวฉีดหรือที่พื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองพอดี เรียกความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับความถี่ของหัวฉีดนี้ว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) รูปที่ 5.7 แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ จากรูปจะเห็นว่าการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด (node) จะเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าและที่ทรานซิชั่น (transition) พอดี การสั่นสูงสุดจะเกิดที่ส่วนท้ายของหัวฉีดพอดี ทำให้เกิดการสะท้อนกลับมากที่สุด ก้านของหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจะช่วยขยายแอมปลิจูดของการสั่นให้สูงมากขึ้นและทำให้เกิดแอมปลิจูดสูงสุด (anti-node) ที่ปลายของหัวฉีดพอดีเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์

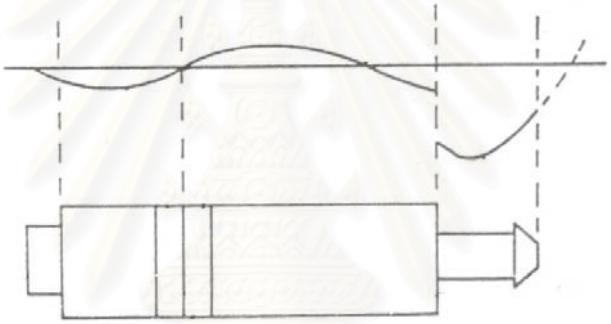
ถ้าความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่ามากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 5.8 การสั่นน้อยที่สุด (node) ก็ยังคงเกิดที่ขั้วไฟฟ้า แต่ความยาวส่วนท้ายของหัวฉีดจะมีความยาวมากกว่าตำแหน่งที่เกิดการสั่นสูงสุด (anti-node) จึงไม่เกิดการสั่นสูงสุด (anti-node) ที่ส่วนท้ายพอดีแต่จะมีตำแหน่งเคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้า ในทำนองเดียวกันที่ส่วนหน้าของหัวฉีดการสั่นน้อยที่สุด (node) อีกอันหนึ่งก็จะไม่เกิดที่ทรานซิชั่น (transition) พอดี แต่จะมีตำแหน่งเคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้า และตำแหน่งของการสั่นสูงสุด (anti-node) ที่เกิดขึ้นที่ปลายด้านหน้าก็จะเคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ทำให้แอมปลิจูดของการสั่นที่เกิดที่ปลายของหัวฉีดมีค่าลดลง

ในทางกลับกัน ถ้าความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าน้อยกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 5.9 ตำแหน่งของการสั่นน้อยที่สุด (node) จะยังคงเกิดที่ขั้วไฟฟ้า แต่ความยาวส่วนท้ายของหัวฉีดจะสั้นกว่าตำแหน่งที่เกิดการสั่นสูงสุด (anti-node) ตำแหน่งของการสั่นสูงสุด (anti-node) จะเคลื่อนไปในทิศทางที่ไกลออกจากขั้วไฟฟ้า การสั่นน้อยที่สุด (node) อีกอันหนึ่งก็จะไม่เกิดที่ทรานซิชั่น (transition) พอดี แต่จะมีตำแหน่งเคลื่อนออกจากขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ส่งผลให้การสั่นสูงสุด (anti-node) เกิดขึ้นห่างออกจากส่วนปลายของหัวฉีด ทำให้แอมปลิจูดของการสั่นที่เกิดขึ้นที่ส่วนปลายของหัวฉีดมีค่าลดลง

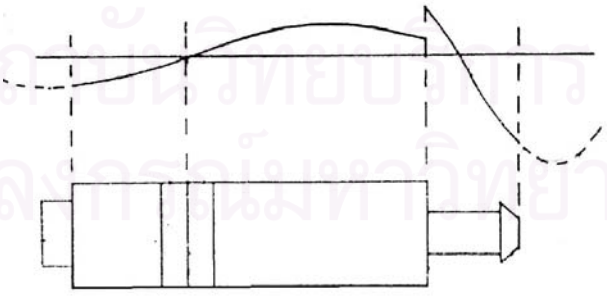
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 *แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์*



รูปที่ 5.8 *แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์*

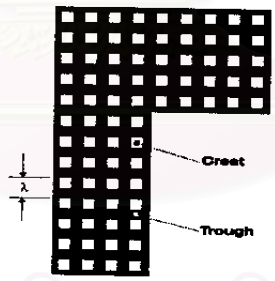


รูปที่ 5.9 *แสดงรูปแบบการสั่นของคลื่นเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์*

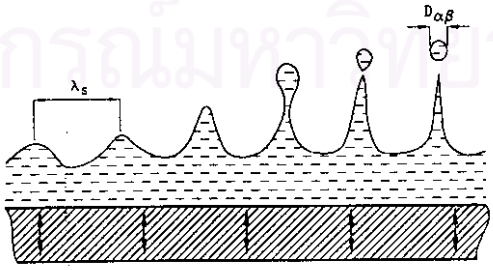
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2.1 กระบวนการฉีดพ่นของของเหลว

จากที่ได้กล่าวข้างต้นไปแล้วว่า เมื่อให้พลังงานไฟฟ้ากับหัวฉีด เพียซโซอีเล็คทริค เซรามิค (Piezoelectric Ceramic) จะทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง และถ่ายทอดพลังงานนี้ไปยังส่วนหน้าและส่วนหลังของหัวฉีด ของเหลวจะถูกส่งมาทางท่อส่งของเหลวด้านในมายังพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง ซึ่งอยู่ด้านหน้าของหัวฉีดและแผ่ขยายออกเป็นแผ่นฟิล์มบางๆปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง เมื่อความถี่ของพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของหัวฉีด ก็จะเกิดแอมปลิจูดสูงสุดหรือการสั่นสูงสุดที่ปลายของหัวฉีดหรือที่พื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองพอดี ซึ่งจะถ่ายทอดการสั่นสะเทือนนี้ให้กับฟิล์มของของเหลวที่อยู่ด้านหน้า ทำให้ฟิล์มของของเหลวสั่นและเกิดคลื่นเล็กๆ (Capillary Wave) บนผิวหน้าของฟิล์มของของเหลว ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงร่างตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมประกอบด้วยส่วนยอดคลื่น (Crest) และส่วนที่เป็นท้องคลื่น (Trough) สลับกันไป ดังแสดงในรูปที่ 5.10 แต่ละช่องสี่เหลี่ยมของโครงร่างตาข่ายเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดของหยดละออง เมื่อให้พลังงานไฟฟ้ากับหัวฉีดเพิ่มสูงขึ้น แอมปลิจูดของการสั่นก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้แอมปลิจูดของการสั่นของคลื่นเล็กๆ (Capillary Wave) นี้เพิ่มขึ้นด้วย ยอดของคลื่น (Crest) ก็จะสูงขึ้นและท้องของคลื่นจะลึกลง ถ้าให้แอมปลิจูดของการสั่นมีขนาดสูงมากเกินกว่าที่แอมปลิจูดของคลื่นเล็กๆ (Capillary Wave) จะยังคงความเสถียรอยู่ได้ ก็จะทำให้ปลายของยอดคลื่นนั้นหลุดออกมาเป็นหยดละอองน้ำที่ความเร็วต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 *แสดงลักษณะของคลื่นเล็กๆ (Capillary wave) ที่มีรูปร่างคล้ายโครงร่างตาข่าย*



รูปที่ 5.11 *แสดงกลไกการหลุดออกของหยดละอองออกจากยอดของคลื่นเล็กๆ (Capillary wave) ที่ไม่เสถียร*

5.2.2.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการฉีดพ่น, ขนาดของหยดละออง และลักษณะของการสเปรย์

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้กล่าวถึง กระบวนการฉีดพ่นของของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของความยาวคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียร (λ_c) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์มของของเหลว มีค่าขึ้นอยู่กับ ความถี่ของการสั่นของหัวฉีด (f), ความหนาแน่นของของเหลว (ρ) และแรงตึงผิวของของเหลว (σ) ซึ่งเป็นแรงที่พยายามต้านการเกิดการฉีดพ่นที่ผิวของของเหลว ซึ่งสามารถประมาณค่าความยาวคลื่นได้จากสมการดังต่อไปนี้ [17]

$$\lambda_c = \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{1/3} \qquad .....(5.2)$$

จากการศึกษาของ Lang [17] พบว่า สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำกับความยาวคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียรได้ ดังสมการที่ 5.3 และ 5.4

$$d_{0.5} \cong 0.34\lambda_c \qquad .....(5.3)$$

หรือ

$$d_{0.5} \cong 0.34\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right)^{1/3} \qquad .....(5.4)$$

จากสมการที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของของเหลว และความถี่ มีผลต่อกระบวนการฉีดพ่นและขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้ อย่างไรก็ตาม นอกจากนั้นแล้วยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อกระบวนการฉีดพ่น, ขนาดของหยดละออง และลักษณะของการสเปรย์ที่ได้ เช่น อัตราการไหลของของเหลว, รูปร่างของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง เป็นต้น ซึ่งจะได้อธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อิทธิพลของความถี่

จากสมการที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละออง คือ ความถี่ โดยขนาดของหยดละอองที่ได้จะแปรผกผันกับความถี่ของหัวฉีด หัวฉีดที่มีความถี่สูงจะสามารถผลิตหยดละอองที่มีขนาดเล็กกว่าหัวฉีดที่มีความถี่ต่ำ นอกจากนี้แล้วความถี่ของหัวฉีดที่ใช้ยังสามารถนำไปหาขนาดของหัวฉีด และอัตราการไหลของของเหลวสูงสุดได้อีกด้วย

เมื่อกำหนดความถี่ของหัวฉีด จะสามารถคำนวณหาความยาวคลื่น (λ) ได้ โดยทั่วไปในการออกแบบหัวฉีด ความยาวของหัวฉีดจะมีค่าประมาณ 1 ความยาวคลื่น และเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดควรมีค่าน้อยกว่า 1/4 ของความยาวคลื่น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นตามขวางขึ้น พื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่ที่สุดของหัวฉีดจึงแปรผันตาม $\lambda^2/16$ ดังนั้นปริมาตรโดยรวมของหัวฉีดจึงแปรผันตาม $\lambda \times \lambda^2$ หรือ $1/f^3$ อัตราการไหลของของเหลวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ของหัวฉีดมีค่าสูงขึ้น หัวฉีดที่มีความถี่ต่ำหรือมีขนาดใหญ่จึงสามารถฉีดพ่นของเหลวที่มีอัตราการไหลสูงได้

2. อิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลว

เนื่องจากการฉีดพ่นของหัวฉีดชนิดนี้เกิดจากการหลุดออกจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของของเหลว ดังนั้นคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้จึงมีผลต่อกระบวนการฉีดพ่น และขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้ จากสมการที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า แรงตึงผิวและความหนาแน่นของของเหลวมีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละออง จากสมการดังกล่าว เราสามารถหาขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้จากของเหลวชนิดต่างๆเมื่อหัวฉีดทำงานที่ความถี่เดียวกันได้ ด้วยการคำนวณเปรียบเทียบกับขนาดของหยดละออง ที่อุณหภูมิ 25°C น้ำมีแรงตึงผิวเท่ากับ 73 มิลลินิวตันต่อเมตร และ มีความหนืดเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดของหยดละอองน้ำ (D_w) จะมีค่าเท่ากับ

$$D_w \approx (\sigma_w / \rho_w f^2)^{1/3} = (73/f^2)^{1/3} \quad \text{.....(5.5)}$$

และขนาดของหยดละอองที่ได้จากของเหลวชนิดอื่น (D_x) มีค่าเท่ากับ

$$D_x \approx (\sigma_x / \rho_x f^2)^{1/3} \quad \text{.....(5.6)}$$

$$\frac{D_x}{D_w} = (\sigma_x \rho_w / \sigma_w \rho_x)^{1/3} = (\sigma_x / 73\rho_x)^{1/3} \quad \text{.....(5.7)}$$

$$D_x = D_w (\sigma_x / 73\rho_x)^{1/3} = D_w R \quad \text{.....(5.8)}$$

นอกจากแรงตึงผิวและความหนาแน่นของของเหลวที่มีผลต่อกระบวนการฉีดพ่นและขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้แล้ว คุณสมบัติอื่นๆของของเหลว เช่น ประเภทของของเหลว และความหนืดของของเหลวยังมีผลต่อกระบวนการฉีดพ่นอีกด้วย ซึ่งสามารถจัดประเภทของของเหลวได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

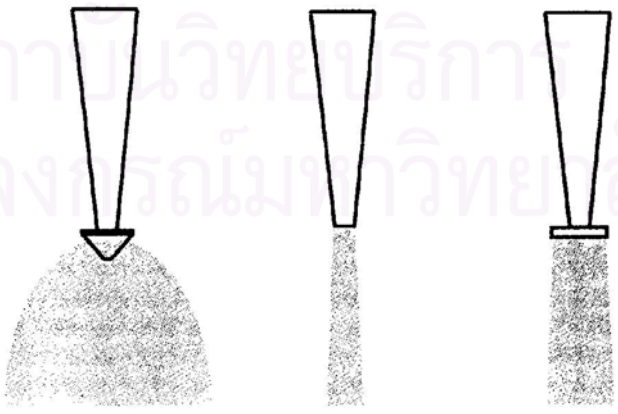
- ของเหลวบริสุทธิ์ เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์, โบรมีน สำหรับของเหลวกลุ่มนี้ปัจจัยตัวเดียวที่มีผลต่อความสามารถในการฉีดพ่น ก็คือ ความหนืด ของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า 50 ตร.ม./วินาที จะสามารถเกิดการฉีดพ่นได้ยาก และอัตราการไหลของของเหลวสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อของเหลวที่ใช้มีความหนืดสูงขึ้น
- สารละลาย เช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์, แอลกอฮอล์เข้มข้น 10% เป็นต้น ความสามารถในการการฉีดพ่นเมื่อของเหลวที่ใช้เป็นสารละลายจะคล้ายกับของเหลวบริสุทธิ์ แต่สิ่งที่เพิ่มเติมเข้ามา ก็คือ ในกรณีที่สารละลายที่ใช้มีส่วนผสมของโพลิเมอร์ที่สายโซ่ยาวๆ จะยากต่อการฉีดพ่น เนื่องจากคุณสมบัติของโพลิเมอร์จะขัดขวางการหลุดออกของหยดละอองน้ำจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียร ทำให้เกิดการฉีดพ่นได้ยาก
- ของเหลวที่เป็นของผสม ปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดพ่นสำหรับของเหลวชนิดนี้ ก็คือ ขนาดของผสมที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ถ้าของเหลวมีขนาดเล็กกว่าขนาดของหยดละอองน้ำมากๆ ก็จะสามารถเกิดการฉีดพ่นได้ แต่โดยทั่วไปแล้ว ถ้าของผสมมีขนาดใหญ่กว่าหนึ่งในสิบเท่าของขนาดของหยดละอองน้ำ การฉีดพ่นที่ได้ก็จะไม่ดีเท่าที่ควร

3. อิทธิพลของความเร็วของของเหลว

ในการเกิดการฉีดพ่นสำหรับหัวฉีดชนิดนี้นั้น ของเหลวจะถูกส่งมายังพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองทางท่อส่งของเหลว ซึ่งอยู่ภายในตรงกลางของหัวฉีด ความเร็วของของเหลวที่ปลายทางออกของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง (V_e) เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดการฉีดพ่น หากความเร็วของของเหลว ณ ปลายทางออกของหัวฉีดมีค่าสูงกว่าค่าค่าหนึ่ง หรือเกินกว่าค่าความเร็ววิกฤต (V_c) หัวฉีดจะไม่สามารถเกิดการฉีดพ่นได้ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อของเหลวมีความเร็วสูง ของเหลวจะไม่สามารถแผ่ขยายเป็นฟิล์มของของเหลวปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองได้ แต่จะเกิดเป็นหยดของเหลวขนาดใหญ่/หรือเกิดเป็นสายของของเหลวไหลออกมาจากปลายทางออกของหัวฉีดแยกออกจากพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง ทำให้หัวฉีดไม่สามารถเกิดการฉีดพ่นได้ จากการศึกษาของ Berger [17] พบว่า เมื่อของเหลวที่ใช้เป็นน้ำ และไหลออกมาจากท่อส่งของเหลวในแนวนอน ความเร็ววิกฤตของของเหลวจะมีค่าประมาณ 0.33 เมตร/วินาที และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในกรณีที่ของเหลวไหลออกจากท่อส่งของเหลวในแนวดิ่ง เนื่องจากอิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก

4. รูปแบบของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง

พื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้งาน ซึ่งการออกแบบให้พื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีลักษณะต่างกัน ก็จะได้รูปร่างของการสเปรย์ที่แตกต่างกันไปด้วย รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองในแบบต่างๆ รูปที่ 5.12(a) การสเปรย์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบกรวยเต็ม (Full cone) รูปที่ 5.12(b) รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จะแคบมาก เนื่องจากพื้นที่ของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเล็ก รูปที่ 5.12(c) จะได้รูปแบบของการสเปรย์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเต็ม (Cylindrical spray shape) ซึ่งขนาดความกว้างของลำสเปรย์จะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง



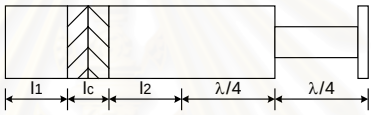
(a) (b) (c)

รูปที่ 5.12 แสดงลักษณะของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองในแบบต่างๆ

5.2.2.3 การออกแบบหัวฉีด

การออกแบบหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric ceramic) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในขั้นแรกจะต้องกำหนดความถี่ที่ต้องการก่อน แล้วนำมาคำนวณหาความยาวในแต่ละส่วนของหัวฉีด โดยปรกติแล้วถ้าหัวฉีดทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน ความยาวทั้งหมดของหัวฉีดจะมีค่าเท่ากับ $\lambda/2$ แต่ถ้าหัวฉีดทำมาจากวัสดุต่างชนิดกันความยาวในแต่ละส่วนของหัวฉีดจะมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ที่กำหนดและคุณสมบัติของตัวกลางที่เลือกมาใช้สร้างหัวฉีด ซึ่งสามารถหาความยาวแต่ละส่วนของหัวฉีดได้จาก

$$\frac{A_c \rho_c C_c}{A_i \rho_i C_i} = \tan(k_i l_i)\tan(k_c l_c) \qquad i = 1, 2 \qquad \text{.....(5.9)}$$



โดยที่ A_c = พื้นที่หน้าตัดของเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค

ρ_c = ความหนาแน่นของเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค

C_c = ความเร็วเสียงในเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค

$k_c = \frac{2\pi f}{C_c}$ และ $k_i = \frac{2\pi f}{C_i}$

A_i = พื้นที่หน้าตัดของส่วนประกอบของหัวฉีด

ρ_i = ความหนาแน่นของโลหะที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหัวฉีด

C_i = ความเร็วเสียงในโลหะที่ใช้เป็นส่วนประกอบของหัวฉีด

ตัวแปรที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการออกแบบหัวฉีดชนิดนี้ก็คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง เนื่องจากในของแข็งคลื่นชนิดอื่นนอกเหนือจากคลื่นตามยาว (Longitudinal wave) สามารถเกิดขึ้นได้ ในท่อนกระบอกทรงกลมสามารถเกิดคลื่นได้ในแนวรัศมีหรือเกิดคลื่นตามขวาง (Transverse wave) ขึ้น โดยมีทิศทางตั้งฉากกับคลื่นตามยาว (Longitudinal wave) ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว (Longitudinal wave) ทำให้การส่งถ่ายพลังงานในตัวกลางไม่ดีเท่าที่ควร การที่จะป้องกันไม่ให้เกิดคลื่นตามขวาง (Transverse wave) นี้ ควรออกแบบให้หัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $\lambda/4$ *[Berger & Daniel]*

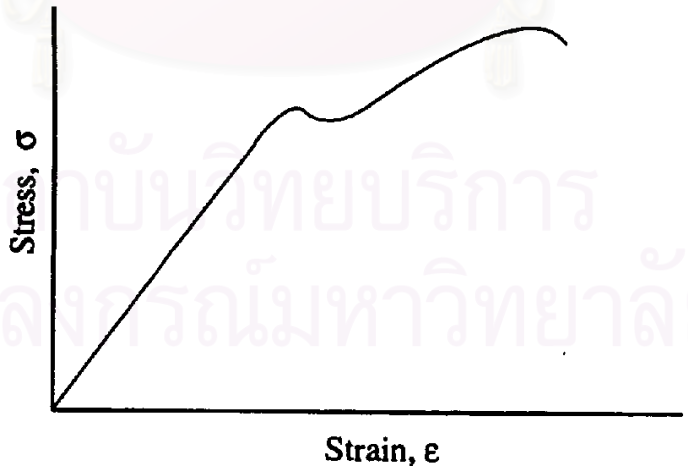
สำหรับความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ ส่วนใหญ่แล้วในทางปฏิบัติจะออกแบบให้มีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 120 กิโลเฮิร์ซ เนื่องจากถ้าออกแบบให้หัวฉีดมีความถี่ต่ำกว่า 20 กิโลเฮิร์ซ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยินจะก่อให้เกิดความรำคาญแก่ผู้ใช้งานและบุคคลรอบข้าง และจะต้องให้พลังงานไฟฟ้าอย่างมากแก่หัวฉีดเพื่อทำให้มีความเข้ม (intensity) เพียงพอต่อการทำให้เกิดการฉีดพ่นของของเหลว แต่ถ้าออกแบบให้หัวฉีดมีความถี่สูงเกินกว่า 120 กิโลเฮิร์ซ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเล็กเกินไป ยากต่อการสร้างและนำไปใช้งาน

5.2.2.4 คุณสมบัติของโลหะที่ใช้สร้างหัวฉีด

เนื่องจากวัสดุที่นำมาสร้างหัวฉีดจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ให้เหมาะสม เพื่อที่จะได้ส่งถ่ายพลังงานไปยังของเหลวให้ได้มากที่สุด โดยพิจารณาได้จากค่า Young's Modulus ซึ่งเป็นค่าคงที่ระหว่างความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด จากสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \qquad ..(5.10)$$

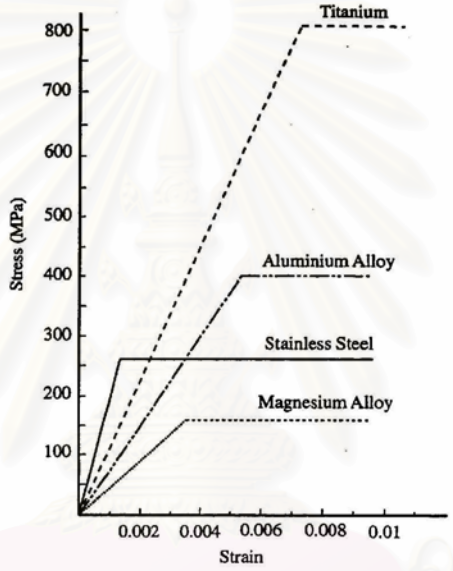
โดยที่ σ คือ ค่าความเค้น และ ε คือ ค่าความเครียด



รูปที่ 5.13 *กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

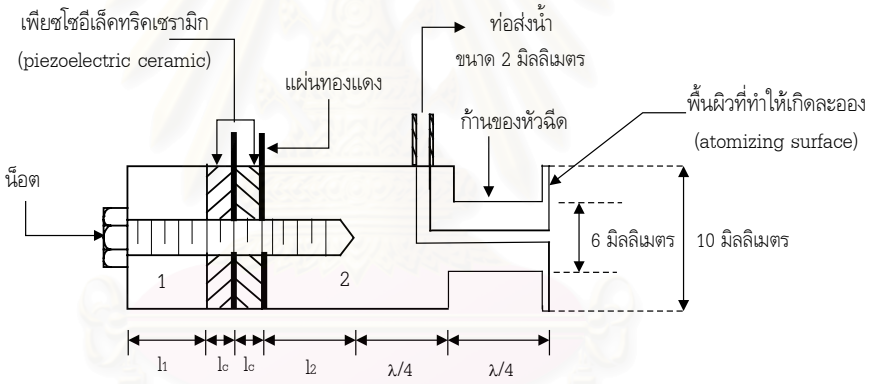
พลังงานคลื่นเหนือเสียงหรือความเค้นที่ส่งผ่านไปในตัวกลางจะทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือน โดยพลังงานคลื่นเหนือเสียงหรือความเค้นสูงสุด มีค่าสูงสุดจำกัดก่อนที่วัสดุจะเสียรูป (Deformation) ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ในการคำนวณหาขนาดของแอมปลิจูดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุหนึ่งๆนั้น จะใช้ Stress– Strain Curve บอกขนาดของแรงที่สามารถให้กับวัสดุได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดรูปร่าง เพื่อทำให้การเลือกชนิดของวัสดุเหมะสมจึงได้ทำการเปรียบเทียบ Stress – Strain Curve ของโลหะ 4 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ไทเทเนียม โลหะผสมอะลูมิเนียม (Aluminium Alloy) และ โลหะผสมแมกมีเซียม (Magnesium Alloy) ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 *แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะแต่ละชนิด*

จากรูปที่ 5.12 พบว่าไทเทเนียมเป็นวัสดุที่เหมาะสมนำมาใช้ในการสร้างเป็นหัวฉีดมากที่สุด ถึงแม้ว่าอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดจะมีค่าสูงก็ตาม แต่ไทเทเนียมสามารถทนแรงได้สูงสุดก่อนจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง ทนต่อการกัดกร่อนและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เนื่องจากไทเทเนียมมีราคาแพง จึงมีข้อจำกัดในการใช้หากคำนึงในด้านเศรษฐศาสตร์ วัสดุที่ราคาถูกและสามารถนำมาใช้ทดแทนได้ คือ อลูมิเนียมอัล-ลอยด์ ซึ่งมีอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่ต่ำกว่าไทเทเนียม แต่มีข้อเสียคือไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนและทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆได้ง่าย สำหรับสเตนเลสสตีล ก็มีผู้นิยมนำมาใช้ในการสร้างหัวฉีดเนื่องจากทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ถึงแม้ว่าแรงที่วัสดุสามารถทนทานได้ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีค่าต่ำและอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดมีค่าสูงสุดก็ตาม สำหรับแมกนีเซียมอัลลอยด์ไม่เป็นที่นิยมถึงแม้ว่าอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดมีค่าต่ำสุดก็ตาม หากแต่ว่าแรงที่วัสดุสามารถทนทานได้ก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีค่าต่ำมาก นอกจากนั้นวัสดุนี้สามารถติดไฟได้ง่ายอีกด้วย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการออกแบบหัวฉีดที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยเลือกใช้สเตนเลสสตีล และ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ เป็นโลหะส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สอง ตามลำดับ เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคที่ใช้เป็นชนิดวงแหวน รุ่น Sonox P4 มีความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคจะเป็นตัวกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดให้มีขนาดเท่ากับ 1 เซนติเมตร และออกแบบให้ก้านของหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ส่วนปลายด้านหน้าของหัวฉีดจะเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองให้มีขนาดเท่ากับ 1 เซนติเมตร เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการฉีดพ่น โดยได้ทำการออกแบบหัวฉีดให้มีความถี่แตกต่างกัน เพื่อทำการศึกษาผลของความถี่ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง อัตราการไหลของของเหลว คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ และขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองที่มีผลต่อรูปแบบของการสเปรย์ ขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้ ซึ่งความถี่และความยาวในแต่ละส่วนของหัวฉีดที่ได้ทำการออกแบบและลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 และ รูปที่ 5.16 ตามลำดับ



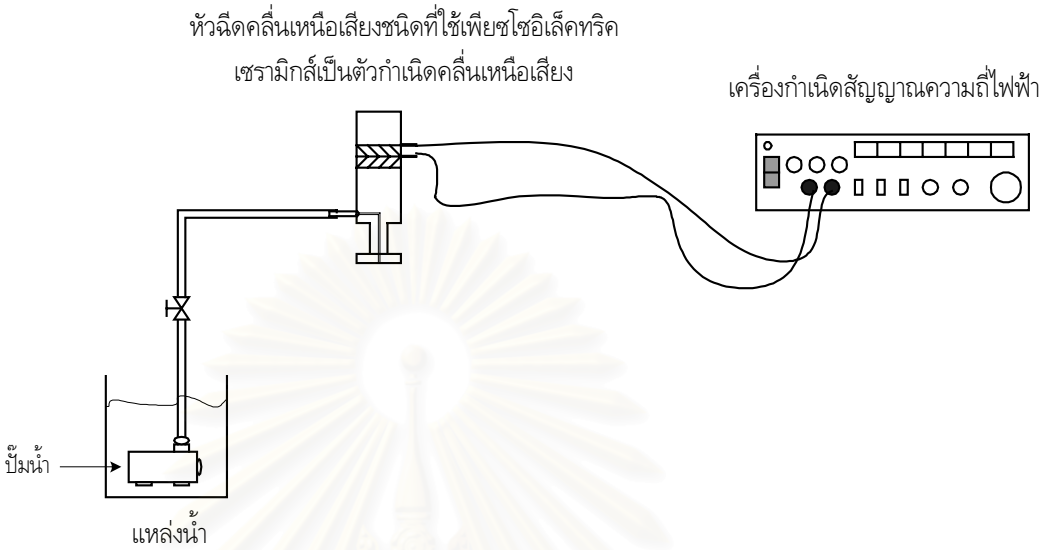
รูปที่ 5.15 *ไดอาแกรมแสดงลักษณะของหัวคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทดลอง*

ตารางที่ 5.2 *แสดงความถี่และความยาวในแต่ละส่วนของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง*

ลำดับที่	ความถี่ของหัวฉีด (กิโลเฮิร์ซ)	ความยาวของสเตนเลสสตีล, l_1 (มิลลิเมตร)	ความยาวของอะลูมิเนียมอัลลอยด์		ความยาวทั้งหมดของหัวฉีด (มิลลิเมตร)
			l_2 (มิลลิเมตร)	$\lambda/4$ (มิลลิเมตร)	
1	34.53	11.2	14.1	16	61.3
2	39.8	8	10.9	12.8	48.5
3	47.17	6	8.7	10.7	40.1
4	56.49	4.6	7.1	9.2	34.1

รูปที่ 5.16 *ภาพถ่ายแสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการทดลอง*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 5.17</u> *แสดงระบบการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วิธีการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีด และการทดลองวัดประสิทธิภาพของการกำจัดด้วยการใช้หัวฉีด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

6.1 วิธีการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีด

จากหัวข้อที่ 4.3.2 จะเห็นได้ว่าวิธีการวัดขนาดของหยดละอองแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน และควรเลือกวิธีการวัดหยดละอองให้เหมาะสมกับของเหลวที่ใช้ในการสเปรย์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกวิธีการจับตัวอย่างของหยดละอองไว้บนสไลด์ (Collection of Drop on Slide) เนื่องจากการใช้วิธีการหลอมขี้ผึ้ง (Molten Wex Technique) เราไม่สามารถหาขี้ผึ้งซึ่งเมื่อให้ความร้อนแล้วมีคุณสมบัติเหมือนกับของเหลวที่เราใช้ในการทดลองได้ วิธีการวัดโดยใช้เทคนิคการควบแข็ง (Drop Freezing Technique) นั้นเป็นวิธีที่ยุ่งยากและต้องควบคุมเรื่องอุณหภูมิที่ให้กับหยดละอองเพื่อทำให้ไม่เกิดการละลาย ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจึงเป็นการยากที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้ ส่วนวิธีการจับหยดละอองไว้ในเซลล์ (Collection of Drop in Cells) นั้น ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการ แต่มีความยุ่งยากในการเลือกของเหลวที่ใช้ในการชุบจุ่ม (Immersion Liquid) ให้เหมาะสมกับการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากของเหลวชุบจุ่มที่ใช้ควรจะไม่ละลายกับของเหลวที่ใช้สเปรย์ รวมทั้งควรมีความหนืดและแรงตึงผิวน้อย เพื่อลดปัญหาการรวมตัวและการแตกตัวของหยดละอองในเซลล์ และยังไม่สามารถหามาตราส่วนที่ใช้ในการเทียบขนาดของหยดละอองที่เกิดขึ้นจริงกับขนาดของหยดละอองที่ได้จากภาพถ่าย ส่วนสำหรับวิธีการจับตัวอย่างของหยดละอองน้ำไว้บนสไลด์ที่เลือกใช้นั้น มีข้อดี คือ สะดวก ง่าย และค่าใช้จ่ายต่ำ เครื่องมือที่ใช้ก็หาง่ายมีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการวิจัย แต่มีข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลานานเนื่องจากต้องวัดขนาดของหยดละอองน้ำเป็นจำนวนมาก และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเกิดการระเหยของหยดละอองได้

วิธีการจับตัวอย่างของหยดละอองน้ำไว้บนสไลด์ (Collection of Drop on Slide) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำได้โดย เก็บตัวอย่างของหยดละอองที่สภาวะต่างๆที่สนใจบนแผ่นสไลด์ซึ่งเคลือบผิวด้วยแว๊กซ์ (wax) เพื่อลดปัญหาการระเหยและการแบนลงของหยดละอองที่ได้จากการสเปรย์ แล้วนำหยดละอองที่เกาะบนแผ่นสไลด์นี้ไปส่องกล้องจุลทรรศน์ และทำการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ นำภาพที่ได้มาวัดขนาดของหยดละอองแต่ละหยด แล้วจึงนำผลที่ได้มาคำนวณหาขนาดและการการกระจายขนาดของหยดละออง จากการทดลองในเบื้องต้น พบว่า ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือ

เสียง เมื่อนับหยดละอองจำนวน 500, 700 และ 1,000 หยด ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกัน (ดังแสดงผลการวัดในภาคผนวก ก.) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการวัดขนาดของหยดละอองประมาณ 500 หยด เพื่อนำมาหาค่าขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง โดยจะทำการทดลองวัดซ้ำเป็นจำนวน 4 ครั้ง เพื่อความแม่นยำของผลการทดลอง

ในการทดลองจะทำการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ที่สภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้ โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

6.1.1 อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) รุ่น BH-2 ของ Olympus
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Signal Generator) รุ่น CFG 253 ของบริษัท Tektronix, ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า (Amplifier) รุ่น P-602 ของบริษัท A-Techinc
4. ตัวต้านทาน (Resister) ขนาด 0.38 โอห์ม ขนาด 60 วัตต์
5. หม้อแปลง (Transformer) ขนาด 42:1300 (ขดลวดปฐมภูมิ : ขดลวดทุติยภูมิ) ขนาด 1 แอมแปร์
6. ปั๊มน้ำ (Centrifugal pump) ขนาด 93.25 วัตต์
7. เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิค (Piezoelectric Ceramic) ชนิดที่เป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.3 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร รุ่น Sonox P4 ของบริษัท Hoechst CeramTec UK Limited
8. เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ขนาด 932.5 วัตต์

6.1.2 สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5%
2. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25%
3. น้ำเชื่อมเข้มข้น 25%
4. น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%
5. สารลดแรงตึงผิว
6. กลีเซอรอล (Glycerol)
7. น้ำมันพืช

6.1.3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

6.1.3.1 สภาวะในการทดลอง

หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อขนาดของหยดละอองและรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้ คือ ความถี่และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง, อัตราการไหลของของเหลว, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง และ คุณสมบัติของของเหลว

ตัวแปรที่ทำการทดลอง: ตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษา สรุปได้ดังตารางที่ 6.1

<u>ตารางที่ 6.1</u> *แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่จะทำการศึกษา*

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยน
1) ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง (กิโลเฮิร์ซ)	34.53, 39.8, 47.17 และ 56.49
2) ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง (วัตต์ต่อตัว)	2, 4, 6 และ 8
3) อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)	22, 85, 146 และ 250
4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง (มิลลิเมตร)	10, 14 และ 16
5) คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ โดยเปลี่ยนของเหลวที่ใช้รวม 10 ชนิด [ก]	น้ำ, สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5%, สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%, น้ำ+สารลดแรงตึงผิว, กลีเซอรอล และ น้ำมันพืช

หมายเหตุ: ก) ได้แสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 *ตารางแสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

ลำดับ	ของเหลว	%โดยน้ำหนัก	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/เมตร)	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1	น้ำ	100	72.18	0.96	1000
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5	74.62	1.21	1052
3	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	83.21	1.42	1270
4	น้ำเชื่อม	25	56.32	2.38	1075
5	น้ำเชื่อม	70	52.28	4.34	1179
6	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.01×10^{-4}	61.01	0.96	997.5
7	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	3.2×10^{-4}	45.68	0.96	997.4
8	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.28×10^{-3}	32.23	0.95	997.6
9	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	63.11	65	1260
10	น้ำมันพืช	100	27.09	42	850

ความสัมพันธ์ที่จะทำการศึกษา : จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆดังต่อไปนี้

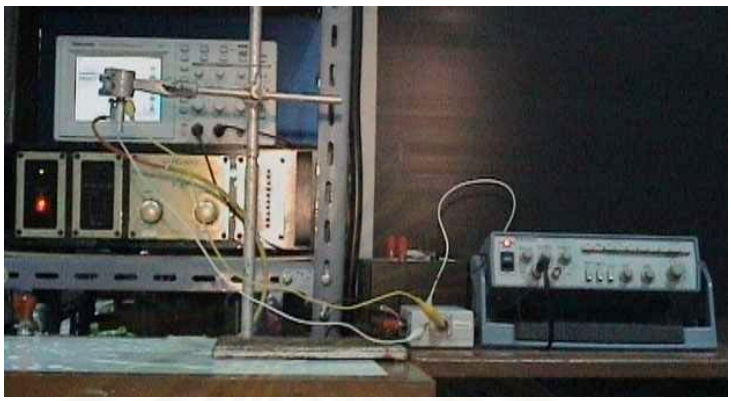
1) ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของคลื่นเหนือเสียง กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของสเปรย์ที่ได้
2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของคลื่นเหนือเสียง กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของสเปรย์ที่ได้
3) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลว กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของสเปรย์ที่ได้
4) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของสเปรย์ที่ได้
5) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของสเปรย์ที่ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

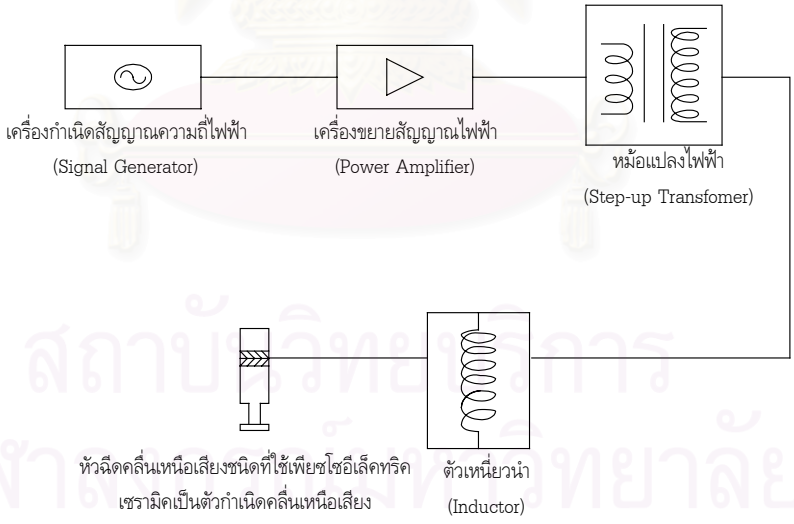
6.1.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) นำหัวฉีดมาประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.1
2) ทำการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.53, 39.8, 47.17 และ 56.49 กิโลเฮิร์ซ โดยปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2 วัตต์ และอัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที
3) ทำการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ แต่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวฉีดเป็น 4, 6 และ 8 วัตต์ ตามลำดับ โดยอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที
4) ทำการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ โดยปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ และเปลี่ยนอัตราการไหลของของเหลวเป็น 85, 146 และ 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ
5) ทำการทดลองเหมือนกับข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนหัวฉีดเป็นชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ และใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4 วัตต์
6) ทำการวัดขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ แต่เปลี่ยนของเหลวที่ใช้เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5%, สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%, น้ำ + สารลดแรงตึงผิว, กลีเซอรอล (Glycerol) และน้ำมันพืช ตามลำดับ โดยปรับให้อัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 *ภาพถ่ายแสดงชุดอุปกรณ์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*



รูปที่ 6.2 *ไดอาแกรมแสดงชุดอุปกรณ์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

6.1.4 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

6.1.4.1 สภาวะในการทดลอง

สำหรับหัวฉีดชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ตัวแปรที่จะศึกษาผลที่มีต่อขนาด, การกระจายขนาด และรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้ คือ ขนาดของเรโซ-เนเตอร์ (Resonator), ความดันก๊าซ และอัตราการไหลของของเหลว

ตัวแปรที่ทำการทดลอง: ตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษา สรุปได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 *แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่จะทำการศึกษา*

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าตัวแปรที่ปรับเปลี่ยน
1) ขนาดของเรโซเนเตอร์[ก] (มิลลิเมตร)	ความลึกของเรโซเนเตอร์, b = 1.5, 3 และ 4.5 ความกว้างของเรโซเนเตอร์, D_1 = 2.0, 2.5 และ 3.0
2) ความดันอากาศ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)	2, 2.5 และ 3
3) อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)	833, 2000, 4233 และ 7600 (50, 120, 254, และ 456) [ข]
4) คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ โดยเปลี่ยนของเหลวที่ใช้รวม 5 ชนิด [ค]	น้ำ, สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%, กลีเซอรอล และ น้ำมันพืช

หมายเหตุ: ก) ได้แสดงหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกันในตารางที่ 6.4
ข) ตัวเลขภายในวงเล็บมีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อนาที
ค) ได้แสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในตารางที่ 6.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.4 *แสดงหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดของเรโซ-เนเตอร์แตกต่างกัน*

หัวฉีด (เบอร์)	ความกว้างของหัวฉีดเรโซเนเตอร์, D_1 (มิลลิเมตร)	ความลึกของหัวฉีดเรโซเนเตอร์, b (มิลลิเมตร)
1	2	1.5
2	2.5	1.5
3	3	1.5
4	2	3
5	2.5	3
6	3	3
7	2	4.5
8	2.5	4.5
9	3	4.5
10	2	6
11	3	6

ตารางที่ 6.5 *ตารางแสดงคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

ลำดับ	ชนิดของของเหลว	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/เมตร)	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1.	น้ำ	72.18	0.96	1000
2.	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	83.21	1.42	1270
3.	น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%	52.28	4.34	1179
4.	กลีเซอรอล (glycerol)	63.11	65	1260
5.	น้ำมันพืช	27.09	42	850

ความสัมพันธ์ที่จะทำการศึกษา: จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเรโซเนเตอร์ (Resonator) กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของการสเปรย์ที่ได้
2) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซ กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของการสเปรย์ที่ได้
3) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลว กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของการสเปรย์ที่ได้
4) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ กับขนาดของหยดละอองและลักษณะของการสเปรย์ที่ได้

6.1.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) ออกแบบและทดสอบหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์ (Resonator) ต่างๆกัน
2) ทำการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดขนาดต่างๆ โดยปรับให้ความดันก๊าซเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (254 มิลลิลิตรต่อนาที)
3) ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนความดันก๊าซเป็น 2.5 และ 3.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
4) ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 2 โดยปรับให้ความดันก๊าซเท่ากับ 2.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเปลี่ยนอัตราการไหลของของเหลวเป็น 833, 2000 และ 7600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (50, 120, และ 456 มิลลิลิตรต่อนาที)
5) ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนของเหลวที่ใช้เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25%, น้ำเชื่อมเข้มข้น 70%, กลีเซอรอล 87% และ น้ำมัน ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 การทดลองวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด

ในการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงโม่ สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องสโมคโอพาซิตี้มิเตอร์ (Smoke Opacity Meter) หรือการใช้เครื่องวัดความเข้มข้นฝุ่นแบบความเข้มข้นสูง (High Volume Sampler) โดยแต่ละอุปกรณ์มีรายละเอียดดังนี้

6.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของฝุ่น

6.2.1.1 High Volume Sampler เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของฝุ่นที่แขวนลอยในบรรยากาศ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ตู้โครง ตัววางกระดาษกรอง กระดาษกรอง ปั๊มลม และตัววัดอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 6.3 หลักการทำงานคือ การดูดลมโดยผ่านกระดาษกรอง อากาศที่มีฝุ่นที่แขวนลอยในบรรยากาศจะถูกดูดลอดขอบของตู้ไปติดอยู่บนกระดาษกรอง นำกระดาษกรองที่ได้ไปชั่งแล้วหารด้วยปริมาตรอากาศทั้งหมดที่ผ่านเครื่อง ซึ่งอ่านได้จากตัววัดอัตราการไหล ก็จะได้ความเข้มข้นฝุ่นในบรรยากาศดังสมการที่ 6.1 โดยปกติจะทำการวัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในที่ที่มีความเข้มข้นสูงมากอาจมีการเปลี่ยนกระดาษกรองหลายครั้งใน 24 ชั่วโมง เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันและมอเตอร์ไหม้

$$\text{ความเข้มข้นฝุ่น} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง} - \text{น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง}}{\text{ปริมาตรอากาศทั้งหมด}} \quad \ldots 6.1$$

รูปที่ 6.3 *ภาพถ่ายของเครื่อง High Volume Sampler*

6.2.1.2 Smoke Opacity Meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นฝุ่นในบรรยากาศซึ่งสามารถวัดแล้วรู้ผลได้ทันที และสามารถวัดความเข้มข้นของฝุ่นในขณะใดขณะหนึ่งได้ อาศัยหลักการของแสง โดยจะมีตัวปล่อยแสงและรับแสงอยู่คนละด้านและมีระยะห่างที่แน่นอน การวัดจะปล่อยให้อากาศที่มีฝุ่นแขวนลอยผ่านระหว่างตัวรับและตัวปล่อยแสงนี้ ทำให้แสงที่ปล่อยออกมาตกยังตัวรับน้อยลง ตัวรับก็จะไปวิเคราะห์และแสดงผลออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง

<u>รูปที่ 6.4</u> *ภาพถ่ายของเครื่อง Smoke Opacity Meter*

เนื่องจากเครื่อง High Volume Sampler เป็นเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก จึงวัดได้เพียงบางจุดที่สามารถนำเครื่องไปตั้งเท่านั้น ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกใช้เครื่อง Smoke Opacity Meter ในการวัดความเข้มข้นของฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน ซึ่งวัดความเข้มข้นของฝุ่นออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง สามารถวัดแล้วรู้ค่าได้ทันที สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและง่ายต่อการตรวจวัด โดยจะได้ทำการสอบเทียบ (calibrate) ค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับค่าน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ ในภายหลัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.2 สภาพพื้นที่ที่ทำการตรวจวัด

ได้ทำการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นที่โรงโม่หินศิลาเลิศจิต ซึ่งตั้งอยู่ที่ ต.หน้าพระลาน จ.สระบุรี ในช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัดเป็นช่วงฤดูหนาว ไม่มีปัญหาความชื้นจากฝน แต่ลักษณะลมจะมีทิศทางแปรปรวนค่อนข้างมาก ทำการตรวจวัดในวันที่ 21 - 22 พฤศจิกายน พ.ศ.2543 โดยในตอนแรกได้ทำการตรวจวัดฝุ่นที่โรงโม่หิน 1 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกจากตะแกรงคัดหินขั้นสุดท้าย เพื่อลำเลียงหินไปยังกองหินเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 จากรูปจะเห็นได้ว่า สายพานตั้งอยู่ในบริเวณที่เปิดโล่ง และไม่มีระบบครอบสายพานเพื่อควบคุมการฟุ้งกระจายของฝุ่น อีกทั้งยังมีฝุ่นจากบริเวณรอบข้างพัดผ่านบริเวณเหนือสายพานเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อทำการวัดความเข้มข้นของฝุ่นในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์และในขณะที่เปิดสเปรย์ พบว่าค่าปริมาณฝุ่นที่วัดได้น่าจะมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจาก

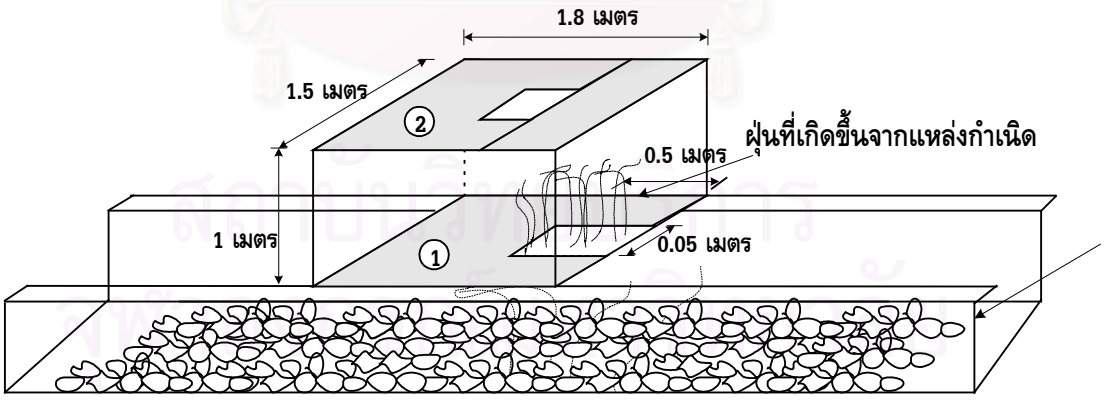
- ในการวัดปริมาณฝุ่นในที่เปิดโล่งไม่สามารถควบคุมฝุ่นที่เกิดจากระบบที่อยู่ข้างเคียงได้ โดยเฉพาะในขณะที่ทำการวัดนั้นมีกระแสลมแรงและแปรปรวนมาก จนทำให้ค่าปริมาณฝุ่นที่วัดได้ไม่ใช่ค่าปริมาณฝุ่นที่เกิดจากจุดที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น แต่จะมีปริมาณฝุ่นที่เกิดจากระบบข้างเคียงรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อทำการทดลองวัดปริมาณฝุ่นขณะที่เปิดสเปรย์ จึงไม่สามารถบอกได้ว่าค่าความเข้มฝุ่นที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นผลมาจากการฉีดพ่นละอองน้ำ
- เนื่องจากหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีขนาดเล็กมาก การฉีดพ่นในที่เปิดโล่งจะทำให้ทั้งหยดน้ำและอนุภาคฝุ่นที่อยู่ในบรรยากาศไหลไปตามกระแสลม อนุภาคฝุ่นและหยดน้ำจึงไม่สัมผัสกันแบบสวนทางกันแต่จะไหลตามกันแทน
- ไม่สามารถบอกได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงที่อ่านได้จากเครื่อง Smoke Opacity Meter เป็นค่าความทึบแสงที่เกิดจากปริมาณฝุ่นหรือเกิดจากหยดละอองน้ำ เนื่องจากการฉีดพ่นละอองน้ำเพียงอย่างเดียวก็สามารถวัดค่าความทึบแสงได้เช่นเดียวกัน (ดังแสดงในภาคผนวก จ.1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

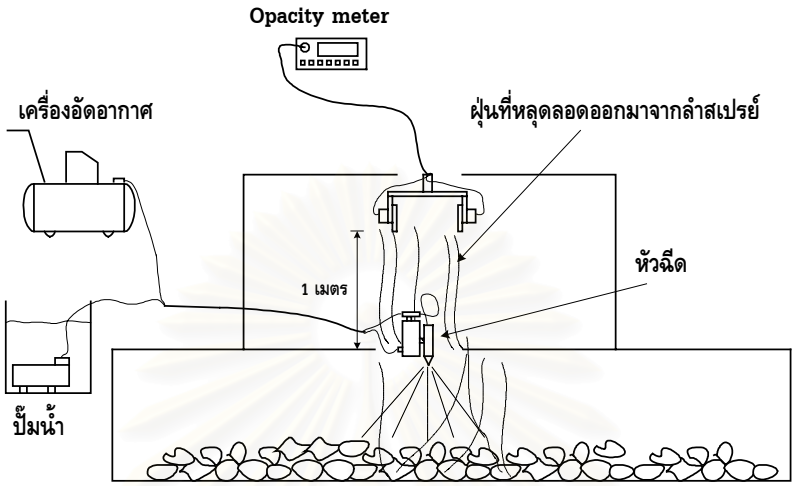
<u>รูปที่ 6.5</u> *ภาพถ่ายแสดงสภาพพื้นที่ของโรงโม่หิน 1 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกจากตะแกรงคัดหินขั้นสุดท้าย เพื่อลำเลียงหินไปยังกองหินเบอร์*

ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงในที่เปิดโล่ง จึงไม่สามารถนำผลการวัดความเข้มข้นของฝุ่นมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงได้ ผู้ทำการวิจัยจึงได้ดัดแปลงตำแหน่งที่จะทำการตรวจวัดให้เป็นระบบปิด โดยเลือกตรวจวัดฝุ่นจากแหล่งกำเนิดที่โรงโม่หิน 4 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอย ดังแสดงในรูปที่ 6.6 และได้ทำการดัดแปลงให้มีลักษณะเป็นระบบปิดดังรูปที่ 6.7 ซึ่งจะทำการปิดฝาไม้อัด 2 ชั้น โดยฝาชั้นแรกจะปิดโดยตรงเหนือสายพาน ซึ่งได้ทำการเจาะให้มีช่องว่างตรงกลางขนาดประมาณ 0.05×0.5 เมตร เพื่อเป็นช่องให้ฝุ่นจากสายพานสามารถลอดผ่านขึ้นมาได้ โดยขนาดของช่องที่เปิดไว้นี้ มีขนาดใหญ่เพียงพอที่พื้นที่สเปรย์ของหัวฉีดทุกหัวที่จะทำการทดสอบสามารถครอบคลุมพื้นที่กำเนิดฝุ่นได้ เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนระหว่างแหล่งกำเนิดที่ถูกควบคุมโดยสเปรย์น้ำกับที่ไม่มีการควบคุม มิฉะนั้นจะมีฝุ่นที่เข้ามาในระบบปิดที่ไม่ได้ผ่านการควบคุมปริมาณมากเกินไป จนอาจจะทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวฉีดแต่ละชนิดได้ โดยจะติดตั้งหัวฉีดไว้บริเวณเหนือสายพาน เพื่อทำให้อนุภาคฝุ่นและหยดละอองน้ำปะทะกันแบบสวนทางกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งการปิดฝาในชั้นนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้หยดละอองน้ำที่เกิดจากการสเปรย์ลอยขึ้นมาบริเวณที่ทำการตรวจวัดความเข้มข้นฝุ่น เมื่อทำการวัดความเข้มข้นของฝุ่นขณะที่เปิดสเปรย์ จึงมั่นใจได้ว่าค่าที่วัดได้เป็นค่าความเข้มข้นของฝุ่นเท่านั้น ส่วนฝาชั้นที่สอง จะมีลักษณะกล่องสี่เหลี่ยมที่ครอบระบบทั้งหมดมีขนาดประมาณ 1.5×1.8×1 เมตร จะทำหน้าที่ป้องกันลมและฝุ่นที่ถูกพัดมาจากระบบอื่น และได้ทำการเจาะช่องเล็กๆไว้บนฝาครอบด้านบน เพื่อสามารถสอดเครื่อง Smoke Opacity Meter เข้าไปภายในระบบเพื่อทำการวัดความเข้มข้นฝุ่นที่เกิดขึ้นภายในระบบได้

รูปที่ 6.6 *ภาพถ่ายแสดงสภาพพื้นที่แหล่งกำเนิดที่โรงโม่หิน 4 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอยของโรงโม่หิน*



รูปที่ 6.7 *แสดงระบบปิดที่ทำการตรวจวัดฝุ่น*



<u>รูปที่ 6.8</u> *แสดงตำแหน่งของหัวฉีด และ Opacity meter ที่ทำการติดตั้งไว้ในระบบที่จะทำการตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.3 ขั้นตอนการตรวจวัดหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด

โรงโม่หิน 1 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกจากตะแกรงคัดหินขั้นสุดท้าย เพื่อลำเลียงหินไปยังกองหินเบอร์ ในการตรวจวัดเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงกับหัวฉีดชนิดอื่น ทำได้โดยการวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์และขณะที่เปิดสเปรย์ ซึ่งผู้ทำการวิจัยได้เลือกใช้หัวฉีดที่ใช้กันอยู่จริงในโรงโม่หินจำนวน 4 หัว มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.9 เพื่อทำการเปรียบเทียบกับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่สร้างขึ้น โดยหัวฉีดแต่ละหัวเป็นหัวฉีดประเภทที่ต้องอาศัยความดันของของเหลวเพื่อทำให้เกิดการฉีดพ่น

รูปที่ 6.9 *แสดงลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน*

ในการตรวจวัดหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น จะทำการตรวจวัดความเข้มฝุ่นที่สภาวะต่างๆกัน โดยใช้เครื่อง Smoke Opacity Meter ตรวจวัดในแต่ละจุด จุดละ 7 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

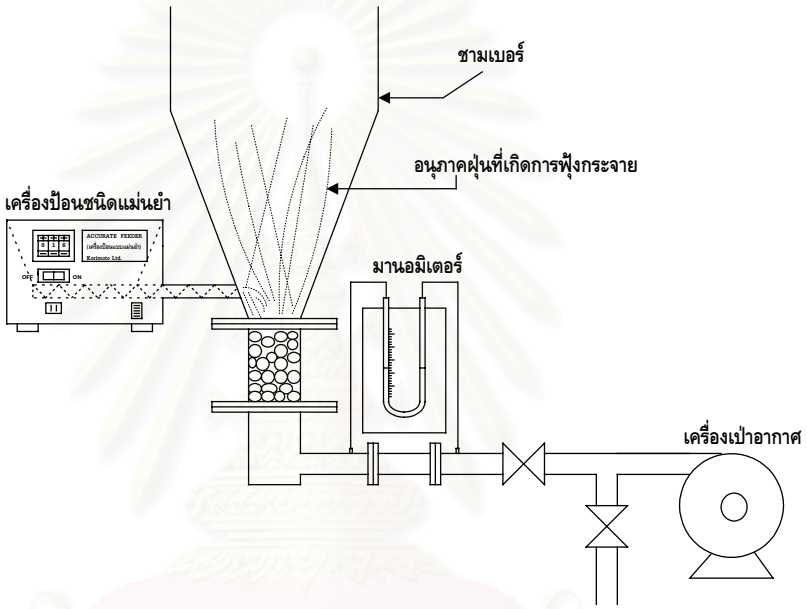
6.2.4 การสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ

ทำได้โดยการนำเครื่อง Smoke Opacity Meter (ซึ่งตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง) ไปทำการตรวจวัดฝุ่นในเวลาเดียวกันกับที่ตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นด้วยเครื่อง High Volume Sampler (ซึ่งตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นออกมาในรูปของน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ) ดังที่ได้แสดงรายละเอียดวิธีการวัดไว้ในหัวข้อที่ 6.2.1.1 แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างกัน แต่เนื่องจากเครื่อง High Volume Sampler มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และต้องทำการวัดอย่างต่อเนื่อง จึงไม่สะดวกที่จะนำไปวัดในโรงโม่หิน ผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการทดลองสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดในการทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคฝุ่น ซึ่งมีรายละเอียดในการทดลองดังต่อไปนี้

6.2.4.1 อุปกรณ์

1) ชุดอุปกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบด ใช้ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคฝุ่น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.10 ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักคือ
   - เครื่องเป่าอากาศ (Blower) เป็นแบบริงโบลเวอร์ (Ring Blower) ขนาด 1 แรงม้า ความเร็วรอบ 3,450 รอบต่อนาที อัตราการไหลอากาศสูงสุด 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ให้ความดันสูงสุด 1,500 มิลลิเมตร
   - มานอมิเตอร์ ทำจากแท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ดัดงอเป็นรูปตัวยูและบรรจุน้ำภายใน ใช้สำหรับวัดความดันลดของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านรูของแผ่นออริฟิซที่ได้ติดตั้งไว้ภายในท่อในลักษณะขัดขวางการไหลของอากาศภายในท่อ โดยแสดงออกมาในลักษณะของผลต่างความสูงของระดับน้ำในท่อรูปตัวยู
   - ชามเบอร์ (Chamber) ทำจากอะคิริค ประกอบด้วยภาชนะที่เตรียมอากาศเข้า ซึ่งภายในบรรจุเม็ดลูกแก้วเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายอากาศอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของภาชนะ, แอกซ์แพนชัน ชามเบอร์ (expansion chamber) และส่วนที่เป็นทรงกระบอกตรง
2) เครื่องป้อนชนิดแม่นยำ (Accurate Feeder) รุ่น 102 ผลิตโดยบริษัท KURIMOTO Ltd. ใช้สำหรับป้อนอนุภาคฝุ่น มีลักษณะเป็นถังสแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมพร้อมฝาปิด ภายในประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนฮอบเปอร์ที่ทำจากพีวีซีซึ่งผนังสามารถเคลื่อนที่ได้ เพื่อลดการสะสมของอนุภาค และส่วนที่เป็นสกรู (Helix Screw) ทำจากสแตนเลสเช่นกันใช้สำหรับผ่านอนุภาค

3) Smoke Opacity Meter ใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง โดยตรวจวัดที่ระยะห่าง 1 เมตร จากขอบจุดกำเนิดฝุ่น
4) High Volume Sampler ใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำหนักของฝุ่น/ปริมาตรอากาศ โดยตั้งให้ห่างจากแหล่งกำเนิด 1 เมตร
5) เครื่องชั่ง 4 ทศนิยมตำแหน่ง



<u>รูปที่ 6.10</u> *แสดงชุดอุปกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในการทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่น*

6.2.4.2 สภาวะในการทดลอง

ในการทดลองเพื่อสอบเทียบค่าเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ ตัวแปรที่สำคัญในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวก็คือ ความเข้มข้นของฝุ่น

ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ความเข้มข้นฝุ่น : การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนฝุ่นต่ออัตราการไหลของลมในระบบ มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความเข้มข้นของฝุ่น ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดที่อัตราการป้อนฝุ่น 3 ค่า คือ 1.12, 1.98 และ 2.67 กรัมต่อวินาที โดยปรับค่าอัตราการไหลของลมในระบบ 2 ค่า คือ 1.2 และ 2.4 เมตรต่อวินาที รวมเป็นค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ต่างกัน 6 ค่า

ความสัมพันธ์ที่ทำการศึกษา : จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆดังนี้

1) หาปริมาณความเข้มข้นฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง ที่ความเข้มข้นฝุ่นต่างๆกัน
2) หาปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ ที่ความเข้มข้นฝุ่นต่างๆกัน
3) หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง กับ น้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ

6.2.4.3 ขั้นตอนในการทดลอง

ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ สามารถจำแนกขั้นตอนการทดลองหลักออกเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนในการทดลองหาคุณสมบัติของฝุ่น และขั้นตอนในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ

- **ขั้นตอนในการทดลองหาคุณสมบัติของฝุ่น**

1) นำตัวอย่างฝุ่นมาหาค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลัก (Flowability and Floodability Index) โดยใช้เครื่องทดสอบลักษณะของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester) โดยทำการวัดค่ามุมสงบ, มุมหลังตก, มุมบนพายตัก, ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม, ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด, ค่าความเกาะกัน และค่าการแผ่กระจาย จากนั้นเครื่องจะทำการคำนวณค่ามุมผลต่าง และค่าความอัดตัว แล้วประเมินค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลัก ซึ่งแสดงผลออกมาทางหน้าจอของเครื่อง
2) ทำการทดลองเพื่อหาค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลักซ้ำอีก 5 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย

อนึ่งในการทดลอง จะเลือกใช้ค่าความเกาะกัน (Cohesiveness) แทนการใช้ค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity) เนื่องจากฝุ่นที่ใช้มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กไม่ใช่เกรนูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **ขั้นตอนในการทดลองสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ**

1) นำเครื่อง High Volume Sampler มาตั้งเก็บตัวอย่างฝุ่นให้ห่างจากแหล่งกำเนิดฝุ่นประมาณ 1 เมตร และนำเครื่อง Smoke Opacity Meter มาตั้งไว้ด้านข้างใกล้ชิดกันโดยมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเท่ากัน และให้อยู่ในระดับเดียวกันกับปีกสำหรับดูดลมเข้าเครื่อง
2) ชั่งน้ำหนักของกระดาษกรองที่ผ่านการอบด้วยซิลิกาเจลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาใส่เตรียมไว้ในเครื่อง High Volume Sampler
3) เปิดเครื่องเป่าอากาศ
4) ปรับวาล์วเครื่องเป่าอากาศเพื่อมีปรับความเร็วลมให้มีค่าเท่ากับ 1.2 เมตรต่อวินาที โดยสังเกตจากความสูงของมานอมิเตอร์ (ดูรายละเอียดการสอบเทียบได้ในภาคผนวกที่ ฉ)
5) เปิดเครื่องป้อนชนิดแม่นยำ เพื่อปรับควบคุมอัตราการป้อนฝุ่นให้มีอัตราการป้อนเท่ากับ 1.12 กรัมต่อนาที (ดูรายละเอียดการสอบเทียบได้ในภาคผนวกที่ ฉ)
6) เปิดเครื่อง High Volume Sampler และทำการเก็บตัวอย่าง
7) เปิดเครื่อง Smoke Opacity Meter ทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงพร้อมกับเครื่อง High Volume Sampler โดยวัดทุกๆ 10 วินาที
8) นำกระดาษกรองที่ได้จากการเก็บตัวอย่างฝุ่นด้วยเครื่อง High Volume Sampler ไปอบด้วยซิลิกาเจลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่ง หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ
9) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 – 8 โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนฝุ่นให้มีอัตราการป้อนเท่ากับ 1.98 และ 2.67 กรัมต่อวินาที ตามลำดับ
10) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1 – 9 โดยเปลี่ยนความเร็วลมให้มีค่าเท่ากับ 2.4 เมตรต่อวินาที
11) นำค่าที่ได้จากการทดลอง มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดฝุ่นด้วยการฉีดละอองน้ำ หัวฉีดที่เลือกใช้ควรมีลักษณะดังนี้

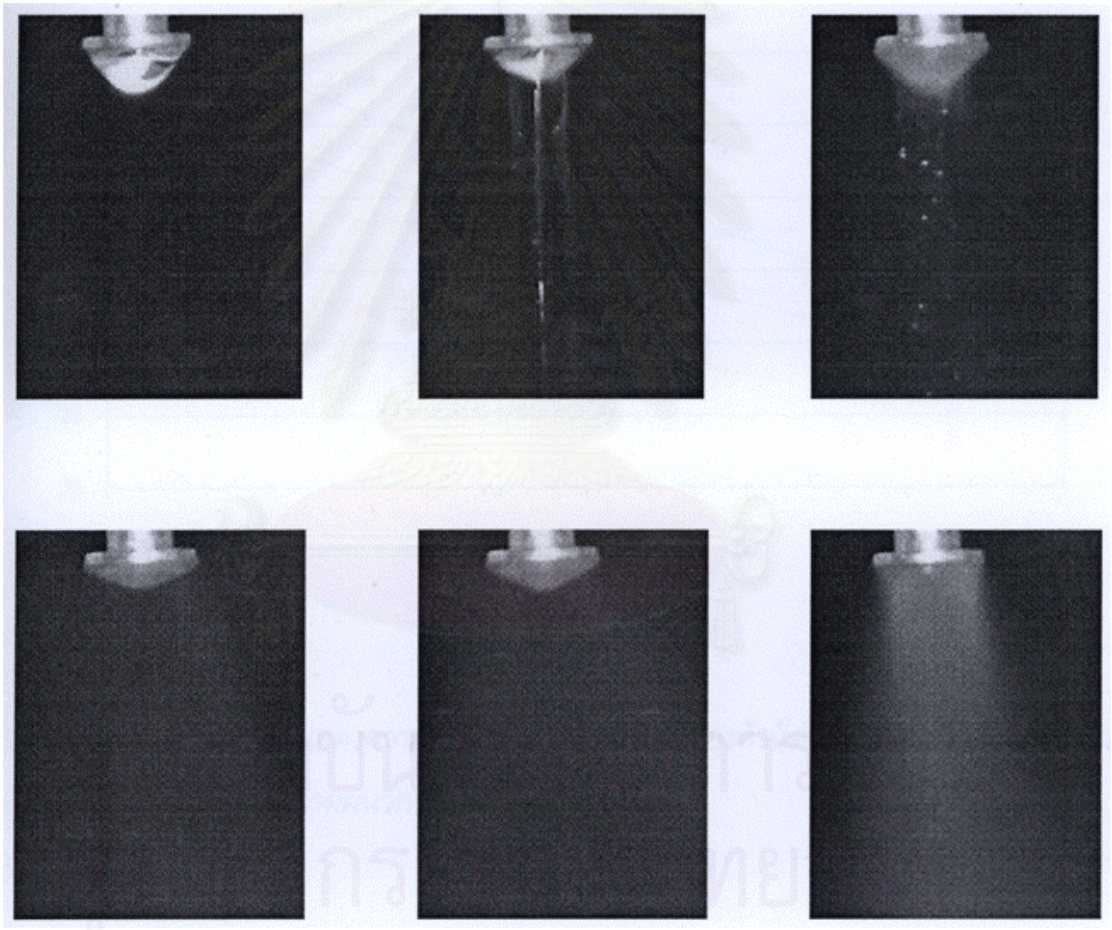
1. สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของละอองน้ำให้อยู่ในช่วงขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่ต้องการกำจัด เนื่องจากถ้าขนาดของหยดละอองน้ำใหญ่เกินไป ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลอ้อมรอบละอองน้ำไปได้โดยไม่มีการสัมผัสซึ่งกันและกัน แต่ถ้าขนาดของหยดละอองน้ำเล็กเกินไป การไหลของฝุ่นจะผลักไล่ละอองน้ำโดยไม่ได้ทำให้ฝุ่นเปียกแต่อย่างใด
2. สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงแคบ เนื่องจากกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่กว้างจะมีผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น [6]
3. มีพื้นที่ในการฉีดพ่นกว้าง ทำให้พื้นที่ที่หยดละอองน้ำสามารถครอบคลุมแหล่งกำเนิดฝุ่นมีมากขึ้น
4. รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดควรมีลักษณะเป็นกรวยเต็ม (full cone) เพื่อทำให้ฝุ่นและหยดละอองน้ำมีโอกาสที่จะสัมผัสกันมากขึ้นและทั่วถึงกัน

นอกจากนั้นแล้ว สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้หัวฉีด คือ 1) ควรเป็นหัวฉีดที่มีการใช้น้ำปริมาณน้อยโดยยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูง เนื่องจากการใช้น้ำปริมาณมากส่งผลเสียหลายประการ อาทิเช่น คุณภาพและสีของหิน, อาจก่อให้เกิดปัญหาทางเชิงกลเกี่ยวกับลูกปืนและจารบี, หินที่เปียกน้ำที่มีความคมกลิ้งอยู่เหนือสายพานจะทำให้สายพานเป็นรอยและอาจขาดได้ในเวลาอันสั้น, เกิดโคลนติดตามเครื่องมือและพื้นของโรงงานก่อความรำคาญให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน และยังก่อปัญหากับพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำน้อยอีกด้วย 2) ไม่เกิดปัญหาเรื่องอุดตัน 3) ใช้พลังงานน้อย 4) มีต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา บำรุงรักษาง่าย สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อการใช้งานได้สะดวก

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและศึกษาหัวฉีดที่ใช้เทคนิคของคลื่นเหนือเสียงในการผลิตละอองน้ำที่มีขนาดสม่ำเสมอกันและสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานต่างๆ โดยมีอัตราการไหลของน้ำต่ำ ซึ่งเนื้อหาของบทนี้ประกอบไปด้วยผลการศึกษาคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง และ ชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในส่วนท้ายของบทนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงกับหัวฉีดชนิดต่างๆที่มีการใช้งานในโรงโม่หินในปัจจุบัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน

7.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

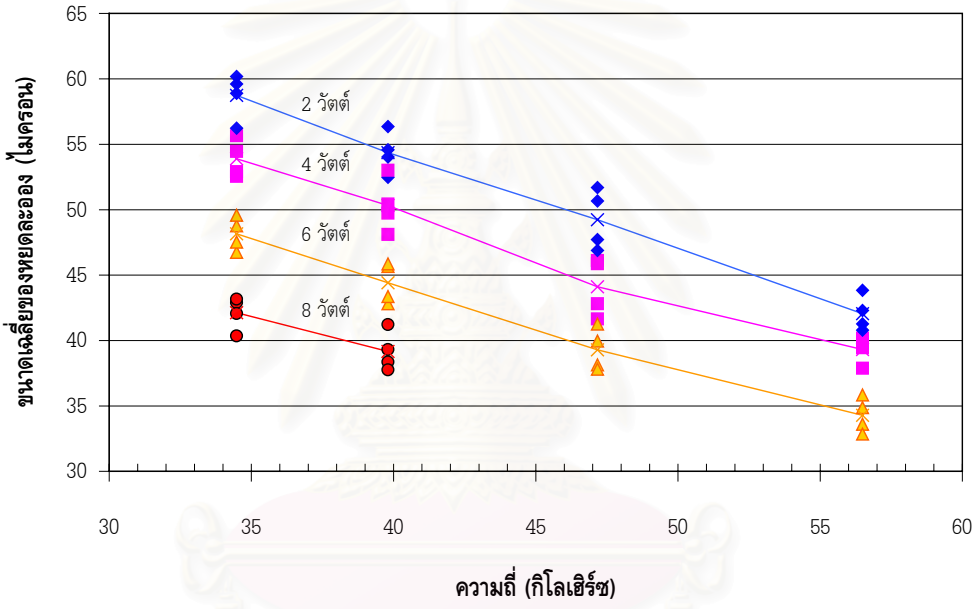
สำหับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียง และถ่ายทอดพลังงานนี้ไปยังฟิล์มของของเหลวที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง ทำให้ฟิล์มของของเหลวสั่นนำไปสู่การฉีดพ่นของของเหลวในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



<u>รูปที่ 7.1</u> *ภาพถ่ายแสดงลำดับกระบวนการฉีดพ่นของของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

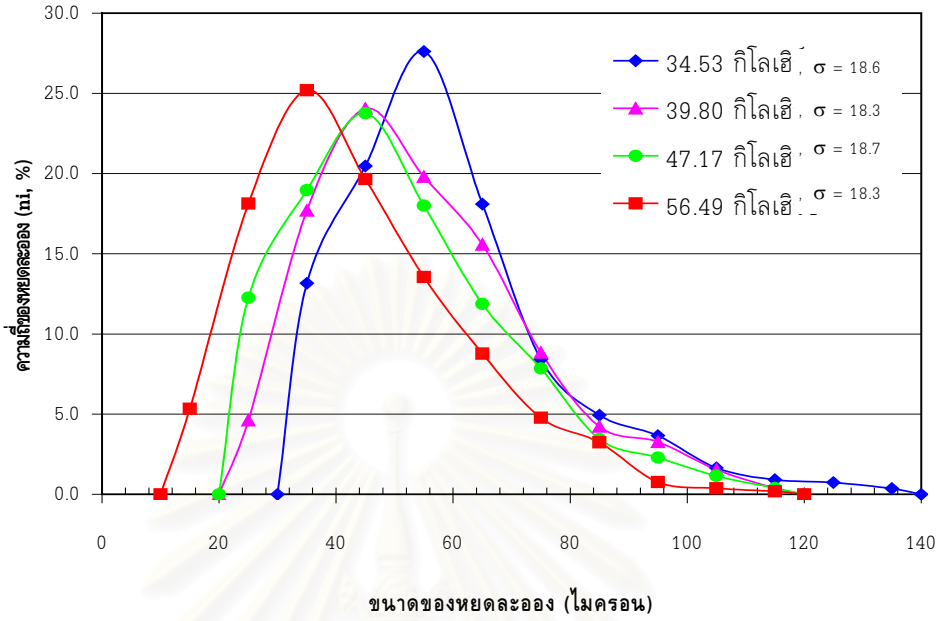
7.1.1 อิทธิพลของความถี่ต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของหัวฉีดกับขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ ใช้หัวฉีดที่มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีด เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 วัตต์ ตามลำดับ อัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูป 7.2 และ 7.3



รูปที่ 7.2 *กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของหัวฉีดกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.3 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกัน (โดยกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 2 วัตต์)*

จากรูปที่ 7.2 เมื่อพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 2 วัตต์ จะพบว่า เมื่อหัวฉีดมีความถี่สูงขึ้นจาก 34.43, 39.8, 47.17 และ 56.49 กิโลเฮิร์ซ จะทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำที่ได้มีขนาดเล็กลง คือ มีค่าเท่ากับ 58.78, 54.36, 49.24 และ 42.05 ไมครอน ตามลำดับ และมีแนวโน้มในลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 4, 6 และ 8 วัตต์ ตามลำดับ สำหรับที่ความถี่สูงกว่า 40 กิโลเฮิร์ซ ไม่สามารถป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่หัวฉีดที่ 8 วัตต์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.3 พบว่า การกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดแต่ละหัวมีการกระจายขนาดที่ใกล้เคียงกัน การที่หยดละอองน้ำมีขนาดเล็กลงเมื่อหัวฉีดมีความถี่สูงขึ้น เนื่องมาจาก ตามที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.2.2.1 เกี่ยวกับกระบวนการฉีดพ่นของของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดนี้ ซึ่งเกิดจากการให้กำลังไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของหัวฉีด ทำให้เกิดการสั่นสูงสุดที่ปลายของหัวฉีดพอดี และจะถ่ายทอดพลังงานนี้ให้กับฟิล์มของของเหลวที่อยู่ด้านหน้าทำให้ผิวหน้าของฟิล์มของของเหลวสั่นและเกิดเป็นคลื่นเล็กๆ (Capillary wave) ที่ไม่เสถียร ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงร่างตาข่าย ดังแสดงในรูปที่ 5.8 การฉีดพ่นของละอองของของเหลวเกิดจากการหลุดออกจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียรเหล่านี้ การเพิ่มความถี่จะทำให้ความยาวคลื่นลดลง ซึ่งจะทำให้ความยาวคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียรลดลงไปด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเพิ่มความถี่ทำให้ขนาดความกว้างและความยาวของแต่ละช่องของโครงร่างตาข่ายมีขนาดเล็กลง

ขนาดของหยดละอองน้ำที่หลุดออกจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียรนี้จึงลดลงไปด้วย ดังนั้นขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์จึงมีขนาดลดลง เมื่อความถี่ของหัวฉีดสูงขึ้น

จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Berger [17], Lacas [10] และ Daniel [9] ซึ่งพบว่าขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำจะมีขนาดลดลงเมื่อหัวฉีดมีความถี่สูงมากขึ้น ดังตัวอย่างการทดลองของ Daniel ที่ได้ทำการศึกษาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 โดยใช้หัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกันจำนวน 4 หัว คือ 32.8, 41.17, 49.9, 57.6 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ การทดลองกระทำที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 110 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้เครื่อง Malvern 2600 ในการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้ พบว่าขนาดของหยดละอองน้ำจะมีขนาดเล็กลงเมื่อความถี่ของหัวฉีดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 7.1

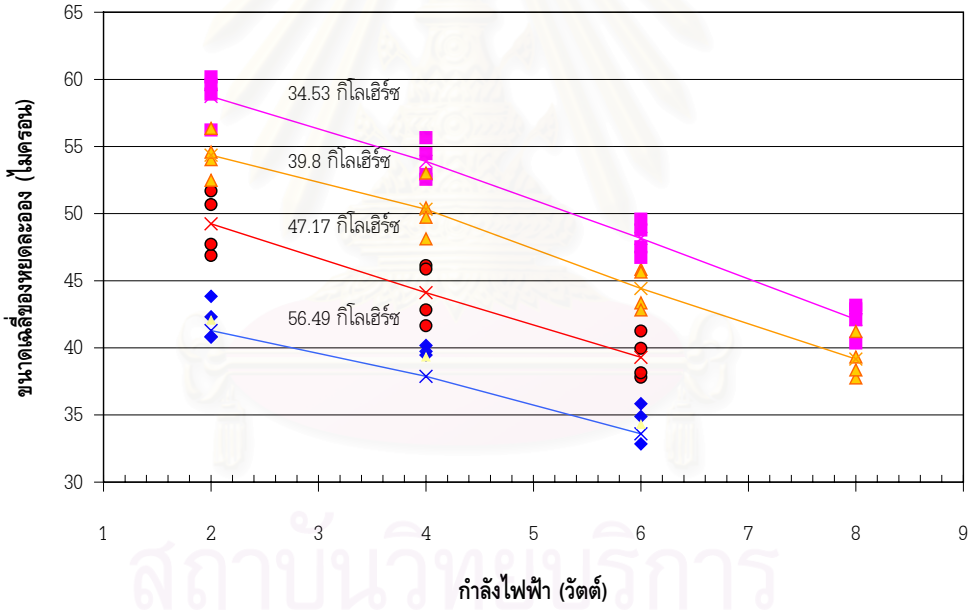
ตารางที่ 7.1 *แสดงอิทธิพลของความถี่ที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9]*

ความถี่ของหัวฉีด (กิโลเฮิร์ซ)	D_{32} (ไมครอน)	D_{42} (ไมครอน)	D_{51} (ไมครอน)	D_{61} (ไมครอน)
32.8	37.71	41.54	33.55	36.67
41.1	33.68	36.42	31.96	34.37
49.9	30.96	32.28	31.91	33.61
57.6	28.22	31.25	28.13	31.02

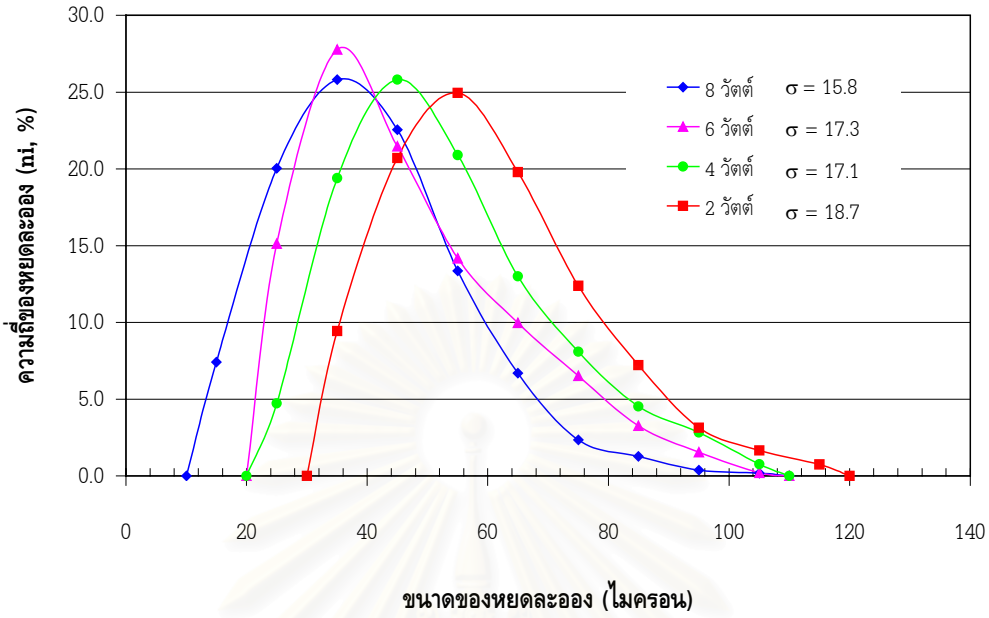
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.1.2 อิทธิพลของความเข้มของคลื่นเหนือเสียงต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดหยดละอองน้ำ

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของคลื่นเหนือเสียงกับขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ ทำได้โดยการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงจากการปรับกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีด หัวฉีดที่ใช้มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยหัวฉีดที่ใช้มีความถี่ค่า เท่ากับ 34.53, 39.8, 47.17, และ 56.49 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ และอัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.4 และ 7.5



รูปที่ 7.4 *กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเสียงกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)*

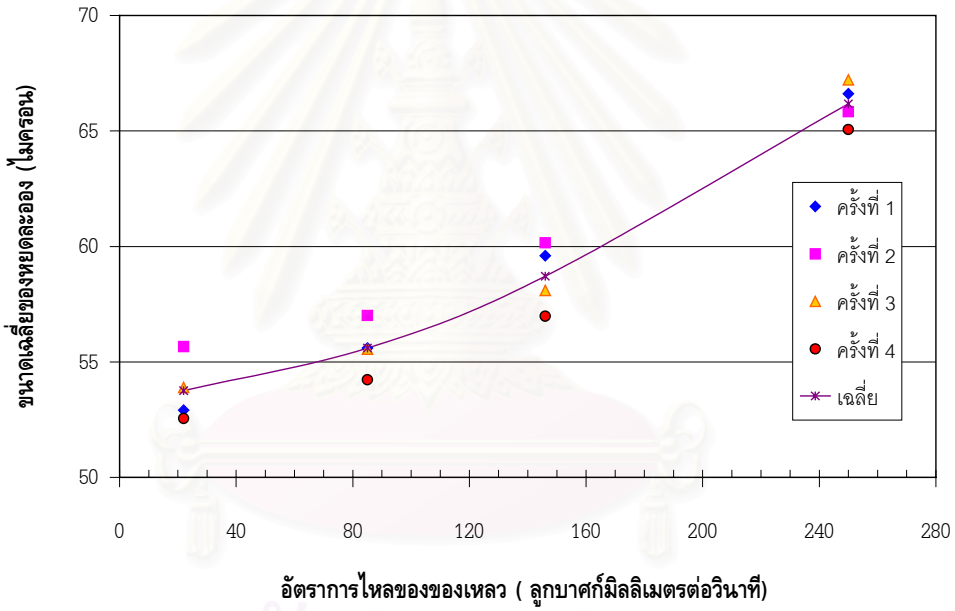


<u>รูปที่ 7.5</u> *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่ 34.53 กิโลเฮิร์ซ เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าต่างกัน*

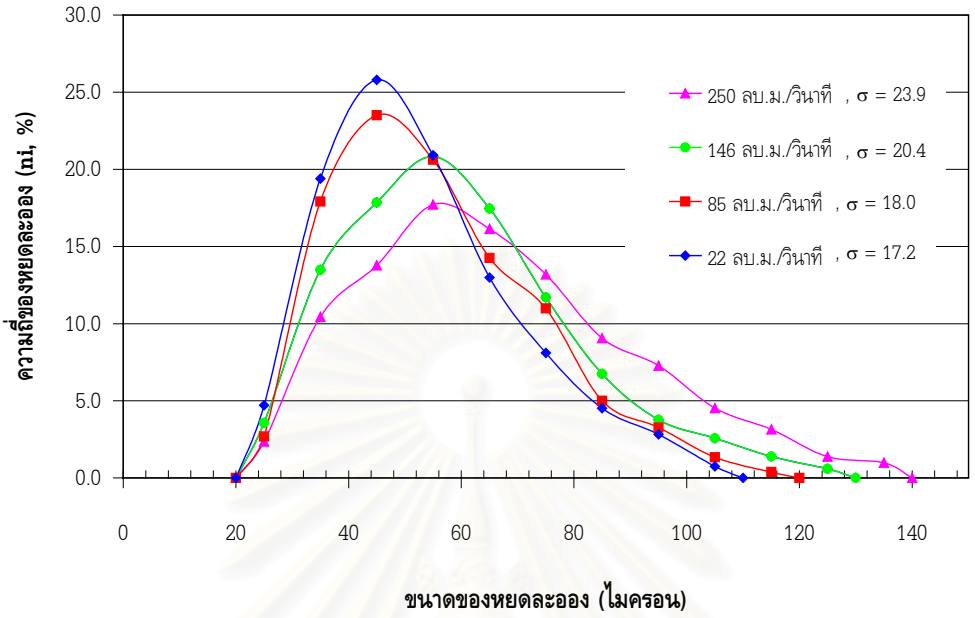
การเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับหัวฉีดเป็นการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงให้สูงขึ้น จากรูปที่ 7.4 เมื่อพิจารณาหัวฉีดที่ใช้มีความถี่เท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ จะพบว่า เมื่อให้ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงแก่หัวฉีดสูงขึ้นจาก 2, 4, 6 และ 8 วัตต์ จะมีผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำมีค่าลดลง คือมีค่าเท่ากับ 58.73, 53.89, 48.15 และ 42.13 ไมครอน ตามลำดับ และมีแนวโน้มในลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อหัวฉีดที่ใช้มีความถี่เท่ากับ 39.8, 47.17 และ 56.49 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความเข้มของคลื่นเหนือเสียงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.5 พบว่า เมื่อความเข้มของคลื่นเหนือเสียงมีค่าสูงขึ้น การกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จะมีการกระจายขนาดที่แคบลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มเสียงเป็นการเพิ่มแอมปลิจูดของการสั่นของหัวฉีดให้สูงขึ้น ส่งผลทำให้แอมปลิจูดของการสั่นของคลื่นที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์มของของเหลวเพิ่มขึ้น และทำให้ยอดคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียรมีขนาดเล็กลง ดังนั้นขนาดของหยดละอองน้ำที่เกิดจากการหลุดออกจากยอดคลื่นที่ไม่เสถียรนี้จึงมีขนาดเล็กลง เมื่อแอมปลิจูดของการสั่นมีค่าสูงขึ้น สเปรย์ที่ได้จึงมีความหนาแน่นของหยดละอองน้ำมากกว่าสเปรย์ที่เกิดจากการให้ความเข้มเสียงต่ำกว่าหรือมีแอมปลิจูดต่ำกว่า

7.1.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ ใช้หัวฉีดที่มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความถี่ของหัวฉีดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ และกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22, 85, 146 และ 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.6 และ 7.7



รูปที่ 7.6 *กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)*



รูปที่ 7.7 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าต่างกัน*

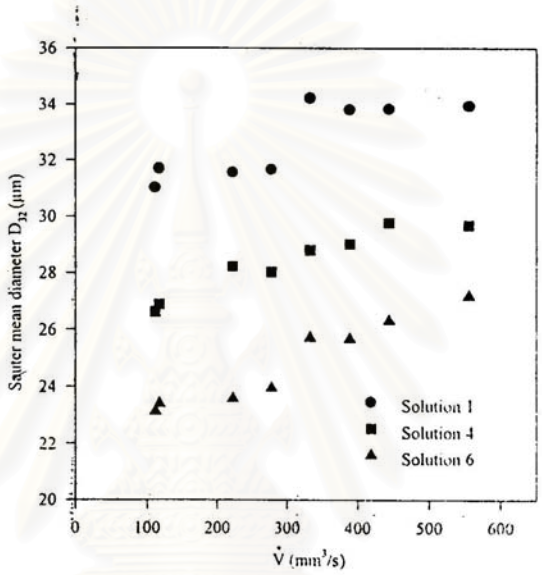
เมื่อพิจารณารูปที่ 7.6 จะพบว่า เมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มสูงขึ้นจาก 22, 85, 146 และ 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำมีแนวโน้มว่าจะมีค่าสูงขึ้น คือมีค่าเท่ากับ 53.7, 55.9, 58.7 และ 66.2 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า โดยเฉพาะที่อัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูง ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้จะมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.8 พบว่า เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงขึ้น การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะมีการกระจายขนาดที่กว้างขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวทำให้สเปรย์ที่ได้มีความหนาแน่นของหยดละอองมากขึ้น จึงเกิดการรวมตัวกันของหยดละอองที่มีขนาดเล็กเป็นหยดละอองน้ำที่มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะเมื่อที่อัตราการไหลสูงขึ้น ความหนาแน่นของหยดละอองน้ำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย โอกาสที่หยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กจะรวมตัวกันจึงมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น

การเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวจะส่งผลทำให้ฟิล์มของของเหลว (Liquid Film) ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายของหัวฉีดหนาขึ้น พลังงานที่ให้กับหัวฉีดจึงต้องสูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของฟิล์มของของเหลวที่หนาขึ้นนี้ ลักษณะของสเปรย์ที่ได้จะมีความหนาแน่นของหยดละอองน้ำมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.8 และเมื่อให้อัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง หัวฉีดจะไม่สามารถสเปรย์ฟิล์มของของเหลวได้ทั้งหมด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดไม่

เพียงพอ หรืออาจเกิดจากความเร็วของของเหลวที่ป้อนเข้ามายังส่วนปลายของหัวฉีดที่บริเวณมีมากเกินไปกว่าที่จะแผ่ออกเป็นแผ่นฟิล์มของของเหลวได้ทั้งหมด ทำให้เกิดเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่หลุดออกมาจากปลายท่อส่งของเหลว และมีของเหลวบางส่วนเท่านั้นที่แผ่เป็นแผ่นฟิล์มได้ หัวฉีดจะสามารถสเปรย์ได้แต่ส่วนที่เป็นแผ่นฟิล์มเท่านั้น จากการทดลองสำหรับหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ พบว่า ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ อัตราการไหลสูงสุดของของเหลวที่สามารถให้กับหัวฉีดจะมีค่าเท่ากับ 450 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าแก่หัวฉีดสูงขึ้นเป็น 8 วัตต์ อัตราการไหลสูงสุดของของเหลวที่สามารถให้กับหัวฉีดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1750 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที

<u>รูปที่ 7.8</u> *ภาพถ่ายแสดงลักษณะของการสเปรย์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เมื่ออัตราการไหลของเหลวเพิ่มสูงขึ้น*

จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Daniel [9] Berger [17] และ Bindal [18] โดย Bindal [18] ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลของของเหลวที่อยู่ในช่วง 50 - 170 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และ Daniel [9] ได้ศึกษาอัตราการไหลของของเหลวที่อยู่ในช่วง 110 - 560 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความถี่ของหัวฉีดเท่ากับ 49.9 กิโลเฮิร์ซ แสดงผลการทดลองในรูปที่ 7.9 และ Berger [17] ได้ศึกษาที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 200 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และ 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 7.2



รูปที่ 7.9 *กราฟแสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9]*

โดย Solution 1 คือ เมทานอลบริสุทธิ์

Solution 4 คือ สารละลายเมทานอลเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก

Solution 6 คือ สารละลายเมทานอลเข้มข้น 64% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 7.2 *แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Berger [17]*

อัตราการไหลของของเหลว (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/วินาที)	**D_{10} (ไมครอน)**	**D_{20} (ไมครอน)**	**D_{30} (ไมครอน)**	**D_{32} (ไมครอน)**	**$D_{N,0.5}$ (ไมครอน)**
200	35	41	47	63	29
1000	43	50	57	74	37

โดยที่ D_{10} = ค่าขนาดเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean drop size)

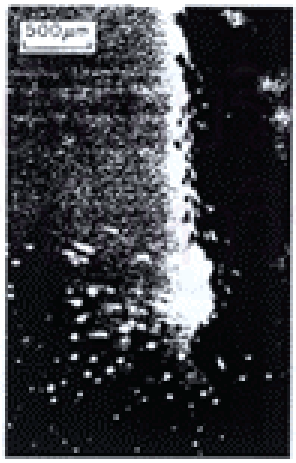
D_{20} = ค่าขนาดเฉลี่ยโดยพื้นที่หน้าตัด (area mean drop size)

D_{30} = ค่าขนาดเฉลี่ยโดยปริมาตร (volume mean drop size)

D_{32} = ค่าขนาดเฉลี่ยแบบ Sauter (Sauter mean diameter)

$D_{N,0.5}$ = number mean diameter

จากผลการทดลองทั้งสาม พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ขนาดของหยดละอองน้ำจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก 2 สาเหตุด้วยกันคือ สาเหตุที่หนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของหยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กกลายเป็นหยดละอองน้ำที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากที่อัตราการไหลของของเหลวสูงจะมีความหนาแน่นของหยดละอองน้ำสูง โอกาสที่หยดละอองน้ำขนาดเล็กจะรวมตัวกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่จึงมีมาก และสาเหตุที่สอง คืออาจเกิดจากปรากฏการณ์คาวิเทชั่น (Cavitation) เนื่องจากที่อัตราการไหลสูงจะทำให้ฟิล์มของของเหลวหนายิ่งขึ้น และต้องใช้พลังงานหรือความเข้มของคลื่นเหนือเสียงสูงในการที่จะทำให้เกิดการฉีดพ่นซึ่งเป็นสภาวะที่ง่ายต่อการเกิดคาวิเทชั่น จากการศึกษาของ Topp [19] โดยใช้กล้องถ่ายรูปที่มีกำลังขยายและความเร็วสูง พบว่า เมื่อหัวฉีดทำงานที่อัตราการไหลของของเหลวสูง ซึ่งจะทำให้ฟิล์มของของเหลวหนามากขึ้นและมีความเข้มของคลื่นเหนือเสียงสูง การฉีดพ่นของของเหลวจะไม่ได้เกิดจากการที่หยดละอองหลุดออกจากยอดคลื่นที่ไม่เสถียรเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่จะเกิดจากปรากฏการณ์คาวิเทชั่น ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ซึ่งจะทำให้เกิดหยดละอองน้ำที่มีขนาดใหญ่ด้วย การกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จึงไม่แน่นอนและกว้างกว่าปรกติ การป้องกันการเกิดคาวิเทชั่นอาจทำได้โดยการลดความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ ไม่ควรให้หัวฉีดทำงานที่อัตราการไหลสูงเนื่องจากจะทำให้ฟิล์มของของเหลวมีความหนาเกินไป หรือเพิ่มขนาดพื้นที่ของพื้นผิวที่ทำให้เกิดการฉีดพ่น (atomizing surface) เพื่อทำให้ฟิล์มของของเหลวมีความหนาน้อยลง เป็นต้น



<u>รูปที่ 7.10</u> *แสดงกระบวนการฉีดพ่นที่เกิดการหลุดออกจากยอดของคลื่นที่ไม่เสถียรและจากการเกิดคาวิเทชั่น*

7.1.4 รูปแบบของการสเปรย์

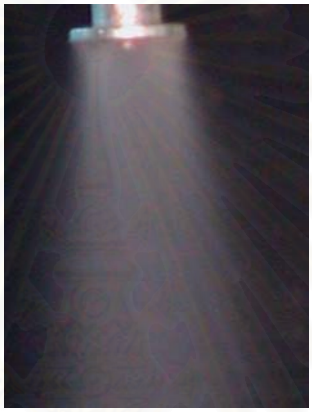
ในการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ได้ใช้หัวฉีดที่มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ที่มีความถี่แตกต่างกัน 4 หัว คือ 34.53, 39.8, 47.17 และ 56.49 กิโลเฮิร์ซ โดยปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2, 4, 6, และ 8 วัตต์ และอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้เท่ากับ 22, 65, 146 และ 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 *แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

ลำดับที่	ความถี่ของหัวฉีด (กิโลเฮิร์ซ)	อัตราการไหลของของเหลว (ลบ.มม./วินาที)	กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีด (วัตต์)	เส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ (มิลลิเมตร)
1	34.53	22	2	10
2	39.8	22	2	10
3	47.17	22	2	10
4	56.49	22	2	10
5	34.53	22	4	10
6	34.53	22	6	10
7	34.53	22	8	10
8	34.53	65	2	10
9	34.53	146	2	13
10	34.53	250	2	15

รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 7.11 จากผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในตารางที่ 7.3 พบว่า เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของของเหลวและกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกันจะมีค่าเท่ากัน คือ มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร สังเกตได้ว่ามีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง เมื่อพิจารณาที่ความถี่ของหัวฉีดและอัตราการไหลของของเหลวคงที่ พบว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับหัวฉีดจะไม่มี

ผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์เช่นเดียวกัน แต่จะทำให้สเปรย์ที่ได้มีความหนาแน่นของหยดละอองมากขึ้น เนื่องจากหยดละอองที่ได้มีขนาดเล็กลง และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวให้สูงขึ้นเป็น 146 และ 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดกว้างขึ้นเล็กน้อย คือ มีค่าเป็น 13 และ 15 มิลลิเมตร

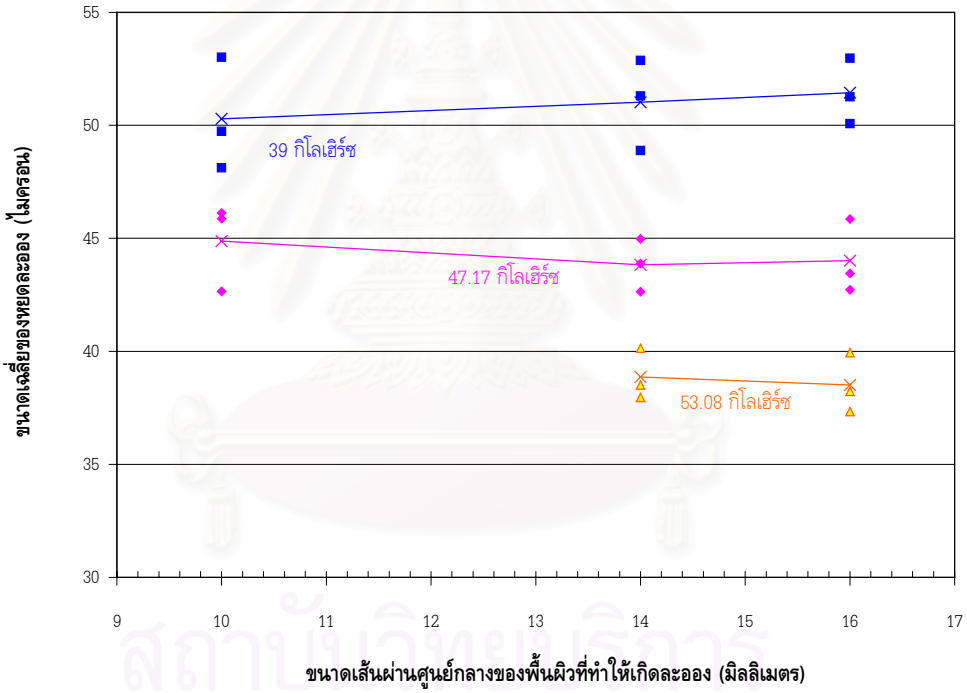


<u>รูปที่ 7.11</u> *ภาพถ่ายแสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

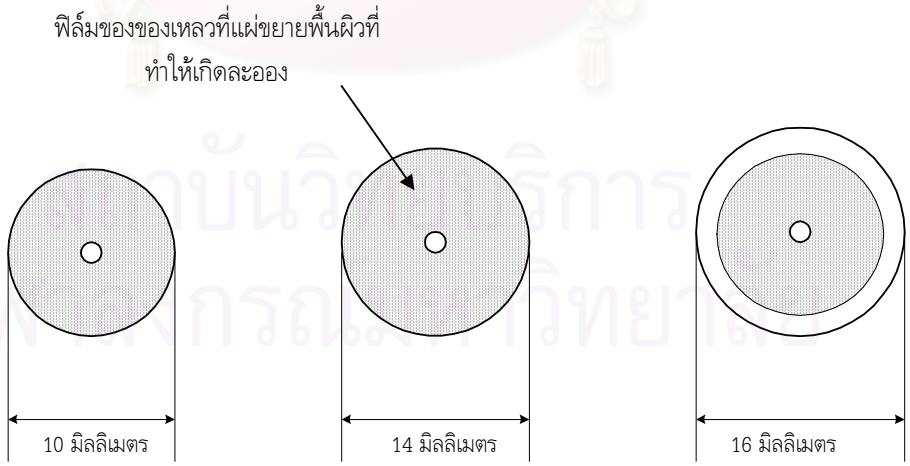
7.1.5 อิทธิพลของขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละออง และรูปแบบของการสเปรย์

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง กับขนาดเฉลี่ยของหยดละออง การกระจายขนาดของหยดละออง และรูปแบบของการสเปรย์ ได้ใช้หัวฉีดที่มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10, 14 และ 16 มิลลิเมตร โดยใช้หัวฉีดที่มีความถี่แตกต่างกัน 3 หัว คือ 39.8, 47.17 และ 53.08 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.12

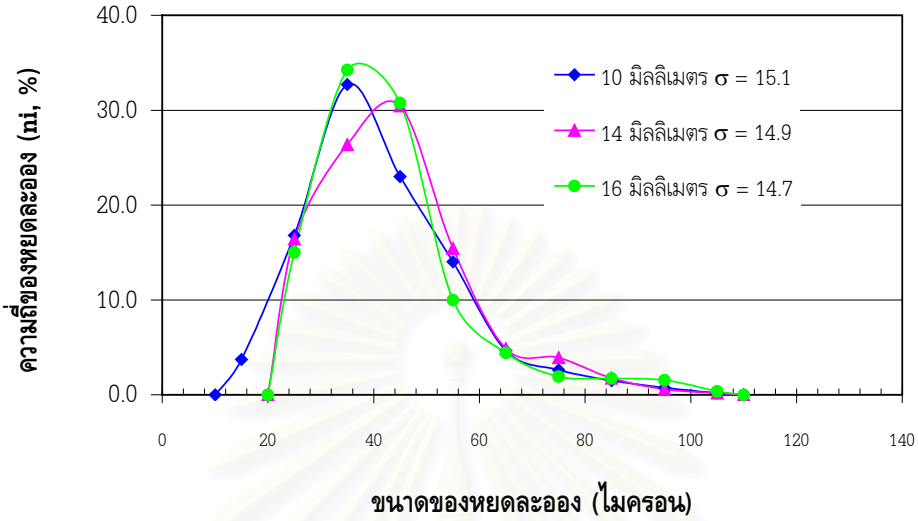


<u>รูปที่ 7.12</u> *กราฟผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์ของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง กับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)*

การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง จะทำให้แผ่นฟิล์มของของเหลว (Liquid Film) ที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองสามารถแผ่ขยายออกไปได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7.13 สเปรย์ที่ได้จึงมีขนาดกว้างขึ้นตามขนาดของแผ่นฟิล์มของของเหลวที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของการสเปรย์นั่นเอง ดังนั้นลักษณะของสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดที่มีขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองกว้างจึงมีรูปแบบการสเปรย์ที่กว้างมากกว่าหัวฉีดที่มีขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองแคบ จากรูปที่ 7.12 พบว่าเมื่อหัวฉีดมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเพิ่มมากขึ้น ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้ยังคงมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากถึงแม้ว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองจะเป็นการทำให้ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงลดน้อยลง แต่การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองก็จะช่วยทำให้ฟิล์มของของเหลวบางลงด้วยซึ่งทำให้ง่ายต่อการฉีดพ่น อย่างไรก็ตามจากการสังเกตพบว่าเมื่อพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 16 มิลลิเมตร แผ่นฟิล์มของของเหลวไม่สามารถแผ่ขยายออกไปได้ทั่วทั้งแผ่น และจะไม่แผ่ขยายมากขึ้นแม้ว่าจะเพิ่มขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองให้สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดที่ได้จากหัวฉีดที่มีขนาดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองแตกต่างกัน เมื่อหัวฉีดมีความถี่เท่ากับ 47.17 กิโลเฮิร์ซ พบว่า การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นคือมีค่าเท่ากับ 10, 14 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะมีค่าการกระจายขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตฐานเท่ากับ 15.1, 14.9 และ 14.7 ตามลำดับ และมีแนวโน้มเช่นเดียวกันเมื่อเมื่อหัวฉีดที่ใช้มีความถี่เท่ากับ 39.8 และ 53.08 กิโลเฮิร์ซ (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ช.)



<u>รูปที่ 7.13</u> *แสดงการแผ่ขยายของฟิล์มของของเหลวเมื่อพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดใหญ่ขึ้น*



รูปที่ 7.14 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 47.17 กิโลเฮิร์ซ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีค่าแตกต่างกัน*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.1.6 อิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ ได้ใช้หัวฉีดที่มีขนาดของท่อส่งน้ำเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองมีขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความถี่ของหัวฉีดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 34.53 กิโลเฮิร์ซ และอัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7.4

<u>ตารางที่ 7.4</u> *แสดงอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่ผลต่อขนาดของหยดละออง (ดูรายละเอียดผลการทดลองได้ในภาคผนวก ช.)*

ลำดับ	ของเหลว	%โดยน้ำหนัก	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/เมตร)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ขนาดของหยดละออง (ไมครอน) ครั้งที่1	ขนาดของหยดละออง (ไมครอน) ครั้งที่2
1	น้ำ	100	0.96	72.18	1000	53.85	54.97
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5	1.21	74.62	1052	55.01	53.45
3	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	1.42	83.21	1270	50.32	49.22
4	น้ำเชื่อม	25	2.38	56.32	1075	48.11	50.03
5	น้ำเชื่อม	70	4.34	52.28	1179	44.97	43.81
6	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.01×10^{-4}	0.96	61.01	997.5	50.91	53.04
7	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	3.2×10^{-4}	0.96	45.68	997.4	47.48	45.21
8	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.28×10^{-3}	0.95	32.23	997.6	42.87	39.42
9	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	65	63.11	1260	ไม่สามารถฉีดพ่นได้	
10	น้ำมันพืช	100	42	27.09	850	ไม่สามารถฉีดพ่นได้	

จากตารางที่ 7.4 จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้มีผลต่อขนาดของหยดละอองที่ได้ เมื่อพิจารณาของเหลวที่ใช้มีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำมากๆ เช่น น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของหยดละอองที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าน้ำ เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวให้กับน้ำในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำให้ลดลง โดยคุณสมบัติอื่น เช่น ความหนืด และ ความหนาแน่นของสารที่ได้ยังคงคงที่ พบว่าขนาดของหยดละอองน้ำจะมีขนาดเล็กลงเมื่อของเหลวมีแรงตึงผิวลดลง และจากการสังเกตยังพบอีกว่าของเหลวที่มีความหนืดมากจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าหรือความเข้มเพื่อทำให้เกิดการฉีดพ่นของของเหลวมากกว่าของเหลวที่มีความหนืดน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวที่มีความหนืดสูงจะสามารถเคลื่อนที่ได้ยาก พลังงานที่ต้องใช้ให้ของเหลวเคลื่อนที่จึงมีค่าสูง ดังนั้นในการฉีดพ่นที่เกิดจากการใช้หัวฉีดชนิดนี้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูง จึงต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อทำให้ของเหลวที่หนืดนี้เกิดการสั่นสะเทือนจนทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ผิวหน้าของฟิล์มของของเหลว นำไปสู่การฉีดพ่นของของเหลวในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามพบว่า สำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า 40 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที หัวฉีดชนิดนี้จะไม่สามารถ

ฉีดพ่นได้ถึงแม้ว่าจะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วก็ตาม จึงอาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของของเหลวมีผลต่อการฉีดพ่นและขนาดของหยดละอองที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาวิจัยของ Daneil [9] โดยใช้เมทานอลผสมในน้ำในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 7.5 พบว่าคุณสมบัติของของเหลวมีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละออง โดยขนาดของหยดละอองที่ลดลงเป็นผลมาจากแรงตึงผิวของของเหลวที่ลดลง ถึงแม้ว่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความหนืด และ ความหนาแน่น จะเปลี่ยนไปด้วยก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของแรงตึงผิวของของเหลวจะทำให้ความยาวคลื่นของคลื่นที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของฟิล์มของเหลวลดลง ซึ่งทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำลดลงไปด้วย จากการทดลองของ Daniel [9] ยังพบอีกว่าสำหรับของเหลวที่มีความหนืด (Viscous liquid) จะต้องให้แอมปลิจูดสูง เพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนบนฟิล์มของของเหลว ซึ่งความหนืดจะมีผลต่อความเสถียรบนผิวหน้าของของเหลวเท่านั้น แต่ไม่มีผลต่อขนาดของหยดละอองน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 7.6

<u>ตารางที่ 7.5</u> *แสดงอิทธิพลของของเหลวที่มีต่อขนาดของหยดละออง Daneil [9]*

%โดยน้ำหนักของเมทานอลในน้ำ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/ม.)	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	ขนาดเฉลี่ยของหยดละออง (ไมครอน)
0	1000	72.75	1.00	31.02
10	981	59.04	1.36	29.6
16	972	53.97	1.54	28.34
30	951	43.02	1.88	26.61
47	921	36.8	1.95	24.56
64	885	31.84	1.69	23.12
100	791	22.61	0.755	21.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.6 *แสดงอิทธิพลของความหนืดของของเหลวที่มีผลต่อขนาดของหยดละออง Daneil [20]*

%โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลในน้ำ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/ม.)	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	ขนาดเฉลี่ยของหยดละออง (ไมครอน)
0	1000	72.75	1.00	31.02
15	1033	72.67	1.49	32.41
21	1048	72.36	1.80	32.87
36	1087	71.54	3.09	31.82

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

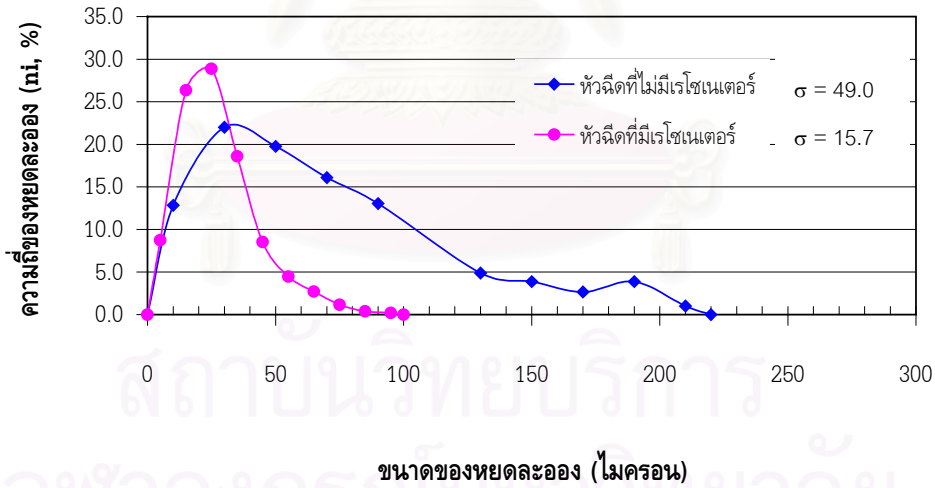
7.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

7.2.1 ผลของรูปร่างของหัวฉีด

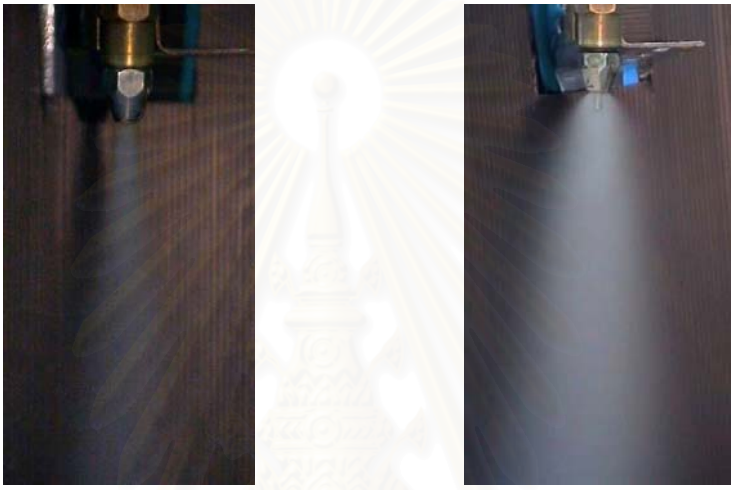
สำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง อาศัยหลักการสะท้อนกลับของแรงดันอากาศ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) ที่บริเวณปลายทางออกของหัวฉีด เมื่อของเหลวถูกส่งมาสัมผัสกับบริเวณนี้ก็จะทำให้เกิดการแตกเป็นละอองขึ้น หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์ที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7.15 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ 1) ส่วนฐานของหัวฉีด 2) ส่วนของท่อส่งอากาศและน้ำ 3) ส่วนหัวของหัวฉีด ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนที่สำคัญ ก็คือ เรโซเนเตอร์ (ซึ่งได้อธิบายหลักการทำงานของหัวฉีดดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2.12) จากการทดลองหัวฉีด 2 หัว ที่มีความแตกต่างกันบริเวณปลายของหัวฉีด ซึ่งหัวฉีดชนิดแรกเป็นหัวฉีดที่ไม่มีเรโซเนเตอร์ ส่วนหัวฉีดที่สองมีเรโซเนเตอร์ติดอยู่ที่ส่วนปลายของหัวฉีด จากการทดลองจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าหัวฉีดชนิดแรกจะสามารถฉีดพ่นได้ อันเนื่องมาจากการอัดอากาศแต่มุมของการสเปรย์ที่ได้จะแคบมาก (น้อยกว่า 20 องศา) หยดละอองที่ออกจากหัวฉีดจะมีความเร็วสูงเนื่องจากแรงดันของอากาศและการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะกว้าง ดังแสดงผลการวัดการกระจายขนาดในรูปที่ 7.16 แตกต่างจากหัวฉีดชนิดที่สอง ซึ่งมีมุมของการสเปรย์กว้างกว่า (ประมาณ 35 องศา) หยดละอองมีความเร็วต่ำดังแสดงในรูปที่ 7.17 เนื่องจากการฉีดพ่นที่ได้เกิดจากกการที่ของเหลวถูกส่งไปสัมผัสกับบริเวณที่มีความถี่สูงค่าเดียวแล้วจึงแตกเป็นละออง โดยอากาศที่อยู่รอบๆเรโซเนเตอร์จะพาละอองเหล่านี้ออกมาในรูปแบบของสเปรย์ที่มีความเร็วต่ำ และการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะแคบ ดังนั้นเรโซเนเตอร์จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับหัวฉีดชนิดนี้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้างและความลึกของโพรงในเรโซเนเตอร์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ขนาดของหยดละอองน้ำ และรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง อันได้แก่ ความดันอากาศ, อัตราการไหลของของเหลว และคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้

รูปที่ 7.15 *ภาพถ่ายแสดงลักษณะของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*



รูปที่ 7.16 *กราฟแสดงผลการทดลองวัดการกระจายขนาดที่ได้จากหัวฉีดที่มีเรโซเนเตอร์และไม่มีเรโซเนเตอร์ติดอยู่ที่ปลายของหัวฉีด*



(ก) หัวฉีดที่ไม่มีเรโซเนเตอร์

(ข) หัวฉีดที่มีเรโซเนเตอร์

<u>รูปที่ 7.17</u> *ภาพถ่ายแสดงลักษณะการสเปรย์ของหัวฉีดที่ไม่มีเรโซเนเตอร์และมีเรโซเนเตอร์*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการวัดความถี่กำทอนของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างและความลึกของโพรงในเรโซเนเตอร์ในขณะที่ไม่ได้ทำการสเปรย์น้ำ (ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ค.) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของขนาดความกว้างและความลึกของโพรงในเรโซเนเตอร์ มีผลทำให้ความถี่กำทอนของหัวฉีดที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงผลการทดลองวัดความถี่กำทอนของหัวฉีดในตารางที่ 7.7

<u>ตารางที่ 7.7</u> *แสดงผลการวัดความถี่กำทอนของหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน*

หัวฉีดเบอร์	ความกว้างของเรโซเนเตอร์, D_1 (มิลลิเมตร)	ความลึกของเรโซเนเตอร์, b (มิลลิเมตร)	ความถี่กำทอนของหัวฉีด (กิโลเฮิร์ซ)
1	2.0	1.5	33.30
2	2.5	1.5	26.50
3	3.0	1.5	24.30
4	2.0	3.0	24.30
5	2.5	3.0	22.50
6	3.0	3.0	16.60
7	2.0	4.5	18.40
8	2.5	4.5	17.80
9	3.0	4.5	17.10
10	2.0	6.0	28.95
11	3.0	6.0	17.55

จากตารางที่ 7.7 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขนาดความกว้างและความลึกของโพรงในเรโซเนเตอร์ มีผลทำให้ความถี่กำทอนของหัวฉีดมีค่าลดลง นั่นคือ เมื่อพิจารณาหัวฉีดที่มีความลึกของเรโซเนเตอร์เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร พบว่า การเพิ่มขนาดความกว้างของเรโซเนเตอร์จาก 2, 2.5 และ 3.0 มิลลิเมตร มีผลทำให้ความถี่กำทอนของหัวฉีดมีค่าลดลง คือ มีค่าเท่ากับ 33.3, 26.5 และ 24.3 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มขนาดความลึกของเรโซเนเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร ความถี่กำทอนของหัวฉีดที่วัดได้จะมีค่าลดลงเป็น 24.3, 22.5 และ 16.6 กิโลเฮิร์ซ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันเมื่อเพิ่มขนาดความลึกของเรโซเนเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 4.5 และ 6.0 ตามลำดับ

จากการออกแบบและทดสอบการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน พบว่า ควรออกแบบให้เรโซเนเตอร์มีขนาดดังนี้

1. ความกว้างของเรโซเนเตอร์ ควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดความกว้างของปลายทางออกของหัวฉีด เนื่องจากถ้าเรโซเนเตอร์มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดความกว้างของปลายทางออกของหัวฉีดก็จะบังการไหลของหยดละอองที่ได้ ทำให้สเปรย์ที่ได้บานมากและการสเปรย์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับกรวยกลวง (Hollow cone) จากการทดลองพบว่าความกว้างของเรโซเนเตอร์ควรมีขนาดเท่ากับ $D_1 = 0.8D_2$

2. ความลึกของเรโซเนเตอร์ ควรมีความลึกน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ในช่วงขนาดความกว้างของเรโซเนเตอร์ 0 – 3 มิลลิเมตร เนื่องจากหากหัวฉีดมีความลึกมากเกินไปจะทำให้ไม่เกิดความถี่กำทอน ซึ่งจากการวัดความถี่ของหัวฉีดที่มีขนาดความลึกเท่ากับ 6 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าไม่เกิดความถี่กำทอน ดังแสดงในภาคผนวก ค รูปที่ ค.12 และ ค.13 การสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดจึงไม่ได้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) และการสเปรย์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการสเปรย์ของหัวฉีดที่ไม่มีเรโซเนเตอร์

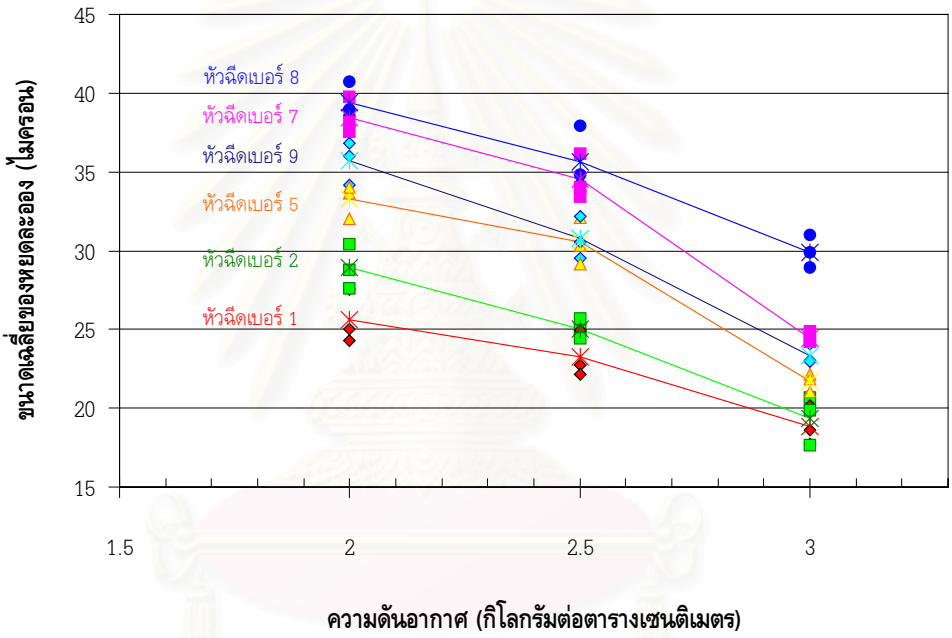
สิ่งที่สำคัญประการหนึ่งในการสร้างหัวฉีดชนิดนี้ก็คือ จะต้องติดตั้งให้เรโซเนเตอร์อยู่ตรงกลางของหัวฉีดพอดี เพราะหากติดตั้งเรโซเนเตอร์เอียงก็จะทำให้สเปรย์ที่ได้เอียงตามไปด้วย และในการประกอบหัวฉีดเข้าด้วยกันจะต้องยึดติดส่วนประกอบต่างๆของหัวฉีดให้แน่น เพราะหากยึดติดกันไม่แน่นพอก็จะทำให้อากาศบางส่วนไหลย้อนเข้าไปในท่อส่งของเหลว ทำให้การฉีดพ่นที่ได้ติดขัดเป็นจังหวะ เนื่องจากมีอากาศเข้าไปขัดขวางการไหลของของเหลว และไม่ควรออกแบบให้เรโซเนเตอร์มีความยาวมากเกินไปเนื่องจากจะทำให้ละอองน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆเรโซเนเตอร์บางส่วนเกาะติดที่เรโซเนเตอร์เกิดเป็นหยดละอองที่มีขนาดใหญ่ไหลรวมมากับสเปรย์ที่ได้

หมายเหตุ: ในการศึกษาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ได้ทำการออกแบบนี้ ความดันอากาศที่ให้แก่หัวฉีดจะต้องมีค่าอย่างน้อย 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

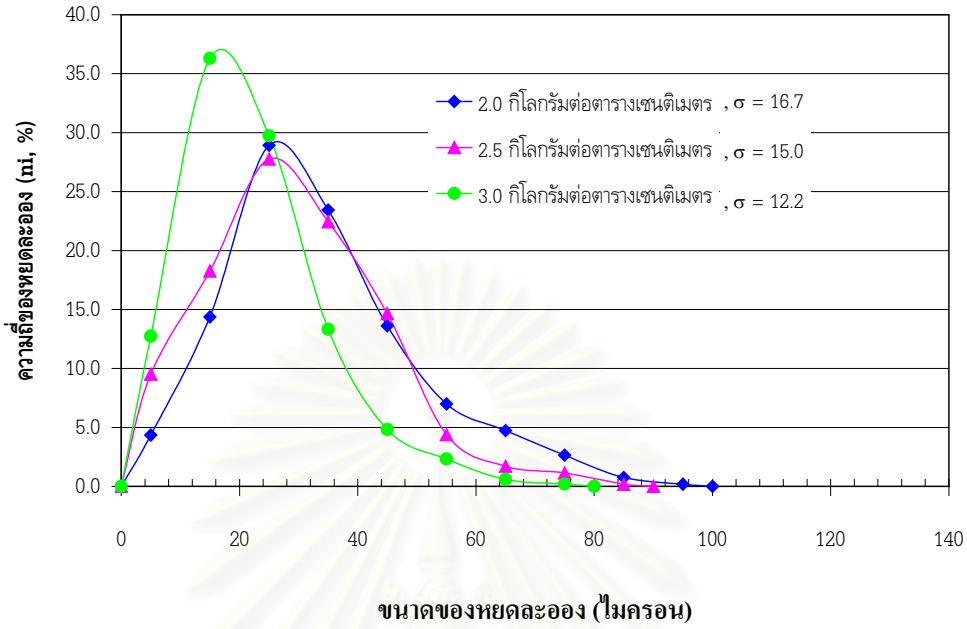
7.2.2 อิทธิพลของความดันอากาศที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซกับขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ โดยใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1, 2, 5, 7, 8 และ 9 ซึ่งมีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน ตามเบอร์ของหัวฉีดที่ได้กล่าวถึงในตารางที่ 7.7 อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าเท่ากับ 4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (254 มิลลิลิตรต่อนาที) ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 *กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ* (สามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

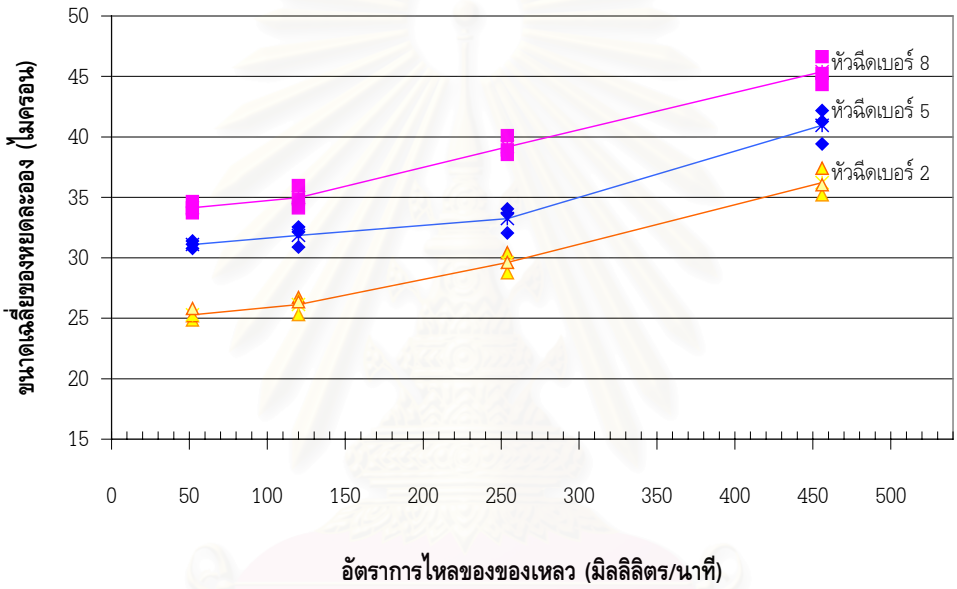


รูปที่ 7.19 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 5 เมื่อความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าแตกต่างกัน*

จากรูปที่ 7.18 เมื่อพิจารณาที่หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 5 จะพบว่า เมื่อเพิ่มความดันของอากาศให้สูงมากขึ้นจาก 2, 2.5 และ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จะมีขนาดลดลง คือมีค่าเท่ากับ 33.7, 29.1 และ 22.1 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดเบอร์ 5 ดังแสดงในรูป 7.19 พบว่า การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะมีการกระจายขนาดที่แคบลงเมื่อความดันของอากาศที่ให้กับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีค่าสูงขึ้น และมีแนวโน้มในลักษณะเช่นเดียวกันเมื่อใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1, 2, 7, 8 และ 9 ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความดันของอากาศให้กับหัวฉีด กระแสอากาศจะมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านออร์ริฟิซ (Orifice) และไหลไปกระทบกับส่วนท้ายของโพรงในเรโซเนเตอร์ (Resonator) มีความเร็วเพิ่มสูงมากขึ้น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) ที่มีความรุนแรงสูงมากขึ้น เปรียบเสมือนการเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงในกรณีของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ดังนั้น เมื่อของเหลวถูกส่งมาสัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) ที่รุนแรงหรือที่มีความเข้มที่สูงขึ้นนี้ จึงส่งผลทำให้หยดละอองน้ำที่ได้มีขนาดเล็กลง

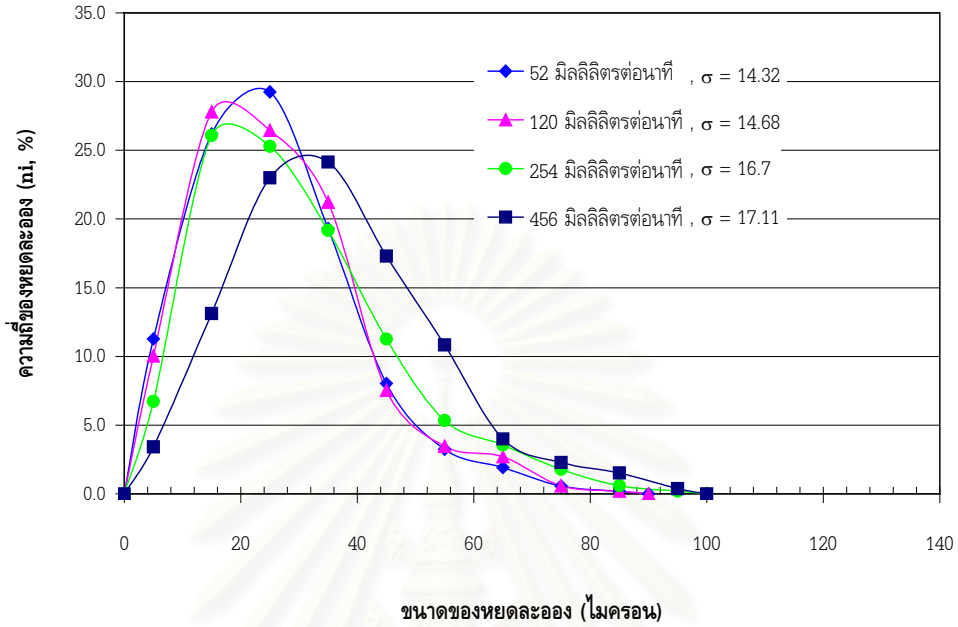
7.2.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ โดยใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 2, 5, และ 8 ซึ่งมีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน ความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าคงที่เท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.20



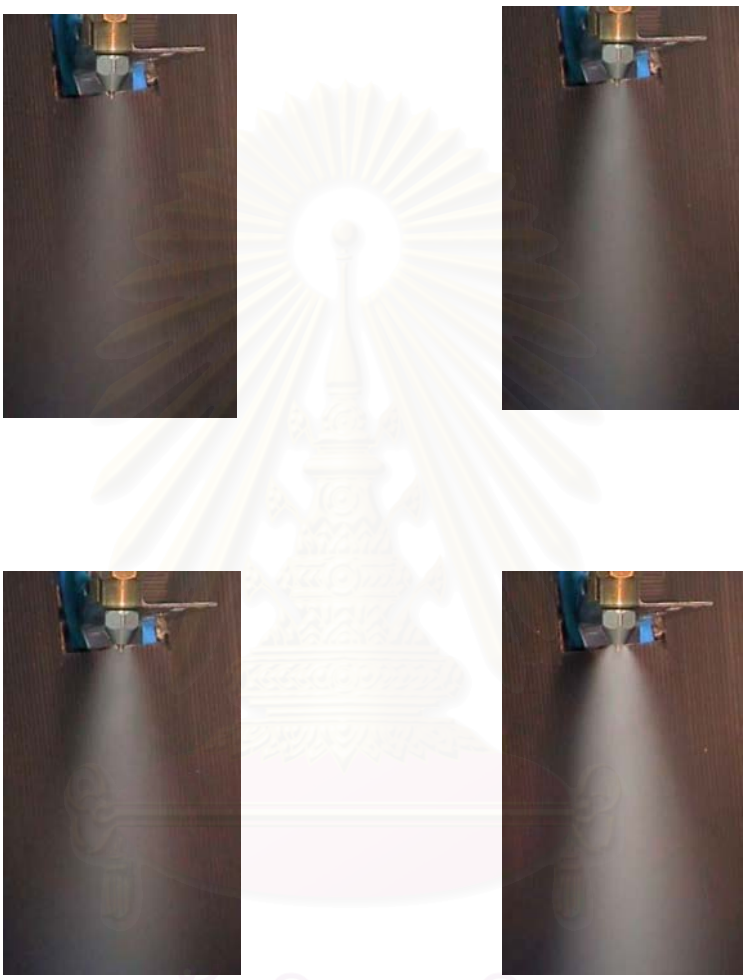
รูปที่ 7.20 *กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ*
(สามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ช.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.21 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 2 เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าแตกต่างกัน*

จากรูปที่ 7.20 เมื่อพิจารณาที่หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 2 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของของเหลวในช่วงแรก คือมีค่าระหว่าง 50 – 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ขนาดของหยดละอองน้ำที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 26 ไมครอน และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวให้สูงมากขึ้นเป็น 254 และ 456 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีผลทำให้หยดละอองน้ำที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น คือ มีค่าเท่ากับ 29.6 และ 36.0 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงที่มีอัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.21 พบว่า เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงขึ้น การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้รับจะกว้างมากขึ้น เนื่องจากเกิดหยดละอองที่มีขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น สาเหตุที่ทำให้หยดละอองมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวส่งผลให้ปริมาณของของเหลวที่แผ่ปกคลุมรอบปลายของหัวฉีดก่อนที่จะเกิดการฉีดพ่นมีมากขึ้น ในขณะที่แรงดันอากาศหรือความเข้มของเสียงที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่าเดิม จึงทำให้ความเข้มเสียงต่อปริมาณของเหลวมีค่าน้อยลง ขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวมีผลทำให้ความหนาแน่นของหยดละอองน้ำที่เกิดจากการฉีดพ่นมีมากขึ้น ความน่าจะเป็นที่หยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กจะรวมตัวกันเป็นหยดละอองที่มีขนาดใหญ่จึงมีสูงขึ้น ขนาดของหยดละอองน้ำที่วัดได้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 7.22 *ภาพถ่ายแสดงลักษณะการสเปรย์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มสูงขึ้น*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

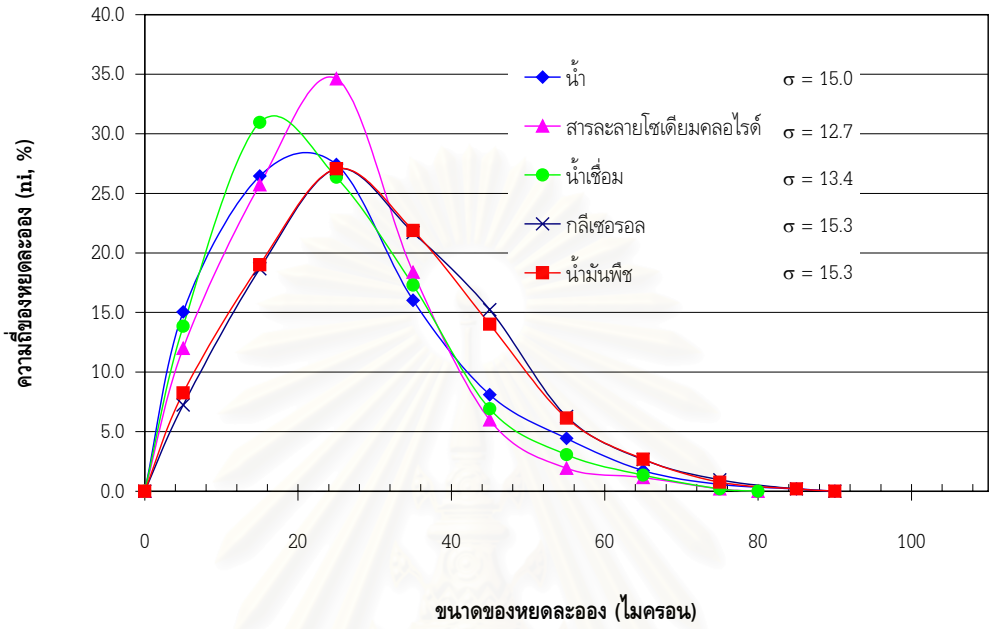
7.2.4 อิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ

ในการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของของเหลวกับขนาดเฉลี่ยของหยดละอองน้ำ โดยใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1 อัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (254 มิลลิลิตรต่อนาที) และความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 *แสดงอิทธิพลของคุณสมบัติของของเหลวที่ผลต่อขนาดของหยดละออง (ดังแสดงผลการทดลองในภาคผนวก ช.)*

ลำดับ	ของเหลว	%โดยน้ำหนัก	ความหนืด (ตร.มม./วินาที)	แรงตึงผิว (มิลลินิวตัน/เมตร)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ขนาดเฉลี่ยของหยดละออง (ไมครอน)
1	น้ำ	100	0.96	72.18	1000	26.28
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	1.42	83.21	1270	25.26
3	น้ำเชื่อม	70	4.34	52.28	1179	25.47
4	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	65	63.11	1260	31.98
5	น้ำมันพืช	100	42	27.09	850	31.0

จากตารางที่ 7.8 จะเห็นได้ว่า สำหรับหัวฉีดชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงนั้น คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้ในการฉีดพ่นไม่มีผลมากนักต่อขนาดของหยดละอองที่ได้ และหัวฉีดชนิดนี้ยังสามารถฉีดพ่นของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น น้ำมันและกลีเซอรอลได้ แตกต่างจากหัวฉีดชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคทรานซิวเซอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้มีผลอย่างมากต่อขนาดของหยดละอองที่ได้ เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากของเหลวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.23 พบว่า การกระจายขนาดที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยน้ำ, กลีเซอรอล และน้ำมัน จะมีค่าการกระจายขนาดของหยดละอองใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7.23 *กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1 เมื่อของเหลวที่ใช้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

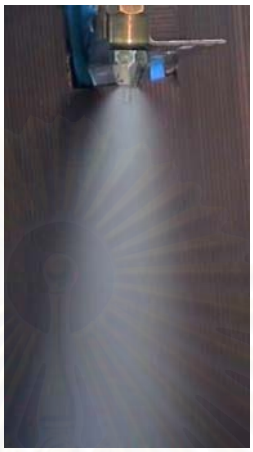
7.2.5 รูปแบบของการสเปรย์

ในการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบของการสเปรย์และองศาของการฉีดพ่นที่ได้จากหัวฉีด โดยโดยใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1, 2, 3, 6, 7, 9 และ 10 ซึ่งมีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน ความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2, 2.5, และ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 2,000 4,233 และ 7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (120, 254, 456 มิลลิลิตรต่อนาที) ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7.9

<u>ตารางที่ 7.9</u> *แสดงผลการวัดองศาของการฉีดพ่นและรัศมีที่หัวฉีดสามารถครอบคลุมได้*

หัวฉีด	ความดันอากาศ (กก./ม^2)	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	องศาการฉีดพ่น	เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ที่หัวฉีดสามารถครอบคลุมได้ (ซม.)	พื้นที่ที่หัวฉีดสามารถครอบคลุมได้ (ตร.ซม.)
1	2.0	120	34	20	314.2
2	2.0	120	35	22	380.1
3	2.0	120	34	20	314.2
6	2.0	120	36	22	380.1
7	2.0	120	33	20	314.2
9	2.0	120	35	22	380.1
10	2.0	120	34	22	380.1
1	2.5	120	35	22	380.1
1	3.0	120	37	22	380.1
1	2.0	254	34	20	314.2
1	2.0	445	35	22	380.1

จากการทดลองพบว่า องศาของการฉีดพ่นที่วัดจากหัวฉีดที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์ต่างๆ กันจะมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นกรวยเต็ม (Solid cone) มีองศาของการฉีดพ่นประมาณ 35 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ที่สามารถครอบคลุมได้ประมาณ 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.24 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวและความดันอากาศเพื่อพิจารณาองศาของการฉีดพ่นที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวและความดันอากาศไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององศาของการฉีดพ่น แต่จะทำให้สเปรย์ที่ได้มีความหนาแน่นของหยดละอองมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 7.24 *ภาพถ่ายแสดงรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.3 ผลการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด

เนื่องจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีพื้นที่ในการฉีดพ่นน้อย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการฉีดพ่นเพียง 1 เซนติเมตร จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานจริงในโรงโม่หิน ซึ่งต้องการหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นกว้าง เพื่อเพิ่มพื้นที่ให้หยดน้ำสามารถครอบคลุมฝุ่นที่ฟุ้งกระจายได้มากขึ้น รวมทั้งชุดอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่หัวฉีดชนิดนี้ มีขนาดใหญ่และไม่สามารถทนทานกับการใช้งานในสภาวะของโรงโม่หินได้ จึงเลือกใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเพื่อการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงโม่หิน และได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับหัวฉีดที่ใช้อยู่จริงในโรงโม่หิน ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

7.3.1 คุณสมบัติของฝุ่นที่ทำการตรวจวัด

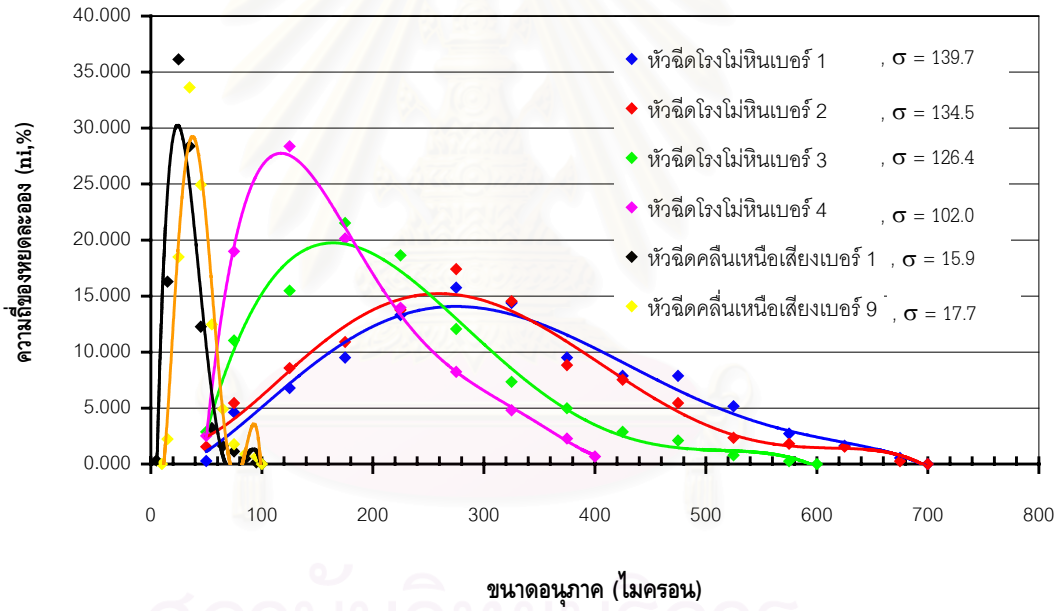
ฝุ่นที่นำมาวิเคราะห์และทดลองเป็นตัวอย่างฝุ่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดโรงโม่หิน 4 บริเวณ สายพานหลังปากซอยใกล้กับบริเวณที่ทำการตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของฝุ่นได้แสดงดังตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 *แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของฝุ่น*

	Dust Sample
Angle of Repose (degee)	45.66
Angle of Spatula (degee)	69.73
Aerated Density (g/cm^3)	1.11
Packed Density (g/cm^3)	1.6
Compressibility (%)	30.51
Cohesiveness (%)	87.74
Flowability Index	Bad
Angle of Fall (degee)	19.5
Angle of Difference (degee)	18
Dispersibility (%)	12
Floodability Index	Fairly High

7.3.2 คุณลักษณะของหัวฉีดที่ใช้ในการกำจัดฝุ่น

ในการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์และขณะที่เปิดสเปรย์ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงหรือหัวฉีดที่ใช้อยู่จริงในโรงโม่หิน ได้เลือกใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจำนวน 2 หัว คือ หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1 และหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 9 ซึ่งสามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดแตกต่างกันคือ 36.6 และ 47.1 ไมครอน ที่อัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 510 มิลลิลิตรต่อนาที และเลือกใช้หัวฉีดที่ใช้อยู่จริงในโรงโม่หินจำนวน 4 หัว ซึ่งหัวฉีดแต่ละหัวมีขนาดและการกระจายขนาดดังแสดงในรูปที่ 7.25 และสามารถสรุปคุณลักษณะของหัวฉีดแต่ละชนิดดังตารางที่ 7.11



รูปที่ 7.25 กราฟแสดงการกระจายขนาดของหัวฉีดแต่ละชนิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.11 *แสดงคุณลักษณะของหัวฉีดแต่ละชนิด*

ลำดับที่	ชนิดหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ตร.ซม.)	ขนาดเฉลี่ยของหยดละออง (ไมครอน)	เส้นผ่าศูนย์กลางของพื้นที่ที่หัวฉีดสามารถครอบคลุมได้ (เซนติเมตร)	ลักษณะของการสเปรย์
1	หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 1	2,800	-	313.3	30	กรวยกลวง
		3,850	-	340.1	32	กรวยกลวง
2	หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ .2	2,800	-	283.1	36	กรวยเต็ม
		3,850	-	307.5	36	กรวยเต็ม
3	หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 3	2,800	-	225.4	48	กรวยเต็ม
		3,850	-	262.3	48	กรวยเต็ม
4	หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 4	2,800	-	172.6	46	กรวยเต็ม
		3,850	-	197.6	54	กรวยเต็ม
5	หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1	510	2	36.6	22	กรวยเต็ม
		510	3	28.5	22	กรวยเต็ม
		1,380	2	57	24	กรวยเต็ม
		1,380	3	50	24	กรวยเต็ม
6	หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 9	510	2	47.1	22	กรวยเต็ม
		510	3	38	22	กรวยเต็ม
		1,380	2	63.6	22	กรวยเต็ม
		1,380	3	54.9	22	กรวยเต็ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด

ในการหาประสิทธิภาพของหัวฉีดในการกำจัดฝุ่น ทำได้โดยการวัดความเข้มข้นของฝุ่นในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของฝุ่นที่วัดได้ในขณะที่เปิดสเปรย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นที่โรงโม่หินศิลาเลิศจิต จากแหล่งกำเนิดโรงโม่หินที่ 4 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอย ในวันที่ 21 - 22 พฤศจิกายน 2543 ซึ่งได้ทำการดัดแปลงตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดให้เป็นระบบปิดดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยใช้เครื่อง Smoke Opacity Meter ซึ่งสามารถวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง ในการวัดความเข้มข้นของฝุ่นในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์และในขณะที่เปิดสเปรย์ (ดังแสดงผลการวัดในภาคผนวก จ.2 และ จ.3) โดยได้ทำการสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงที่วัดได้จากเครื่อง Smoke Opacity Meter กับค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศที่วัดได้จากเครื่อง High Volume Sampler ในห้องปฏิบัติการ (ดังแสดงผลการสอบเทียบในภาคผนวก ฉ.4) แล้วนำค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงที่วัดได้จริงในโรงโม่หินมาคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ (ดังแสดงผลการคำนวณในภาคผนวกที่ ฉ.5 และ ฉ.6) เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด ซึ่งผลการวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำหนักของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์น้ำและในขณะที่เปิดสเปรย์น้ำ รวมทั้งผลการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดแต่ละหัว สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 7.12 และ 7.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่วัด โรงโม่หินศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว ท้องฟ้าแจ่มใส

วันที่ทำการตรวจวัด 21 พฤศจิกายน 2543

<u>ตารางที่ 7.12</u> *แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด (ทำการวัดในวันที่ 21 พ.ย.2543)*

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ตร.ซม.)	ค่าความเข้มข้นฝุ่นเมื่อไม่สเปรย์น้ำ (มก./ลบ.ม.)	ค่าความเข้มข้นฝุ่นเมื่อสเปรย์น้ำ (มก./ลบ.ม.)	ประสิทธิภาพการควบคุมฝุ่น %
1. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง เบอร์ 1	510	2	330.00	0	100.00
	510	3	330.00	0	100.00
	1380	2	330.00	0	100.00
	1380	3	330.00	0	100.00
2. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง เบอร์ 9	510	2	321.98	0	100.00
	510	3	321.98	0	100.00
	1380	2	321.98	0	100.00
	1380	3	321.98	0	100.00
3. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ต้นแบบ	510	2	439.48	5.1	98.84
	510	3	439.48	10.23	97.67
	1380	2	439.48	7.15	98.37
	1380	3	439.48	7.15	98.37

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถานที่วัด โรงโม่หินศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว ลมแปรปรวน และมีฝุ่นมาก

วันที่ทำการตรวจวัด 22 พฤศจิกายน 2543

ตารางที่ 7.13 *แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด (ทำการวัดในวันที่ 22 พ.ย. 2543)*

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ตร.ซม.)	ค่าความเข้มข้นฝุ่นเมื่อไม่สเปรย์น้ำ (มก./ลบ.ม.)	ค่าความเข้มข้นฝุ่นเมื่อสเปรย์น้ำ (มก./ลบ.ม.)	ประสิทธิภาพการควบคุมฝุ่น %	% ความชื้นของหินที่เพิ่มขึ้น
1. หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 1	2,800	-	712.56	319.32	55.19	-
	3,500	-	712.56	272.15	61.81	
2. หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 2	2,800	-	712.56	223.99	68.57	-
	3,500	-	712.56	194.43	72.71	
3. หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 3	2,800	-	806.03	32.08	96.02	6.8
	3,500	-	806.03	9.20	98.86	-
4. หัวฉีดโรงโม่หินเบอร์ 4	2,800	-	806.03	17.46	97.83	8.9
	3,500	-	806.03	8.17	98.99	-
5. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	835.12	51.70	93.81	0
เบอร์ 1	1,380	2	835.12	33.45	95.99	0
6. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	835.12	44.15	94.71	0
เบอร์ 9	1,380	2	835.12	29.20	96.50	0
7. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	793.14	42.00	94.70	0
ต้นแบบ	1,380	2	793.14	34.51	95.65	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองในการตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นโดยใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในวันที่ 21 พ.ย. 2543 ดังแสดงในตารางที่ 7.12 พบว่าฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์น้ำมีความเข้มข้นประมาณ 330 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1 และ เบอร์ 9 มีค่าเท่ากับ 100 % สำหรับหัวฉีดต้นแบบจะมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย คือ มีค่าประมาณ 98% เนื่องจากฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้น

เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงกับหัวฉีดที่ใช้งานอยู่จริงในโรงโม่หิน ในวันที่ 22 พ.ย. 2543 จะพบว่าฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์มีความเข้มข้นสูงกว่าในวันแรกประมาณ 2 เท่ากัน คือ มีความเข้มข้นฝุ่นเฉลี่ยประมาณ 780 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7.13 พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1, เบอร์ 9 และหัวฉีดต้นแบบ มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพสูงเกินกว่า 90% โดยอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าต่ำเพียง 510 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวเป็น 1,380 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงกับหัวฉีดที่ใช้อยู่ในโรงโม่หิน พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูงกว่าหัวฉีดของโรงโม่หินเบอร์ 1 และ เบอร์ 2 ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นเพียง 55% และ 68% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นใกล้เคียงกับหัวฉีดของโรงโม่หินเบอร์ 3 และ เบอร์ 4 ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูงเท่ากับ 96% และ 97% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก หัวฉีดของโรงโม่หินเบอร์ 1 นั้น มีลักษณะของการสเปรย์เป็นแบบกรวยกลวง ซึ่งทำให้หยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดไม่สามารถสัมผัสกับฝุ่นที่ฟุ้งกระจายในบรรยากาศได้ทั่วถึง ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นจึงต่ำ ส่วนหัวฉีดของโรงโม่หินบอร์ 2 แม้ว่าจะมีรูปแบบของการสเปรย์เป็นแบบกรวยเต็ม แต่พบว่า การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะกว้างมาก (σ =134.51) ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นลดต่ำลง สำหรับหัวฉีดของโรงโม่หินเบอร์ 3 และเบอร์ 4 มีรูปแบบของการสเปรย์เป็นแบบกรวยเต็ม และสามารถฉีดพ่นของเหลวได้เป็นวงกว้าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นใกล้เคียงกัน คือประมาณ 48 เซนติเมตร พื้นที่ที่หยดละอองน้ำสามารถครอบคลุมการฟุ้งกระจายของฝุ่นจึงมีลักษณะเป็นวงกว้างกว่าหัวฉีดประเภทอื่น ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นจึงมีค่าสูง อย่างไรก็ตาม พบว่า หินที่ได้หลังจากการผ่านกระบวนการกำจัดฝุ่นด้วยการสเปรย์น้ำจากหัวฉีดทั้งสองชนิดนี้ จะเปียกมากและมีค่าความชื้นเท่ากับ 6.8% และ 8.9% ตามลำดับ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อคุณภาพ, สีของหิน และสายพาน ในภายหลังได้

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้ พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้ต่ำมากประมาณ 510 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งใช้น้ำน้อยกว่าหัวฉีดของโรงโม่หินมาก ที่ต้องใช้ปริมาณน้ำถึง 2,800 มิลลิลิตรต่อนาทีหรือมากกว่าเพื่อให้เกิดการฉีดพ่น โดยยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูงเกินกว่า 90 % และหินที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้ระบบสเปรย์น้ำจากหัวฉีด

คลื่นเหนือเสียงจะมีความชื้นน้อยมาก ข้อดีของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงอีกประการหนึ่งก็คือ ไม่เกิดการอุดตัน เนื่องจากความดันสูงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) จะช่วยดึงเอาสิ่งสกปรกออกจากท่อส่งน้ำโดยอัตโนมัติในขณะที่หัวฉีดกำลังทำงาน และส่วนปลายของหัวฉีดมีลักษณะเป็นโพรงกว้าง จึงไม่เกิดปัญหาการอุดตันอันเนื่องมาจากมีฝุ่นมาเกาะที่ส่วนหัวของหัวฉีด ซึ่งเป็นข้อแตกต่างอย่างชัดเจนกับหัวฉีดที่ใช้กันอยู่ในโรงโม่หินซึ่งจะเกิดการอุดตันได้ง่าย

จากการศึกษาการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่โรงโม่หิน พบว่า ในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงให้ได้ประโยชน์สูงสุดนั้น บริเวณที่ติดตั้งหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงควรมีลักษณะเป็นระบบปิด เพื่อทำการผสมของหยดละอองน้ำและฝุ่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจนำหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในเครื่องไซโคลนสครับเบอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น โดยเฉพาะฝุ่นที่มีขนาดเล็กให้สูงขึ้น เนื่องจากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงสามารถผลิตหยดละอองที่มีขนาดเล็กและมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยไม่ต้องอาศัยแรงดันของอากาศหรือแรงดันน้ำสูง และอัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าต่ำ การใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ซึ่งได้แก่ ค่าไฟและค่าน้ำ ได้อย่างมาก และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวฉีด เนื่องจากไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด แตกต่างจากหัวฉีดที่ใช้กันทั่วไปในเครื่องไซโคลนสครับเบอร์ ที่มีขนาดรูเปิดของหัวฉีดเล็กเพื่อให้หยดละอองที่มีขนาดเล็ก ทำให้หัวฉีดเกิดการอุดตันได้ง่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.4 การประเมินราคาต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ในการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การประเมินค่าสร้างและค่าติดตั้งอุปกรณ์ (Capital cost) และการประเมินค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง (Operating cost) โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลงทุนของระบบสเปรย์น้ำต่อหัวฉีด 1 หัว เมื่อใช้หัวฉีดของโรงโม่หินกับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในตารางที่ 7.14

ตารางที่ 7.14 *ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลงทุนของระบบสเปรย์น้ำเมื่อใช้หัวฉีดของโรงโม่หินกับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง*

รายการ	หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	หัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่
ค่าสร้างและค่าติดตั้งอุปกรณ์ (บาท)		
1) ค่าหัวฉีด	1,800	ค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ
2) ค่าปั๊มน้ำ	425	2,348
3) ค่าเครื่องอัดอากาศ	1,000	
4) ค่าท่อน้ำและท่ออากาศ	120	
รวมค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ (บาท)	***3,345***	***2,348***
ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง (บาท)		
1) ค่าน้ำ /1เดือน	46	560
2) ค่าไฟฟ้า /1เดือน	252	163
รวมค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง (บาท)	***298***	***723***

หมายเหตุ: สามารถประเมินค่าใช้จ่ายต่างๆของหัวฉีดแต่ละประเภทได้ดังนี้

การประเมินราคาค่าใช้จ่ายสำหรับหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน

1) *ค่าสร้างและติดตั้งอุปกรณ์*

ในการประเมินราคาค่าสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน ใช้ข้อมูลจากหนังสือการพัฒนาและสร้างระบบสาธิตการกำจัดฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน [2] โดยทำการเฉลี่ยค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อหัวฉีด 1 หัว

2) ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง

- ค่าน้ำ

  ใช้น้ำ 18.06 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ต่อหัวฉีด 81 หัว คิดเป็น 0.223 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

  ค่าน้ำ (รวมค่าบำบัดก่อนนำไปใช้) ประมาณ 10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เดินเครื่องวันละ 10 ชั่วโมง ทำงานเดือนละ 25 วัน

  ดังนั้น คิดเป็นค่าน้ำเดือนละ $0.233 \times 10 \times 10 \times 25 = 560$ บาท/เดือน

- ค่าไฟฟ้า

  กำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด 13.2 กิโลวัตต์ ต่อหัวฉีด 81 หัว คิดเป็น 0.163 กิโลวัตต์/1หัวฉีด

  ค่าไฟในอุตสาหกรรมประมาณ 4 บาทต่อยูนิต (กิโลวัตต์ชั่วโมง) เดินเครื่อง 10 ชั่วโมง และทำงานเดือนละ 25 วัน

  ดังนั้น คิดเป็นค่าน้ำเดือนละ $0.163 \times 10 \times 4 \times 25 = 163$ บาท/เดือน

การประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง

1) ค่าสร้างและติดตั้งอุปกรณ์

- *ค่าปั๊มน้ำ*

  ปั๊มน้ำที่ใช้มีขนาด 93.25×10^{-3} กิโลวัตต์ ราคา 2,120 ปั๊มน้ำ 1 ตัว สามารถใช้กับหัวฉีดได้ประมาณ 5 หัว ดังนั้นค่าปั๊มน้ำต่อหัวฉีด 1 หัว มีค่าเท่ากับ 424 บาท

- *ค่าเครื่องอัดอากาศ*

  เครื่องอัดอากาศที่ใช้มีขนาด 932.5×10^{-3} กิโลวัตต์ ราคา 4,000 บาท เครื่องอัดอากาศ 1 เครื่อง สามารถใช้กับหัวฉีดได้ประมาณ 4 หัว

  ดังนั้นค่าเครื่องอัดอากาศต่อหัวฉีด 1 หัว มีค่าเท่ากับ 1,000 บาท

2) *ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง*

- *ค่าน้ำ*

  น้ำที่หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงใช้มีค่าเท่ากับ 510 มิลลิลิตรต่อนาที (0.0303 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

  ค่าน้ำประมาณ 6 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เดินเครื่องวันละ 10 ชั่วโมง ทำงานเดือนละ 25 วัน

  ดังนั้น คิดเป็นค่าน้ำเดือนละ $= 0.0303 \times 6 \times 10 \times 25 = 46$ บาท

- *ค่าไฟฟ้า*

  ใช้เครื่องอัดอากาศขนาด 932.5×10^{-3} กิโลวัตต์ สามารถใช้ได้กับหัวฉีด 4 หัว กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับหัวฉีด 1 หัว จึงมีค่าเท่ากับ 233×10^{-3} กิโลวัตต์

  ใช้ปั๊มน้ำขนาด 93.25×10^{-3} กิโลวัตต์ สามารถใช้ได้กับหัวฉีด 5 หัว กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับหัวฉีด 1 หัว จึงมีค่าเท่ากับ 18.65×10^{-3} กิโลวัตต์

  ค่าไฟในอุตสาหกรรมประมาณ 4 บาทต่อยูนิต (กิโลวัตต์ชั่วโมง) เดินเครื่อง 10 ชั่วโมง และทำงานเดือนละ 25 วัน

  ดังนั้น ค่าไฟประมาณเดือนละ = $(0.233+0.01865)\times4\times10\times25$ = 252 บาท

จากผลการประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังแสดงในตารางที่ 7.14 พบว่า หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นเท่ากับ 3,345 บาท โดยมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน ที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเท่ากับ 2,348 บาท คิดเป็น 1.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินเครื่องเท่ากับ 328 บาท โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน ที่มีค่าใช้จ่ายในการเท่ากับ 723 บาท คิดเป็น 0.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน สามารถสรุปการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงกับหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน ได้ดังนี้

1. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงกว่าหัวฉีดในโรงโม่หินไม่มากนัก แต่ในระยะยาวจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวฉีดได้มาก เนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด
2. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงใช้อัตราการไหลของของเหลวต่ำกว่าหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หินมาก ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากกับพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำ และยังไม่ต้องใช้แท้งค์น้ำขนาดใหญ่เพื่อบรรจุน้ำ
3. ไม่ต้องใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำ จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายของน้ำในส่วนนี้ลงได้ หากมีการใช้สารเคมีค่าน้ำจะมีราคาเท่ากับ 10 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อไม่มีการใช้สารเคมีค่าน้ำจะมีราคาลดลงเป็น 6 บาทต่อลูกบาศก์เมตร
4. ช่วยเพิ่มคุณภาพของหิน เนื่องจากหินที่ผ่านระบบกำจัดฝุ่นจะมีความชื้นน้อย ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมตะแกรงคัดขนาดและสายพาน เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากหินที่เปียกมากเกินไป

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการทดลองได้เป็น 3 หัวข้อใหญ่ คือ 1) สรุปผลการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 2) สรุปผลการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 3) สรุปผลการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด

8.1 สรุปผลการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

1. จากผลการออกแบบหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง พบว่า จำเป็นต้องออกแบบให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนหน้าของหัวฉีดมีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงให้สูงขึ้น ทำให้หัวฉีดสามารถเกิดการฉีดพ่นของของเหลวได้ที่กำลังไฟฟ้าต่ำ และควรเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการฉีดพ่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนั้น ควรออกแบบให้หัวฉีดมีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 120 กิโลเฮิร์ซ เนื่องจากการออกแบบให้หัวฉีดมีความถี่ต่ำกว่า 20 กิโลเฮิร์ซ จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อทำให้เกิดการฉีดพ่น และยังก่อความรำคาญแก่ผู้ใช้งานและบุคคลรอบข้างเนื่องจากเกิดเสียงดังอีกด้วย แต่หากออกแบบให้หัวฉีดมีความถี่สูงเกินกว่า 120 กิโลเฮิร์ซ หัวฉีดที่ได้จะมีขนาดเล็กเกินไป ซึ่งยากต่อการสร้างและใช้งาน
2. จากผลการวัดขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 34.53 – 56.49 กิโลเฮิร์ซ พบว่า หัวฉีดชนิดนี้สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 20) หรือมีการกระจายขนาดที่แคบเมื่อเทียบกับหัวฉีดที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้โดยการปรับเปลี่ยนความถี่, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง และอัตราการไหลของของเหลว ซึ่งสามารถสรุปผลของตัวแปรดังกล่าวที่มีผลต่อขนาดของหยดละออง ได้ดังนี้

- เมื่อหัวฉีดมีความถี่สูงขึ้น จะสามารถผลิตหยดละอองที่มีขนาดเล็กลง โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 42.1 – 58.7 ไมครอน ที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 22 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2 วัตต์
- การเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงโดยการปรับกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น มีผลทำให้หยดละอองที่ได้มีขนาดเล็กลง ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้อยู่ในช่วง ±15 ไมครอน เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 8 วัตต์
- การเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวมีผลทำให้ขนาดของหยดละอองน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองน้ำได้อยู่ในช่วง ±13 ไมครอน เมื่ออัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง 22 – 250 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที

3. อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าต่ำ ซึ่งอัตราการไหลสูงสุดของของที่หัวฉีดสามารถเกิดการฉีดพ่นได้มีค่าขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีด จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้หัวฉีดที่มีความถี่เท่ากับ 34.43 กิโลเฮิร์ซ อัตราการไหลสูงสุดของของเหลวจะมีค่าเท่ากับ 450 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ และจะมีค่าสูงขึ้นเป็น 1,750 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 8 วัตต์
4. คุณสมบัติของของเหลวที่ใช้มีผลต่อขนาดของหยดละอองและความสามารถในการฉีดพ่นของหัวฉีด การลดลงของแรงตึงผิวจะมีผลทำให้หยดละอองที่ได้มีขนาดของหยดละอองเล็กลง และถ้าของเหลวที่ใช้มีความหนืดสูง (มากกว่า 42 ตารางเมตรต่อวินาที) หัวฉีดชนิดนี้จะไม่สามารถเกิดการฉีดพ่นได้
5. รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเต็ม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นเท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฟิล์มของของเหลวสามารถแผ่ไปบนพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองได้ ซึ่งสำหรับการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละออง จะช่วยเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นให้สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า สำหรับหัวฉีดที่ทำการออกแบบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองน้อยกว่า 16 มิลลิเมตร

8.2 สรุปผลการทดลองสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

1. จากผลการออกแบบและทดสอบหัวฉีดคลื่นเหนือชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง พบว่า การเพิ่มขนาดความกว้างจาก 2, 2.5 และ 3.0 มิลลิเมตร และการเพิ่มขนาดของความลึกของเรโซเนเตอร์จาก 1.5, 3.0, 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีผลทำให้ความถี่กำทอนของหัวฉีดมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 33.3 – 16.6 กิโลเฮิร์ซ และขนาดของเรโซเนเตอร์ที่เหมาะสม สรุปได้ดังนี้คือ
   - ความกว้างของเรโซเนเตอร์ (D_1) ควรมีขนาดเท่ากับ 0.8 เท่าของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ริฟิช (D_2)
   - ความลึกของเรโซเนเตอร์ (b) ควรมีขนาดน้อยกว่า 6 มิลลิเมตร

   โดยในการทำงานของหัวฉีดชนิดนี้ ความดันอากาศต่ำสุดที่ให้แก่หัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. จากผลการวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ซึ่งมีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกัน พบว่า สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดอยู่ในช่วง 25 – 39 ไมครอน เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าเท่ากับ 4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (254 มิลลิลิตรต่อนาที) และความดันอากาศที่ให้กับหัวฉีดมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองได้ด้วยการปรับเปลี่ยนความดันอากาศ และอัตราการไหลของของเหลวที่ให้กับหัวฉีด การเพิ่มความดันอากาศจะมีผลทำให้ขนาดของหยดละอองที่ได้เล็กลง และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองได้อยู่ในช่วง ±10 ไมครอน เมื่อความดันที่ให้กับหัวฉีดมีค่าอยู่ระหว่าง 2 – 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูงมากขึ้น จะมีผลทำให้ขนาดของหยดละอองมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของหยดละอองอยู่ในช่วง ±12 ไมครอน เมื่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าอยู่ระหว่าง 833 – 7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที (50 – 456 มิลลิลิตรต่อนาที)
3. คุณสมบัติของของเหลว คือ ความหนืดและแรงตึงผิว ที่ใช้ไม่มีผลมากนักต่อขนาดของหยดละอองที่เปลี่ยนแปลงไป และหัวฉีดชนิดนี้ยังสามารถฉีดพ่นของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งมีความหนืดสูงถึง 65 ตารางมิลลิเมตร/วินาที ได้อีกด้วย
4. ขนาดของหยดละอองที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน หรือมีการกระจายขนาดที่แคบ (มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 20) อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าต่ำ และการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้การกระจายขนาดกว้างขึ้นเพียงเล็กน้อย

5. รูปแบบของการสเปรย์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบกรวยเต็ม (Full cone) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการฉีดพ่นประมาณ 20 เซนติเมตร พบว่า การเพิ่มความดันอากาศไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการฉีดพ่น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวจะมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการฉีดพ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
6. ไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด เนื่องจากส่วนปลายของหัวฉีดมีลักษณะเป็นโพรงกว้างและระบบการทำงานของหัวฉีดสามารถทำความสะอาดท่อส่งของเหลวได้อย่างอัตโนมัติในขณะที่หัวฉีดทำงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.3 สรุปผลการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้หัวฉีด

จากการวัดประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของหัวฉีด ที่โรงโม่หิน บริษัทศิลาเลิศจิต จำกัด ทำการทดลองที่แหล่งกำเนิดโรงโม่ที่ 4 บริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอย โดยการดัดแปลงให้ระบบที่ทำการตรวจวัดเป็นระบบปิด ซึ่งความเข้มข้นของฝุ่นที่เกิดขึ้นในระบบที่มีการควบคุมปริมาตรนี้มีค่าอยู่ในช่วง 712.6 – 835.12 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ได้ข้อสรุปดังนี้

1. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการกำจัดฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงโม่หิน เนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นน้อย (ประมาณ 1 เซนติเมตร) และยังต้องใช้อุปกรณ์ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ และไม่สามารถทนทานกับการใช้งานในโรงโม่หินได้
2. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับหัวฉีดที่ใช้กันอยู่จริงในโรงโม่หิน ซึ่งข้อดีของการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง มีดังนี้คือ
    - อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้มีค่าน้อย (ประมาณ 510 มิลลิลิตรต่อนาที) ซึ่งใช้น้ำน้อยกว่าหัวฉีดที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมาก ที่ต้องใช้ปริมาณน้ำถึง 2,800 มิลลิลิตรต่อนาทีหรือมากกว่าในการฉีดพ่น
    - การกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จะแคบ มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, σ) น้อยกว่า 20 ซึ่งมีค่าการกระจายขนาดที่แคบกว่าการกระจายขนาดของหยดละอองที่ได้จากหัวอื่นๆที่ใช้กันทั่วไปในโรงโม่หินมาก ที่มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับหรือมากกว่า 102.04
    - ไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด เนื่องจากปลายของหัวฉีดมีลักษณะเป็นช่องโพรงกว้าง และท่อส่งของเหลวเปิดโล่งสู่บรรยากาศ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนของคลื่นเหนือเสียงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (Shock wave) ซึ่งเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณท่อส่งของเหลว ความดันสูงที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยดึงเอาสิ่งสกปรกออกจากท่อส่งน้ำ เป็นการทำความสะอาดท่อส่งของเหลวโดยอัตโนมัติในขณะที่หัวฉีดทำงาน จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันเนื่องจากแหล่งน้ำมีความสกปรก หรือมีฝุ่นมาติดเกาะที่ส่วนหัวของหัวฉีด
3. บริเวณที่ติดตั้งหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเพื่อทำการกำจัดฝุ่น ควรมีลักษณะเป็นระบบปิด เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด หรืออย่างน้อยที่สุดก็ควรกันลมไว้เพื่อให้การผสมของหยดละอองน้ำและฝุ่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4. ในการประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสำหรับหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง 1 หัว พบว่า มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนคิดเป็น 1.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน แต่มีค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องคิดเป็น 0.4 เท่าของหัวฉีดที่ใช้ในโรงโม่หิน ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในระยะยาวได้ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวฉีด เนื่องจากการใช้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงจะไม่เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของหัวฉีด นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีเพื่อการบำบัดน้ำ จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้ และยังไม่ทำให้คุณภาพของหินด้อยลง เนื่องจากหินที่ผ่านระบบกำจัดฝุ่นจะมีความชื้นน้อย และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมตะแกรงคัดขนาดและสายพาน เนื่องจากความเสียหายที่เกิดจากหินที่เปียกมากเกินไป

8.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับหัวฉีดสูงมากขึ้น จะทำให้หัวฉีดมีความร้อนสูงขึ้นและถ่ายทอดไปยังท่อส่งของเหลว เมื่อใช้เป็นระยะเวลานานจะส่งผลทำให้ท่อส่งของเหลวที่เป็นพลาสติกเกิดการหลอมละลายและหลุดออกจากหัวฉีด ซึ่งได้ทำการแก้ไขโดยการพันท่อส่งของเหลวด้วยเทปลอน เพื่อป้องกันความร้อนและเพิ่มความแน่นระหว่างรอยต่อของท่อส่งของเหลว แต่ก็ยังพบปัญหาเรื่องความร้อนกับการหลอมละลายของท่อพลาสติกอยู่บ้าง ในการที่จะนำไปใช้หรือทำการศึกษาในอนาคต จึงควรเลือกใช้ท่อพลาสติกที่มีคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนสูง เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน
2. ปัญหาเรื่องการติดขัดของสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จากการทดลองในบางครั้งจะพบว่า สเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง จะเกิดการสเปรย์ติดขัดเป็นจังหวะ ซึ่งจากการสังเกตทำให้ทราบว่าสาเหตุนั้นเกิดจากการประกอบชิ้นส่วนต่างๆของหัวฉีดให้ยึดติดกันไม่แน่นพอ จึงทำให้อากาศบางส่วนไหลย้อนเข้าไปในท่อส่งของเหลวขัดขวางการไหลของของเหลว ลักษณะการสเปรย์ที่ได้จึงติดขัดเป็นจังหวะ ดังนั้นในการประกอบชิ้นส่วนต่างๆของหัวฉีดจึงจำเป็นต้องขันส่วนประกอบต่างๆของหัวฉีดให้ยึดติดกันให้แน่น
3. ปัญหาเรื่องความไม่แน่นอนของปริมาณฝุ่นที่วัดได้ในบริเวณจุดที่ทำการตรวจวัดฝุ่น เนื่องจากบริเวณสายพาน ณ ตำแหน่งทางออกของปากซอย ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำการตรวจวัดฝุ่นมีลักษณะเป็นที่เปิดโล่ง ไม่สามารถควบคุมฝุ่นที่เกิดจากระบบอื่นได้ ค่าปริมาณฝุ่นที่วัดได้จึงไม่ใช่ค่าที่เกิดจากจุดตรวจวัดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถนำค่าที่ได้วิเคราะห์ผลการทดลองได้ จึงได้แก้ปัญหาโดยการดัดแปลงให้ระบบที่ทำการตรวจวัดมีลักษณะเป็นระบบปิด

4. เนื่องจากหัวฉีดชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเหมาะที่จะนำไปกำจัดฝุ่นในระบบปิด ซึ่งน่าที่จะนำหัวฉีดชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดฝุ่นโดยการใช้เครื่องไซโคลนสครับเบอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น เนื่องจากหัวฉีดชนิดนี้สามารถผลิตหยดละอองน้ำที่มีขนาดเล็กและใกล้เคียงกัน โดยไม่ต้องอาศัยแรงดันน้ำหรือการอัดอากาศสูง และปริมาณน้ำที่ใช้น้อยประมาณ 510 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหัวฉีดที่ใช้อยู่ในโรงโม่หินมาก ที่ต้องใช้ปริมาณน้ำถึง 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที หรือมากกว่า
5. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงสามารถผลิตหยดละอองที่มีขนาดเล็ก และมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงน่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กระบวนการผลิตยา ซึ่งต้องการส่งหรือฉีดพ่นวัตถุดิบในปริมาณที่แน่นอน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นตามต้องการ กระบวนการจุดระเบิดของเตาเผาและเครื่องยนต์ กระบวนการเคลือบผิว และการประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรม เป็นต้น
6. ในการที่จะศึกษาและพัฒนาหัวฉีดคลื่นเหนือเสียง ควรจะต้องมีเครื่องมือวัดขนาดของหยดละอองน้ำที่มีความสะดวก รวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ต่อไป
7. ควรติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลว เพื่อเพิ่มความสะดวกและแม่นยำในการวัด
8. ในการสร้างหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงทั้ง 2 ชนิด จำเป็นต้องสร้างอย่างประณีตและควบคุมให้ได้สัดส่วนตามการออกแบบ เพราะขนาดต่างๆของหัวฉีดมีผลต่อความถี่และรูปแบบของการสเปรย์ที่ได้
9. ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น เพื่อทำการออกแบบให้หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการฉีดพ่นของของเหลวได้
10. ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยออกแบบให้ขนาดของท่อส่งน้ำและอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อทำให้ขนาดของออร์ริฟิช (Orifice) มีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถออกแบบให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเรโซเนเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้สามารถเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางในการฉีดพ่นของของเหลวได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] กรมทรัพยากรธรณี. การแก้ปัญหามลภาวะจากการทำเหมืองหินและโรงโม่หิน กรณีศึกษา: โครงการแก้ไขปัญหาฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรมหินก่อสร้าง ในพื้นที่ทดลอง ต.หน้าพระลาน และบริเวณใกล้เคียง จ.สระบุรี วันที่ 30 ก.ย. – 1ต.ค. 2541. สระบุรี: กรมทรัพยากรธรณีและ คณะวิศวกรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541

[2] กรมควบคุมมลพิษ. รายงานฉบับที่ 1 การพัฒนาและสร้างระบบสาธิตการกำจัดฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน,คพ 03-016. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2540.

[3] กรมควบคุมมลพิษ. รายงานฉบับที่ 2 การพัฒนาและสร้างระบบสาธิตการกำจัดฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน,คพ 03-015. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2541.

[4] กมล ธนะนพวรรณ. การพัฒนาตัวคูณอัตราการปล่อยฝุ่นละอองจากโรงโม่หิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[5] ภิญโญ มีชำนะ. ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบการผลิตและมาตรการเสริมในการลดปัญหาฝุ่นในโรงโม่. เอกสารประกอบการสัมมนา โครงการพัฒนาและสร้างระบบสาธิตการกำจัดฝุ่นละอองจากอุตสาหกรรมโม่ บด และย่อยหิน. กรุงเทพ: กรมทรัพยากรธรณีและ คณะวิศวกรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

[6] สุชาดา ณรินทร์ศักดิ์ชัย. แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบกำจัดฝุ่นในที่เปิดโล่งโดยการฉีดหยดละอองน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[7] Kokubo, Kakuro. Japan. EP Patent 0,202,101(1986)

[8] J.Michael Soth, James R. Klemm, both of Des Moines. Ultrasonic spray nozzle and method. Iowa. US Patent 4,659,014 (1987)

[9] Sindayihebura D, Cousin J, Dumouchel C.: Experimental and theoretical study of sprays produced by ultrasonic atomizers. Particle and Particle System Characterization. 14(1997): 93-101.

[10] F . Lacas, P. Versaelve, P. Scouflaire, G. Coeur-Joly : Design and performance of an ultrasonic atomization system for experimental combustion application. Particle and Particle System Characterization. 11(1994): 166-171.

[11] M. N. Topp, P. Eisenklam: Industrial and medical use of ultrasonic atomization. Ultrasonic 10(1972) 127-133.

[12] Hesketh, H. E. Understanding and controlling air pollution. 2nd ed. Michigan: Aann Arbor Dcience Publisher. 1974.

[13] U.S. environment protection agency. Compilation of air pollution emission factor (AP-42). 1Vols. North Carolina: Research Triangle park. 1992.

[14] Richard J. Seibel.: Dust control at a transfer point using foam and water spray. Us. Department of the interior Burean of Mine. 12p.illus. 1976.

[15] Paul Cooper and Peter C Arnold. Air Entrainment and Dust Generation from a Falling Stream of Bulk Material. KONA. 13: 125- 134. 1995.

[16] Arthur H. Lefebvre. Atomization and Sprays. Hemishere Publishing Corporation. 1989.

[17] Harvey L. Berger. Ultrasonic Liquid Atomization Theory and Application. New York: Partridge Hill Publishers. 1998.

[18] V.N. Bindal, S. K. Jain, Y. Kumar: Performance characteristics of an ultrasonic atomizer. Indian J. Technol. 24(1986): 153 –156.

[19] M. N. Topp, P. Eisenklam: Ultrasonic atomization – a photographic study of the mechanisms of disintegration. Aerosol Sci. 4(1973): 17-25.

[20] Sindayihebura D., Bolle L.: Ultrasonic atomization of liquids - stability analysis of the viscous liquid film free surface. Atomization and Sprays. 8(1998): 217-233.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำเมื่อจำนวนหยดที่นับมีค่าแตกต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	359	หยด

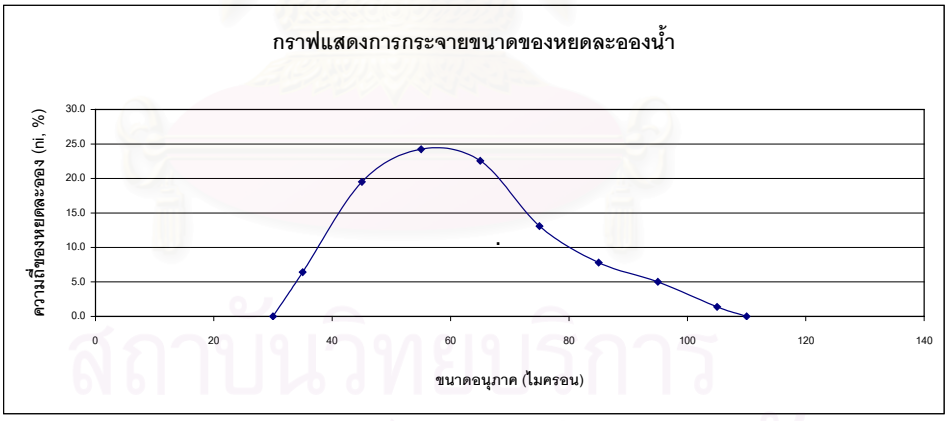
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i x n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 x n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 x n_i$
< 30	30	0	0.000	0.000	0.0	31.685	0	1.477	0.000	0.29823	0.000
30 - 40	35	23	6.407	6.407	224.2	26.685	4562	1.544	9.892	0.23129	0.343
40 -50	45	70	19.499	25.905	877.4	16.685	5428	1.653	32.235	0.12214	0.291
50 - 60	55	87	24.234	50.139	1332.9	6.685	1083	1.740	42.176	0.03499	0.030
60 - 70	65	81	22.563	72.702	1466.6	-3.315	248	1.813	40.904	-0.03756	0.032
70 - 80	75	47	13.092	85.794	981.9	-13.315	2321	1.875	24.548	-0.09971	0.130
80 - 90	85	28	7.799	93.593	663.0	-23.315	4240	1.929	15.048	-0.15406	0.185
90 - 100	95	18	5.014	98.607	476.3	-33.315	5565	1.978	9.916	-0.20237	0.205
100 - 110	105	5	1.393	100.000	146.2	-43.315	2613	2.021	2.815	-0.24583	0.084
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-48.315	0	2.041	0.000	-0.26604	0.000
	Total	359	100.0		6168.5		26060		177.536		1.300

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 61.685

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.224

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 59.615

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.302



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	541	หยด

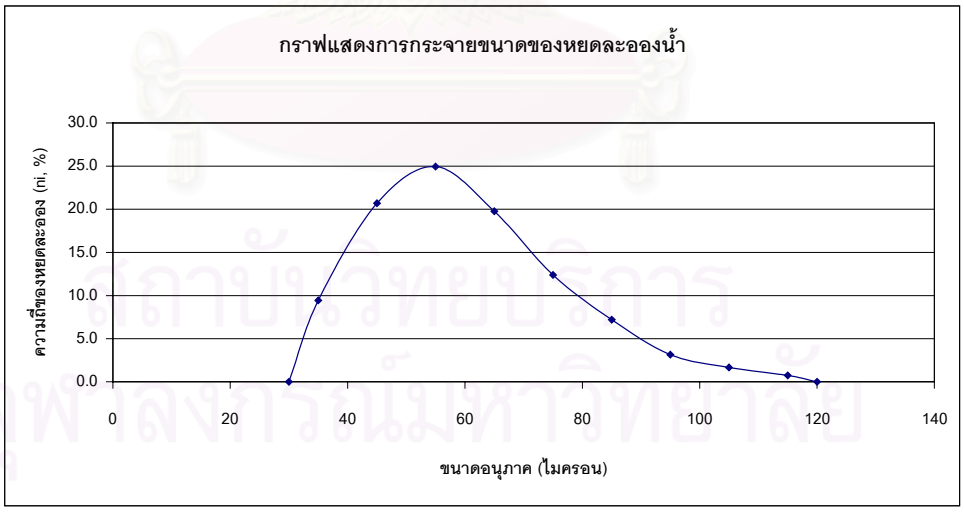
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 30	30	0	0.000	0.000	0.0	30.194	0	1.477	0.000	0.28585	0.000
30 - 40	35	51	9.427	9.427	329.9	25.194	5984	1.544	14.556	0.21891	0.452
40 -50	45	112	20.702	30.129	931.6	15.194	4779	1.653	34.225	0.10976	0.249
50 - 60	55	135	24.954	55.083	1372.5	5.194	673	1.740	43.429	0.02261	0.013
60 - 70	65	107	19.778	74.861	1285.6	-4.806	457	1.813	35.856	-0.04994	0.049
70 - 80	75	67	12.384	87.246	928.8	-14.806	2715	1.875	23.222	-0.11209	0.156
80 - 90	85	39	7.209	94.455	612.8	-24.806	4436	1.929	13.909	-0.16644	0.200
90 - 100	95	17	3.142	97.597	298.5	-34.806	3807	1.978	6.215	-0.21475	0.145
100 - 110	105	9	1.664	99.261	174.7	-44.806	3340	2.021	3.362	-0.25821	0.111
110 - 120	115	4	0.739	100.000	85.0	-54.806	2221	2.061	1.524	-0.29772	0.066
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-59.806	0	2.079	0.000	-0.31621	0.000
	Total	541	100.0		6019.4		28411		176.297		1.440

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 60.194

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.941

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 57.939

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.320



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	756	หยด

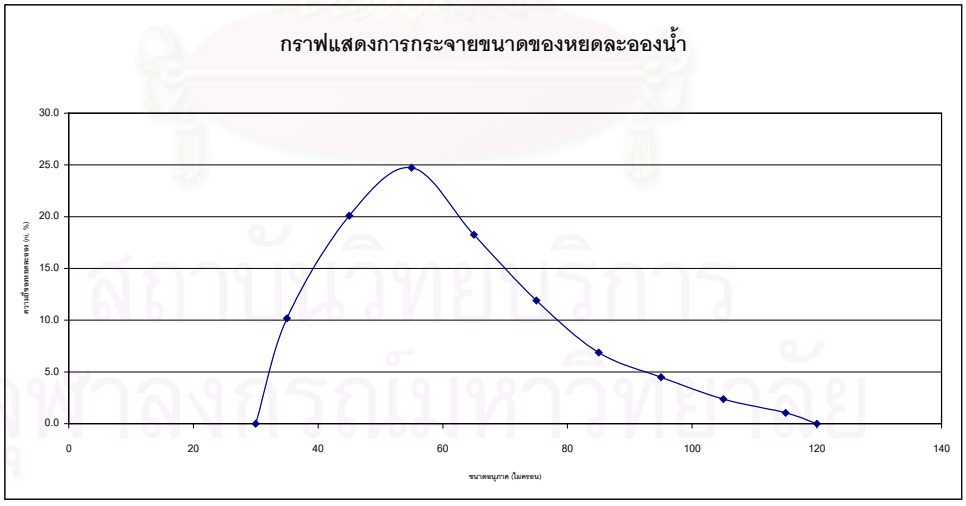
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 30	30	0	0.000	0.000	0.0	30.847	0	1.477	0.000	0.28876	0.000
30 - 40	35	77	10.185	10.185	356.5	25.847	6804	1.544	15.727	0.22181	0.501
40 -50	45	152	20.106	30.291	904.8	15.847	5049	1.653	33.239	0.11267	0.255
50 - 60	55	187	24.735	55.026	1360.4	5.847	846	1.740	43.049	0.02552	0.016
60 - 70	65	138	18.254	73.280	1186.5	-4.153	315	1.813	33.093	-0.04703	0.040
70 - 80	75	90	11.905	85.185	892.9	-14.153	2385	1.875	22.322	-0.10918	0.142
80 - 90	85	52	6.878	92.063	584.7	-24.153	4013	1.929	13.271	-0.16354	0.184
90 - 100	95	34	4.497	96.561	427.2	-34.153	5246	1.978	8.895	-0.21184	0.202
100 - 110	105	18	2.381	98.942	250.0	-44.153	4642	2.021	4.812	-0.25531	0.155
110 - 120	115	8	1.058	100.000	121.7	-54.153	3103	2.061	2.181	-0.29482	0.092
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-59.153	0	2.079	0.000	-0.31330	0.000
	Total	756	100.0		6084.7		32402		176.588		1.588

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 60.847

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.091

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 58.329

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.339



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	314	หยด

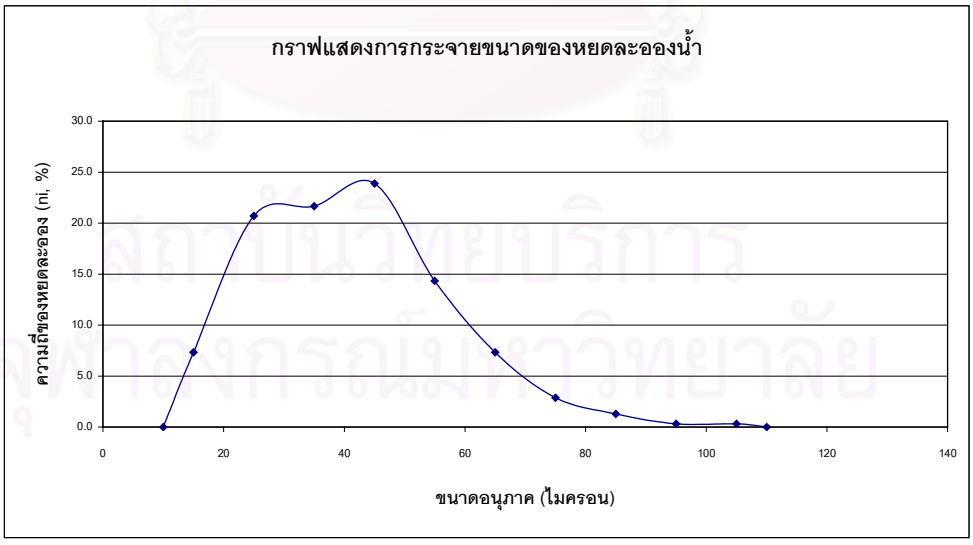
min	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.115	0	1.000	0.000	0.57805	0.000
10	15	23	7.325	7.325	109.9	26.115	4995	1.176	8.615	0.40196	1.184
20	25	65	20.701	28.025	517.5	16.115	5376	1.398	28.938	0.18011	0.672
30	35	68	21.656	49.682	758.0	6.115	810	1.544	33.438	0.03399	0.025
40	45	75	23.885	73.567	1074.8	-3.885	361	1.653	39.488	-0.07516	0.135
50	55	45	14.331	87.898	788.2	-13.885	2763	1.740	24.942	-0.16231	0.378
60	65	23	7.325	95.223	476.1	-23.885	4179	1.813	13.279	-0.23486	0.404
70	75	9	2.866	98.089	215.0	-33.885	3291	1.875	5.374	-0.29701	0.253
80	85	4	1.274	99.363	108.3	-43.885	2453	1.929	2.458	-0.35136	0.157
90	95	1	0.318	99.682	30.3	-53.885	925	1.978	0.630	-0.39967	0.051
100	105	1	0.318	100.000	33.4	-63.885	1300	2.021	0.644	-0.44313	0.063
110	110	0	0.000	100.000	0.0	-68.885	0	2.041	0.000	-0.46334	0.000
	Total	314	100.000		4111.5		26452		157.805		3.320

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.115

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.346

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.849

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.525



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	554	หยด

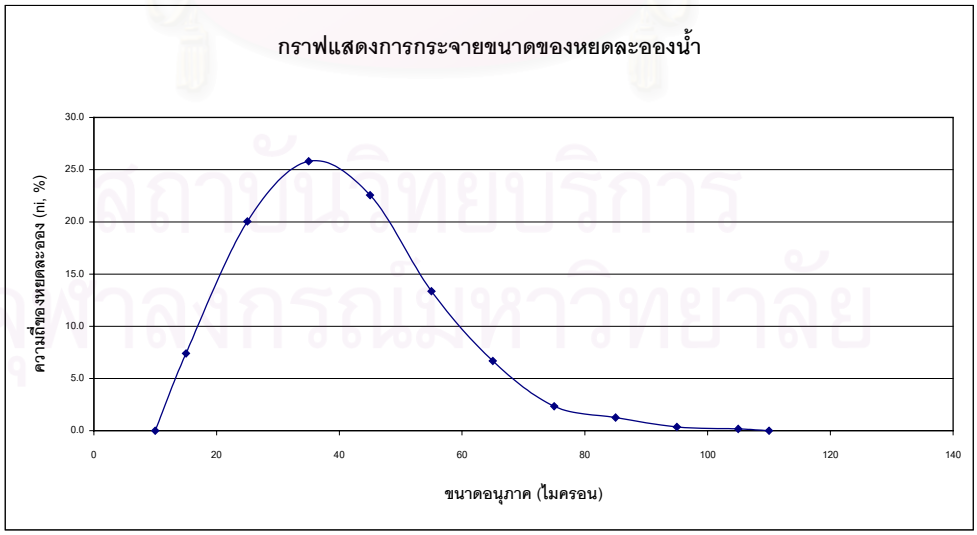
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.361	0	1.000	0.000	0.57142	0.000
10 - 20	15	41	7.401	7.401	111.0	25.361	4760	1.176	8.704	0.39533	1.157
20 - 30	25	111	20.036	27.437	500.9	15.361	4728	1.398	28.009	0.17348	0.603
30 - 40	35	143	25.812	53.249	903.4	5.361	742	1.544	39.856	0.02735	0.019
40 -50	45	125	22.563	75.812	1015.3	-4.639	486	1.653	37.302	-0.08179	0.151
50 - 60	55	74	13.357	89.170	734.7	-14.639	2862	1.740	23.247	-0.16894	0.381
60 - 70	65	37	6.679	95.848	434.1	-24.639	4055	1.813	12.108	-0.24149	0.389
70 - 80	75	13	2.347	98.195	176.0	-34.639	2816	1.875	4.400	-0.30364	0.216
80 - 90	85	7	1.264	99.458	107.4	-44.639	2518	1.929	2.438	-0.35800	0.162
90 - 100	95	2	0.361	99.819	34.3	-54.639	1078	1.978	0.714	-0.40630	0.060
100 - 110	105	1	0.181	100.000	19.0	-64.639	754	2.021	0.365	-0.44977	0.037
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-69.639	0	2.041	0.000	-0.46997	0.000
	Total	554	100.000		4036.1		24797		157.142		3.175

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.361

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.827

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.275

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.510



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.48	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	762	หยด

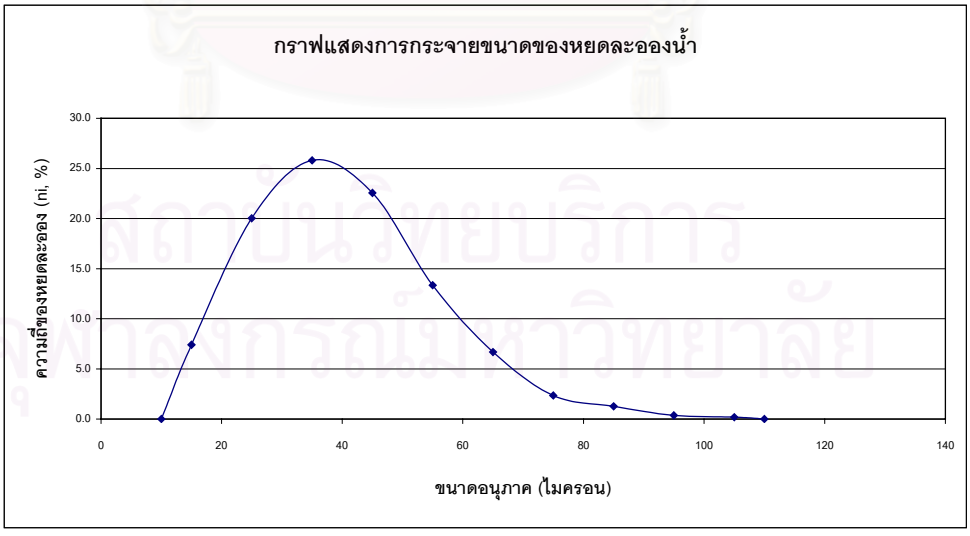
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i x\ n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 x\ n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 x\ n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.630	0	1.000	0.000	0.56524	0.000
10 - 20	15	84	11.024	11.024	165.4	25.630	7241	1.176	12.965	0.38914	1.669
20 - 30	25	150	19.685	30.709	492.1	15.630	4809	1.398	27.519	0.16730	0.551
30 - 40	35	172	22.572	53.281	790.0	5.630	715	1.544	34.853	0.02117	0.010
40 -50	45	157	20.604	73.885	927.2	-4.370	393	1.653	34.062	-0.08798	0.159
50 - 60	55	87	11.417	85.302	628.0	-14.370	2358	1.740	19.870	-0.17513	0.350
60 - 70	65	64	8.399	93.701	545.9	-24.370	4988	1.813	15.227	-0.24768	0.515
70 - 80	75	28	3.675	97.375	275.6	-34.370	4341	1.875	6.890	-0.30983	0.353
80 - 90	85	11	1.444	98.819	122.7	-44.370	2842	1.929	2.785	-0.36418	0.191
90 - 100	95	6	0.787	99.606	74.8	-54.370	2328	1.978	1.557	-0.41249	0.134
100 - 110	105	3	0.394	100.000	41.3	-64.370	1631	2.021	0.796	-0.45595	0.082
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-69.370	0	2.041	0.000	-0.47616	0.000
	Total	762	100.000		4063.0		31647		156.524		4.015

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.630

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.879

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.748

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.590



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	337	หยด

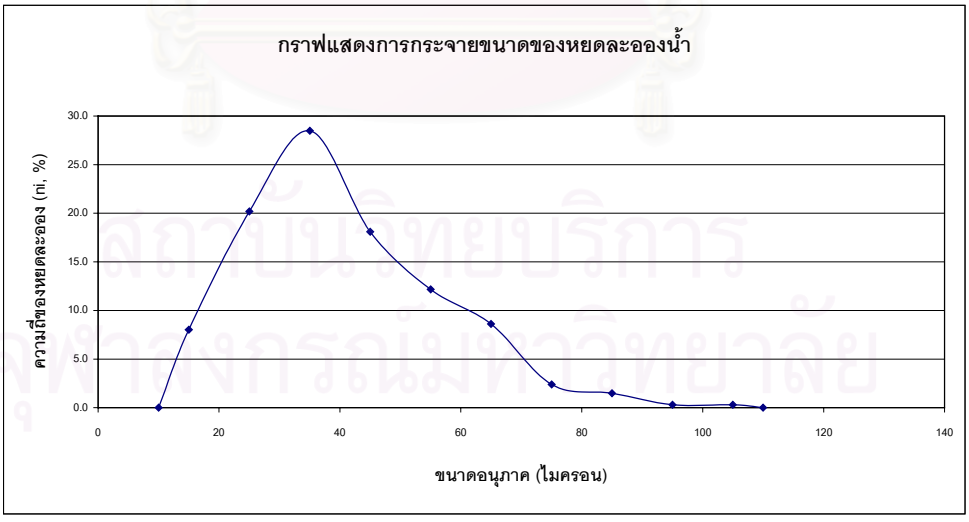
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.282	0	1.000	0.000	0.56815	0.000
10 - 20	15	27	8.012	8.012	120.2	25.282	5121	1.176	9.423	0.39206	1.232
20 - 30	25	68	20.178	28.190	504.5	15.282	4712	1.398	28.208	0.17021	0.585
30 - 40	35	96	28.487	56.677	997.0	5.282	795	1.544	43.985	0.02408	0.017
40 -50	45	61	18.101	74.777	814.5	-4.718	403	1.653	29.925	-0.08506	0.131
50 - 60	55	41	12.166	86.944	669.1	-14.718	2635	1.740	21.174	-0.17221	0.361
60 - 70	65	29	8.605	95.549	559.3	-24.718	5258	1.813	15.601	-0.24476	0.516
70 - 80	75	8	2.374	97.923	178.0	-34.718	2861	1.875	4.451	-0.30691	0.224
80 - 90	85	5	1.484	99.407	126.1	-44.718	2967	1.929	2.863	-0.36127	0.194
90 - 100	95	1	0.297	99.703	28.2	-54.718	888	1.978	0.587	-0.40957	0.050
100 - 110	105	1	0.297	100.000	31.2	-64.718	1243	2.021	0.600	-0.45304	0.061
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-69.718	0	2.041	0.000	-0.47324	0.000
	Total	337	100.000		4028.2		26884		156.815		3.368

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.282

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.479

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.996

gemetric standard deviation $\sigma_g = \log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.529



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	521	หยด

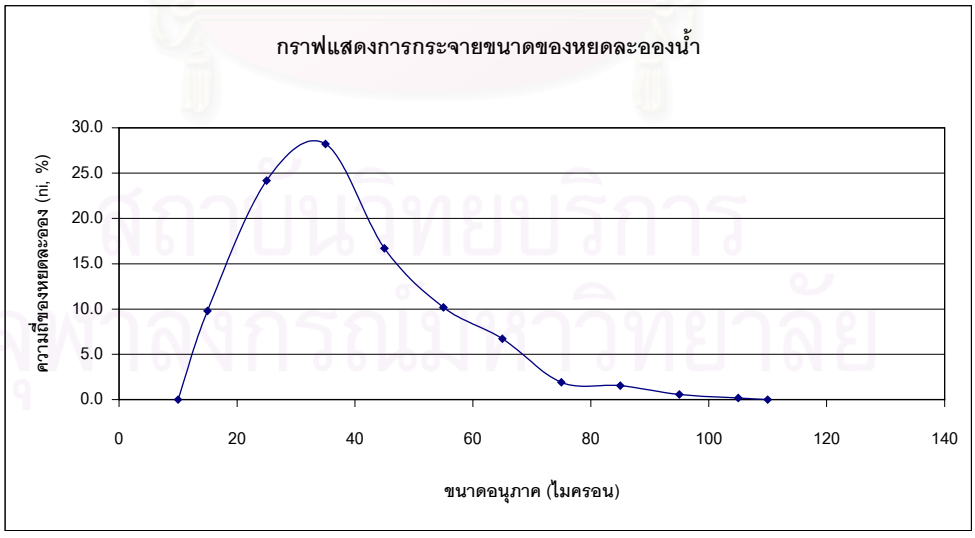
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.359	0	1.000	0.000	0.54465	0.000
10 - 20	15	51	9.789	9.789	146.8	23.359	5341	1.176	11.513	0.36855	1.330
20 - 30	25	126	24.184	33.973	604.6	13.359	4316	1.398	33.808	0.14671	0.521
30 - 40	35	147	28.215	62.188	987.5	3.359	318	1.544	43.566	0.00058	0.000
40 -50	45	87	16.699	78.887	751.4	-6.641	736	1.653	27.606	-0.10857	0.197
50 - 60	55	53	10.173	89.060	559.5	-16.641	2817	1.740	17.704	-0.19572	0.390
60 - 70	65	35	6.718	95.777	436.7	-26.641	4768	1.813	12.179	-0.26827	0.483
70 - 80	75	10	1.919	97.697	144.0	-36.641	2577	1.875	3.599	-0.33042	0.210
80 - 90	85	8	1.536	99.232	130.5	-46.641	3340	1.929	2.963	-0.38477	0.227
90 - 100	95	3	0.576	99.808	54.7	-56.641	1847	1.978	1.139	-0.43308	0.108
100 - 110	105	1	0.192	100.000	20.2	-66.641	852	2.021	0.388	-0.47654	0.044
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-71.641	0	2.041	0.000	-0.49675	0.000
	Total	521	100.000		3835.9		26914		154.465		3.509

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.359

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.488

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.047

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.543



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	757	หยด

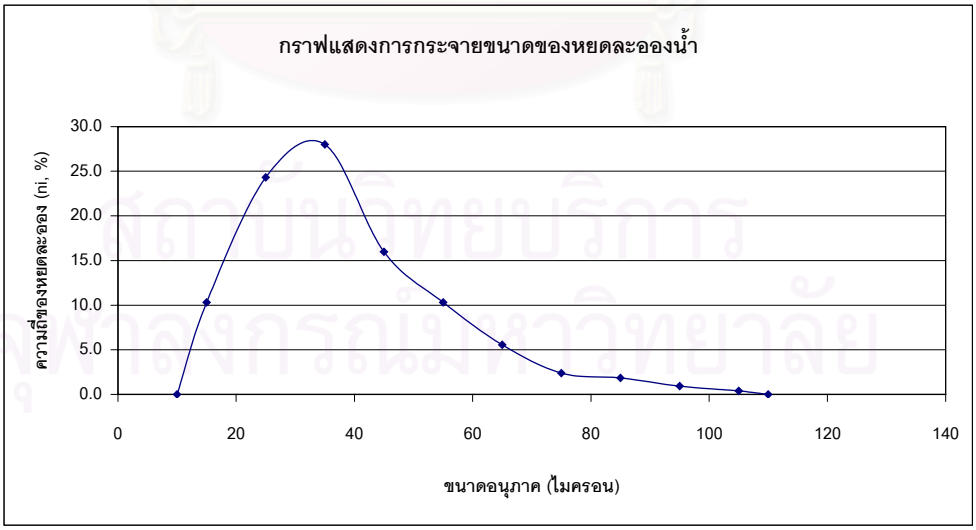
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i x\ n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 x\ n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 x\ n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.540	0	1.000	0.000	0.54412	0.000
10 - 20	15	78	10.304	10.304	154.6	23.540	5710	1.176	12.118	0.36803	1.396
20 - 30	25	184	24.306	34.610	607.7	13.540	4456	1.398	33.979	0.14618	0.519
30 - 40	35	212	28.005	62.616	980.2	3.540	351	1.544	43.242	0.00005	0.000
40 -50	45	121	15.984	78.600	719.3	-6.460	667	1.653	26.425	-0.10909	0.190
50 - 60	55	78	10.304	88.904	566.7	-16.460	2792	1.740	17.932	-0.19624	0.397
60 - 70	65	42	5.548	94.452	360.6	-26.460	3884	1.813	10.058	-0.26879	0.401
70 - 80	75	18	2.378	96.830	178.3	-36.460	3161	1.875	4.459	-0.33094	0.260
80 - 90	85	14	1.849	98.679	157.2	-46.460	3992	1.929	3.568	-0.38530	0.275
90 - 100	95	7	0.925	99.604	87.8	-56.460	2948	1.978	1.829	-0.43360	0.174
100 - 110	105	3	0.396	100.000	41.6	-66.460	1750	2.021	0.801	-0.47707	0.090
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-71.460	0	2.041	0.000	-0.49727	0.000
	Total	757	100.000		3854.0		29711		154.412		3.702

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.540

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.324

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.004

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.561



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	370	หยด

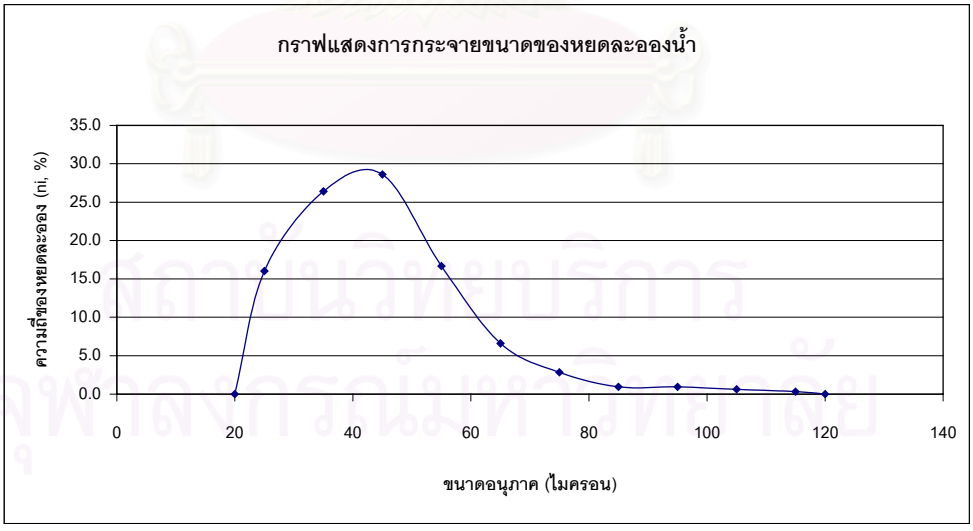
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	24.486	0	1.301	0.000	0.32936	0.000
20 - 30	25	32	8.649	8.649	216.2	19.486	3284	1.398	12.090	0.23245	0.467
30 - 40	35	131	35.405	44.054	1239.2	9.486	3186	1.544	54.668	0.08633	0.264
40 -50	45	103	27.838	71.892	1252.7	-0.514	7	1.653	46.022	-0.02282	0.014
50 - 60	55	53	14.324	86.216	787.8	-10.514	1583	1.740	24.930	-0.10997	0.173
60 - 70	65	35	9.459	95.676	614.9	-20.514	3981	1.813	17.149	-0.18252	0.315
70 - 80	75	12	3.243	98.919	243.2	-30.514	3020	1.875	6.081	-0.24467	0.194
80 - 90	85	3	0.811	99.730	68.9	-40.514	1331	1.929	1.564	-0.29902	0.072
90 - 100	95	1	0.270	100.000	25.7	-50.514	690	1.978	0.535	-0.34733	0.033
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-55.514	0	2.000	0.000	-0.36961	0.000
	Total	370	100.000		4448.6		17082		163.039		1.533

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 44.486

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.136

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.697

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.332



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	530	หยด

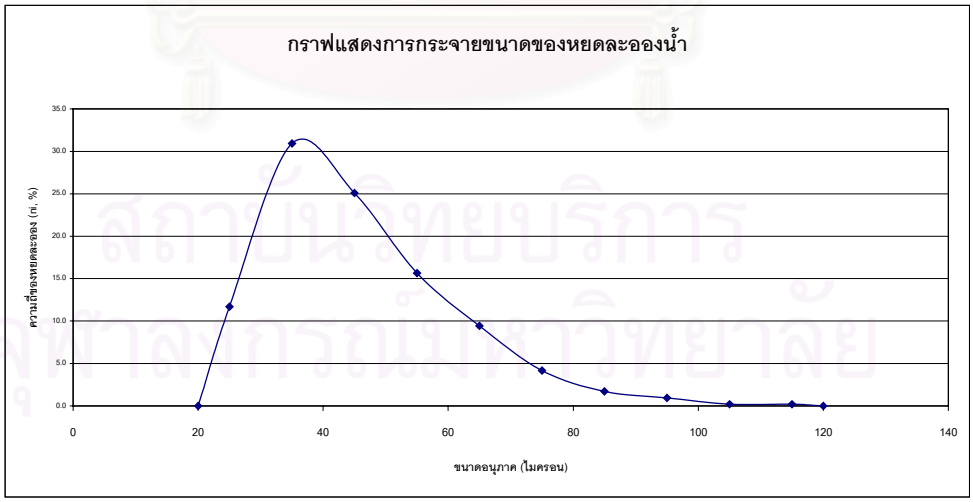
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i x\ n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 x\ n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 x\ n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.660	0	1.301	0.000	0.33569	0.000
20 - 30	25	62	11.698	11.698	292.5	20.660	4993	1.398	16.353	0.23878	0.667
30 - 40	35	164	30.943	42.642	1083.0	10.660	3517	1.544	47.779	0.09265	0.266
40 -50	45	133	25.094	67.736	1129.2	0.660	11	1.653	41.486	-0.01650	0.007
50 - 60	55	83	15.660	83.396	861.3	-9.340	1366	1.740	27.255	-0.10365	0.168
60 - 70	65	50	9.434	92.830	613.2	-19.340	3529	1.813	17.103	-0.17620	0.293
70 - 80	75	22	4.151	96.981	311.3	-29.340	3573	1.875	7.783	-0.23835	0.236
80 - 90	85	9	1.698	98.679	144.3	-39.340	2628	1.929	3.276	-0.29270	0.145
90 - 100	95	5	0.943	99.623	89.6	-49.340	2297	1.978	1.866	-0.34101	0.110
100 - 110	105	1	0.189	99.811	19.8	-59.340	664	2.021	0.381	-0.38447	0.028
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-69.340	907	2.061	0.389	-0.42398	0.034
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.340	0	2.079	0.000	-0.44247	0.000
	Total	530	100.000		4566.0		23485		163.672		1.953

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.660

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.402

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.323

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.382



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	728	หยด

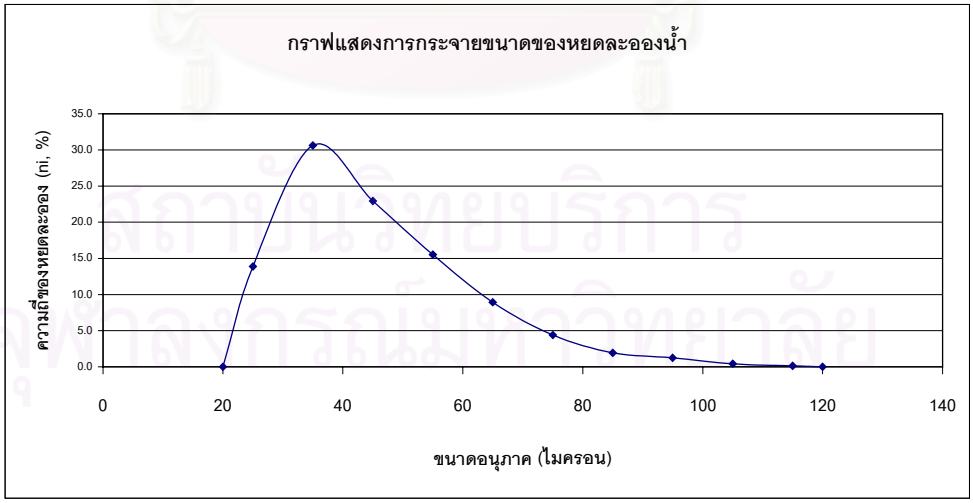
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.549	0	1.301	0.000	0.33227	0.000
20 - 30	25	101	13.874	13.874	346.8	20.549	5859	1.398	19.394	0.23536	0.769
30 - 40	35	223	30.632	44.505	1072.1	10.549	3409	1.544	47.298	0.08923	0.244
40 -50	45	167	22.940	67.445	1032.3	0.549	7	1.653	37.924	-0.01991	0.009
50 - 60	55	113	15.522	82.967	853.7	-9.451	1386	1.740	27.014	-0.10706	0.178
60 - 70	65	65	8.929	91.896	580.4	-19.451	3378	1.813	16.187	-0.17961	0.288
70 - 80	75	32	4.396	96.291	329.7	-29.451	3812	1.875	8.242	-0.24176	0.257
80 - 90	85	14	1.923	98.214	163.5	-39.451	2993	1.929	3.710	-0.29612	0.169
90 - 100	95	9	1.236	99.451	117.4	-49.451	3023	1.978	2.445	-0.34442	0.147
100 - 110	105	3	0.412	99.863	43.3	-59.451	1456	2.021	0.833	-0.38789	0.062
110 - 120	115	1	0.137	100.000	15.8	-69.451	663	2.061	0.283	-0.42740	0.025
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.451	0	2.079	0.000	-0.44588	0.000
	Total	728	100.000		4554.9		25986		163.330		2.147

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.549

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.201

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.983

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.404



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.8	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	1120	หยด

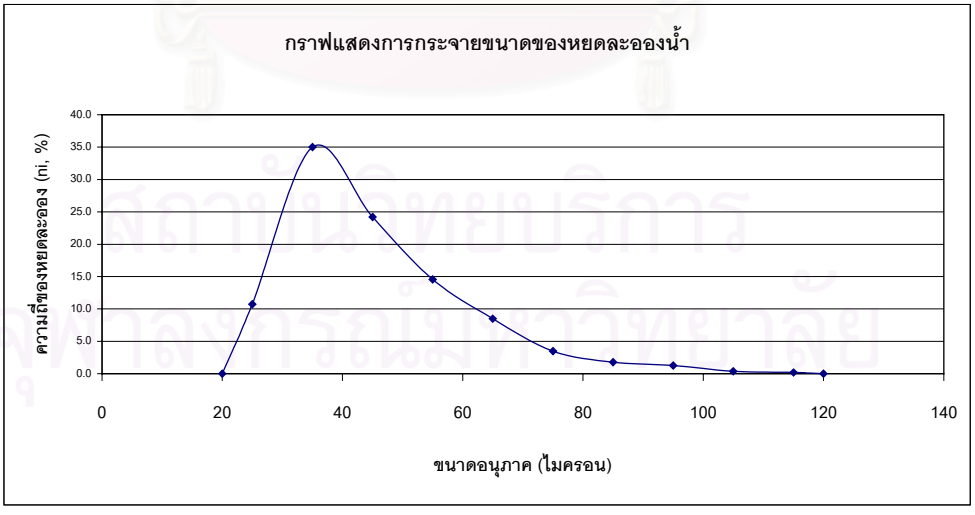
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.232	0	1.301	0.000	0.33162	0.000
20 - 30	25	120	10.714	10.714	267.9	20.232	4386	1.398	14.978	0.23471	0.590
30 - 40	35	392	35.000	45.714	1225.0	10.232	3664	1.544	54.042	0.08858	0.275
40 -50	45	271	24.196	69.911	1088.8	0.232	1	1.653	40.002	-0.02057	0.010
50 - 60	55	163	14.554	84.464	800.4	-9.768	1389	1.740	25.328	-0.10772	0.169
60 - 70	65	95	8.482	92.946	551.3	-19.768	3315	1.813	15.377	-0.18027	0.276
70 - 80	75	39	3.482	96.429	261.2	-29.768	3086	1.875	6.529	-0.24241	0.205
80 - 90	85	20	1.786	98.214	151.8	-39.768	2824	1.929	3.445	-0.29677	0.157
90 - 100	95	14	1.250	99.464	118.8	-49.768	3096	1.978	2.472	-0.34508	0.149
100 - 110	105	4	0.357	99.821	37.5	-59.768	1276	2.021	0.722	-0.38854	0.054
110 - 120	115	2	0.179	100.000	20.5	-69.768	869	2.061	0.368	-0.42805	0.033
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.768	0	2.079	0.000	-0.44653	0.000
	Total	1120	100.000		4523.2		23905		163.265		1.917

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.232

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.539

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.919

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.378



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	354	หยด

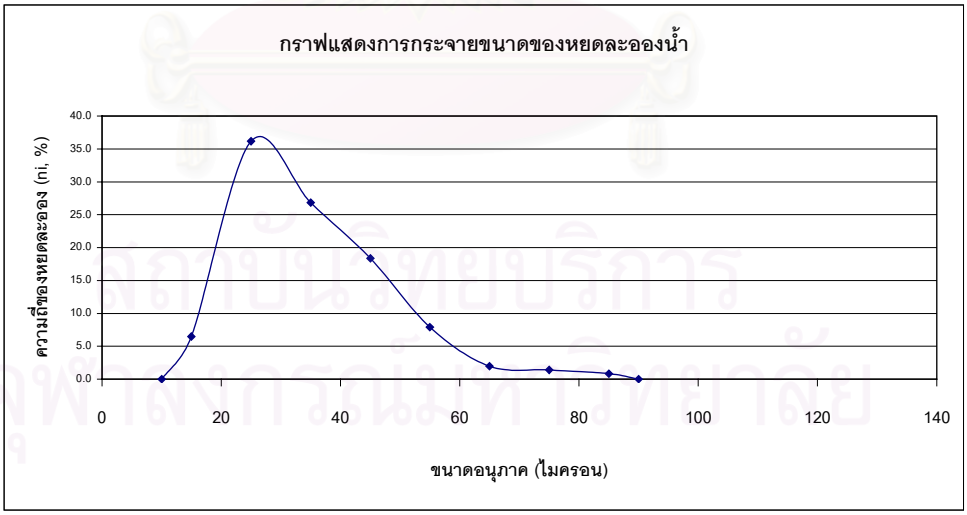
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	25.085	0	1.000	0.000	0.51615	0.000
10 - 20	15	23	6.497	6.497	97.5	20.085	2621	1.176	7.641	0.34006	0.751
20 - 30	25	128	36.158	42.655	904.0	10.085	3677	1.398	50.547	0.11821	0.505
30 - 40	35	95	26.836	69.492	939.3	0.085	0	1.544	41.437	-0.02792	0.021
40 -50	45	65	18.362	87.853	826.3	-9.915	1805	1.653	30.356	-0.13707	0.345
50 - 60	55	28	7.910	95.763	435.0	-19.915	3137	1.740	13.766	-0.22422	0.398
60 - 70	65	7	1.977	97.740	128.5	-29.915	1770	1.813	3.585	-0.29677	0.174
70 - 80	75	5	1.412	99.153	105.9	-39.915	2250	1.875	2.648	-0.35891	0.182
80 - 90	85	3	0.847	100.000	72.0	-49.915	2111	1.929	1.635	-0.41327	0.145
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-54.915	0	1.954	0.000	-0.43810	0.000
	Total	354	100.000		3508.5		17372		151.615		2.521

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 35.085

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.247

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 32.821

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.444



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	566	หยด

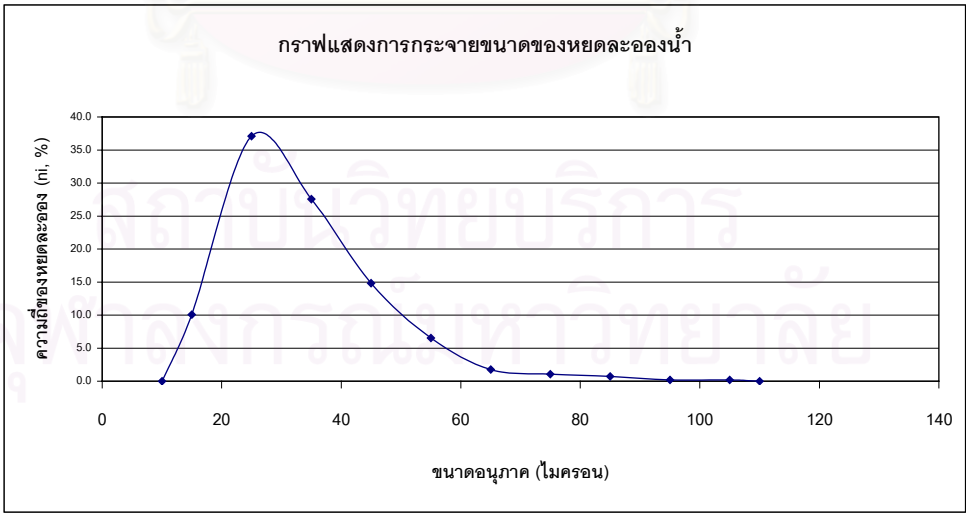
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	23.604	0	1.000	0.000	0.49441	0.000
10 - 20	15	57	10.071	10.071	151.1	18.604	3486	1.176	11.844	0.31832	1.020
20 - 30	25	210	37.102	47.173	927.6	8.604	2747	1.398	51.867	0.09647	0.345
30 - 40	35	156	27.562	74.735	964.7	-1.396	54	1.544	42.557	-0.04965	0.068
40 -50	45	84	14.841	89.576	667.8	-11.396	1927	1.653	24.535	-0.15880	0.374
50 - 60	55	37	6.537	96.113	359.5	-21.396	2993	1.740	11.377	-0.24595	0.395
60 - 70	65	10	1.767	97.880	114.8	-31.396	1742	1.813	3.203	-0.31850	0.179
70 - 80	75	6	1.060	98.940	79.5	-41.396	1817	1.875	1.988	-0.38065	0.154
80 - 90	85	4	0.707	99.647	60.1	-51.396	1867	1.929	1.364	-0.43500	0.134
90 - 100	95	1	0.177	99.823	16.8	-61.396	666	1.978	0.349	-0.48331	0.041
100 - 110	105	1	0.177	100.000	18.6	-71.396	901	2.021	0.357	-0.52677	0.049
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-76.396	0	2.041	0.000	-0.54698	0.000
	Total	566	100.000		3360.4		18197		149.441		2.760

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.604

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.558

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.219

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.469



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	768	หยด

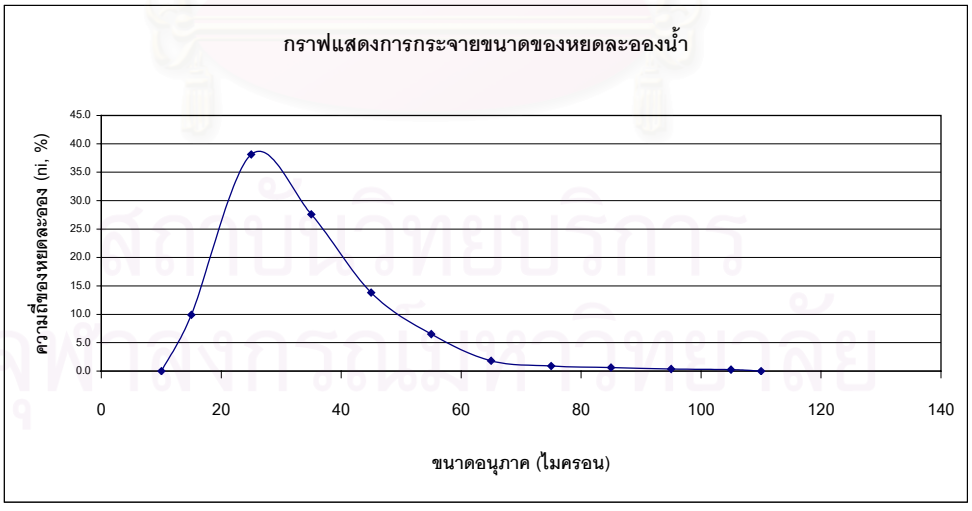
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	23.542	0	1.000	0.000	0.49311	0.000
10 - 20	15	76	9.896	9.896	148.4	18.542	3402	1.176	11.638	0.31702	0.995
20 - 30	25	293	38.151	48.047	953.8	8.542	2784	1.398	53.333	0.09517	0.346
30 - 40	35	212	27.604	75.651	966.1	-1.458	59	1.544	42.623	-0.05096	0.072
40 -50	45	106	13.802	89.453	621.1	-11.458	1812	1.653	22.818	-0.16010	0.354
50 - 60	55	50	6.510	95.964	358.1	-21.458	2998	1.740	11.330	-0.24725	0.398
60 - 70	65	14	1.823	97.786	118.5	-31.458	1804	1.813	3.305	-0.31980	0.186
70 - 80	75	7	0.911	98.698	68.4	-41.458	1567	1.875	1.709	-0.38195	0.133
80 - 90	85	5	0.651	99.349	55.3	-51.458	1724	1.929	1.256	-0.43631	0.124
90 - 100	95	3	0.391	99.740	37.1	-61.458	1475	1.978	0.773	-0.48461	0.092
100 - 110	105	2	0.260	100.000	27.3	-71.458	1330	2.021	0.526	-0.52808	0.073
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-76.458	0	2.041	0.000	-0.54828	0.000
	Total	768	100.000		3354.2		18954		149.311		2.771

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.542

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.837

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.125

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.470



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ต
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.22	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.0	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
จำนวนหยดที่ทำการนับ	:	1011	หยด

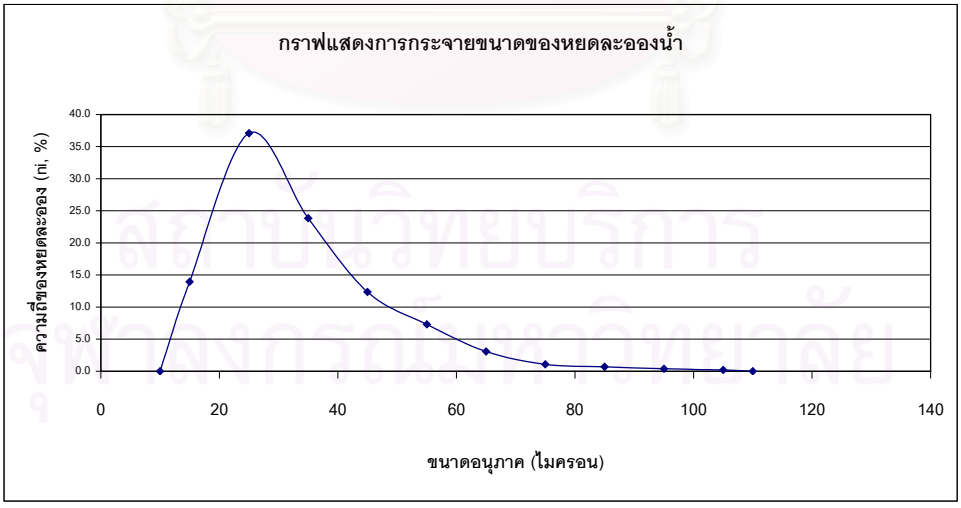
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	23.279	0	1.000	0.000	0.48358	0.000
10 - 20	15	141	13.947	13.947	209.2	18.279	4660	1.176	16.402	0.30749	1.319
20 - 30	25	375	37.092	51.039	927.3	8.279	2542	1.398	51.852	0.08564	0.272
30 - 40	35	241	23.838	74.876	834.3	-1.721	71	1.544	36.807	-0.06049	0.087
40 -50	45	125	12.364	87.240	556.4	-11.721	1699	1.653	20.440	-0.16963	0.356
50 - 60	55	74	7.319	94.560	402.6	-21.721	3453	1.740	12.739	-0.25678	0.483
60 - 70	65	31	3.066	97.626	199.3	-31.721	3085	1.813	5.559	-0.32933	0.333
70 - 80	75	11	1.088	98.714	81.6	-41.721	1894	1.875	2.040	-0.39148	0.167
80 - 90	85	7	0.692	99.407	58.9	-51.721	1852	1.929	1.336	-0.44584	0.138
90 - 100	95	4	0.396	99.802	37.6	-61.721	1507	1.978	0.782	-0.49414	0.097
100 - 110	105	2	0.198	100.000	20.8	-71.721	1018	2.021	0.400	-0.53761	0.057
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-76.721	0	2.041	0.000	-0.55781	0.000
	Total	1011	100.000		3327.9		21781		148.358		3.307

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.279

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.833

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 30.450

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.523



ภาคผนวก ข.

ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวัดความหนืดของของเหลว

การวัดความหนืดของของเหลวทำได้โดยการใช้เครื่อง Viscometers Cannon-Fenske ซึ่งผลของการวัดความหนืดของของเหลวชนิดต่างๆได้แสดงดังตารางที่

ตารางที่ ข.1 *ผลการวัดความหนืดของของเหลว*

No.	liquid	%by weight	Capillary No.	Constant Number, K	Flow time, t (sec)			Hagenbach correction, J	Kinematic viscosity $\nu = K(t - \vartheta)$, mm^2/s			
					1st	2nd	3rd		1st	2nd	3rd	Average
1	น้ำ	100	25	0.00185	517	519	522	0.00	0.96	0.96	0.97	0.96
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5	25	0.00185	651	658	655	0.00	1.20	1.22	1.21	1.21
3	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	25	0.00185	769	766	772	0.00	1.42	1.42	1.43	1.42
4	น้ำเชื่อม	25	75	0.008557	279	277	280	0.27	2.39	2.37	2.39	2.38
5	น้ำเชื่อม	70	75	0.008557	507	509	507	0.00	4.34	4.36	4.34	4.34
6	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.01×10^{-4}	25	0.00185	518	522	515	0.00	0.96	0.97	0.95	0.96
7	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	3.2×10^{-4}	25	0.00185	520	516	519	0.00	0.96	0.95	0.96	0.96
8	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	1.28×10^{-3}	25	0.00185	514	510	515	0.00	0.95	0.94	0.95	0.95
9	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	150	0.02673	2448	2454	2450	0.00	65.44	65.60	65.49	65.51
10	น้ำมันพืช	100	100	0.01678	2556	2551	2554	0.00	42.89	42.81	42.86	42.85

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวัดแรงตึงผิวของของเหลว

การวัดแรงตึงผิวของของเหลวทำได้โดยวิธี Ring Method ด้วยเครื่อง Tensionmeter K8 ซึ่งผลของการวัดแรงตึงผิวของของเหลวชนิดต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ข.2 *ผลการวัดแรงตึงผิวของของเหลว*

No.	liquid	%by weight	surface tension (mN/m)			
			1st	2nd	3rd	Average
1	น้ำ	100	72.21	72.17	72.15	72.18
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5	74.62	74.72	74.51	74.62
3	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	83.20	83.32	83.10	83.21
4	น้ำเชื่อม	25	56.26	56.41	56.30	56.32
5	น้ำเชื่อม	70	52.20	52.36	52.28	52.28
6	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$1.01*10^{-4}$	61.15	60.85	61.03	61.01
7	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$3.2*10^{-4}$	45.55	45.81	45.68	45.68
8	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$1.28*10^{-3}$	32.10	32.25	32.33	32.23
9	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	61.10	61.05	61.18	61.11
10	น้ำมันพืช	100	27.10	26.95	27.23	27.09

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวัดความหนาแน่นของของเหลว

การวัดความหนาแน่นของของเหลวทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักของของเหลวที่บรรจุอยู่ในขวดวัดปริมาตร ที่มีปริมาตรที่แน่นนอน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ขวดวัดปริมาตรที่มีขนาดเท่ากับ 25 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข.3 *ผลการวัดความหนาแน่นของของเหลว*

No.	liquid	%by weight	liquid weight (g)			liquid density (kg/m^3)			
			1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	Average
1	น้ำ	100	24.9987	25.0281	24.9751	999.95	1001.12	999.00	1000.03
2	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	5	26.3012	26.2986	26.3098	1052.05	1051.94	1052.39	1052.13
3	สารละลายโซเดียมคลอไรด์	25	31.7513	31.7521	31.7561	1270.05	1270.08	1270.24	1270.13
4	น้ำเชื่อม	25	26.8731	26.8765	26.8799	1074.92	1075.06	1075.20	1075.06
5	น้ำเชื่อม	70	29.4743	29.4763	29.4789	1178.97	1179.05	1179.16	1179.06
6	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$1.01*10^{-4}$	24.9381	24.9401	24.9348	997.52	997.60	997.39	997.51
7	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$3.2*10^{-4}$	24.9299	24.9367	24.9399	997.20	997.47	997.60	997.42
8	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว	$1.28*10^{-3}$	24.9399	24.9413	24.9402	997.60	997.65	997.61	997.62
9	กลีเซอรอล (Glycerol)	87	31.5069	31.4997	31.5013	1260.28	1259.99	1260.05	1260.11
10	น้ำมันพืช	100	21.2512	21.2502	21.2543	850.05	850.01	850.17	850.08

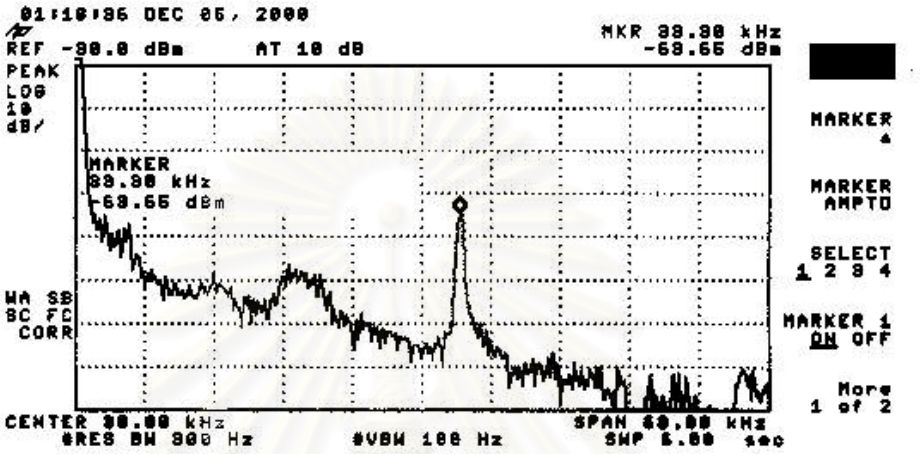
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

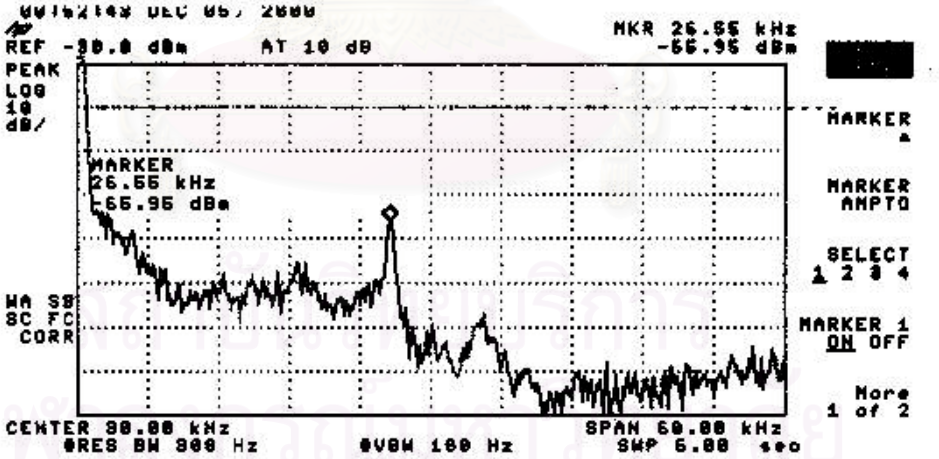
ผลการวัดความถี่ที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

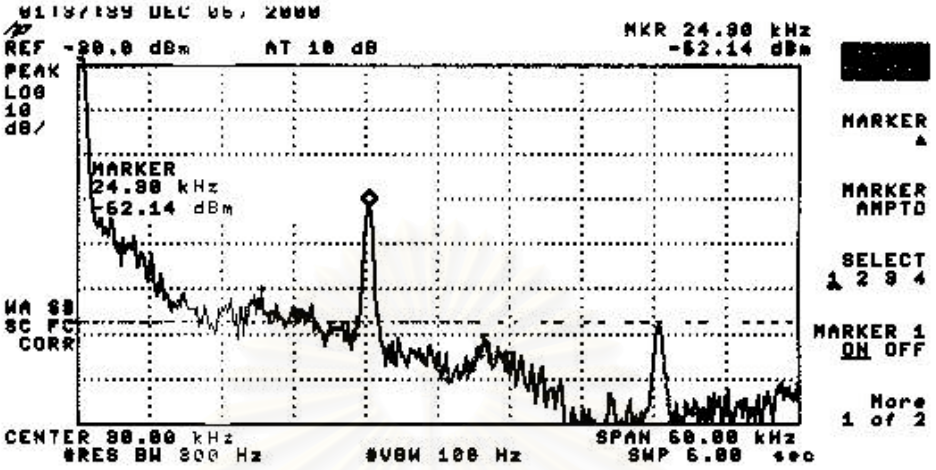
การวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโวเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง สามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง Spectrum Analyzer 9 kHz - 12.8 kHz รุ่น Hewlett Packard 8596I และ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope) รุ่น TDS 360 Tektronix ซึ่งการวัดความถี่ของหัวฉีดแต่ละหัวที่มีขนาดของเรโซเนเตอร์แตกต่างกันได้ผลดังนี้



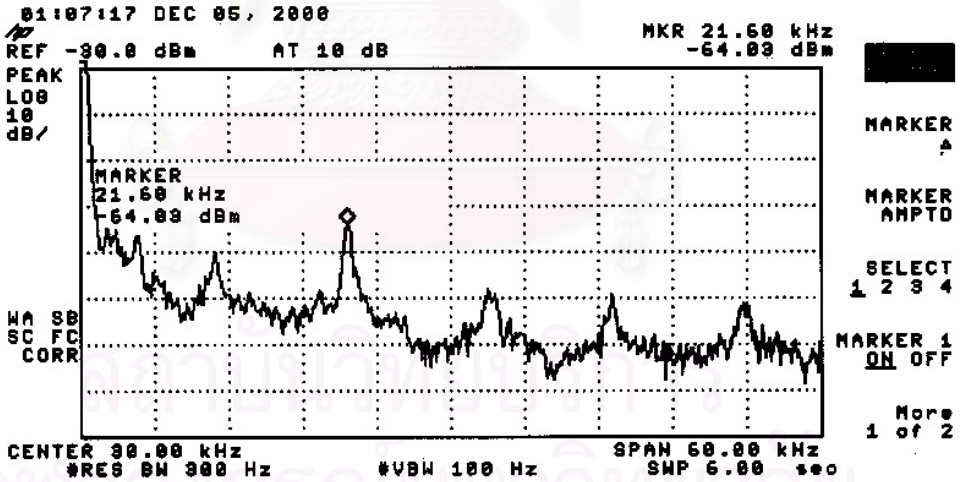
รูปที่ ค.1 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.1*



รูปที่ ค.2 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.2*



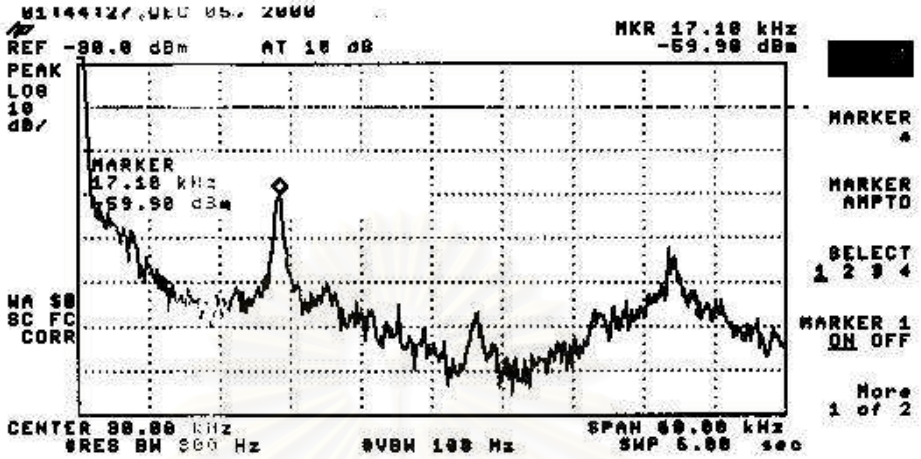
รูปที่ ค.3 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.3*



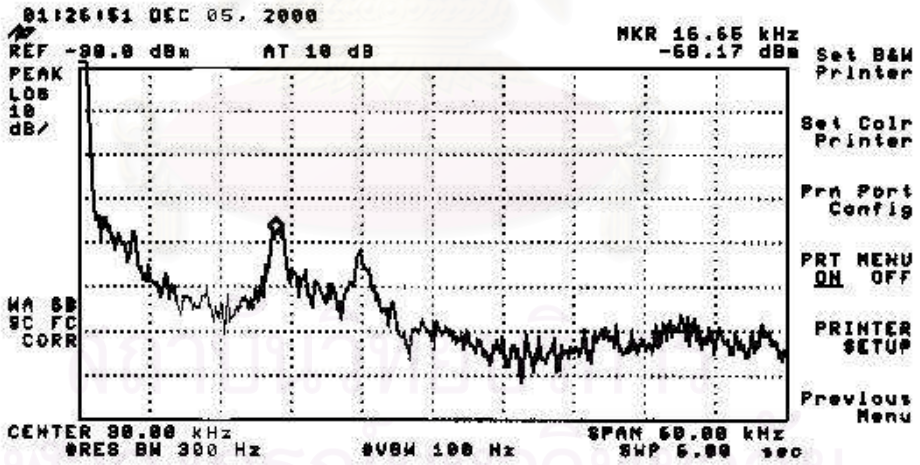
รูปที่ ค.4 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.4*

รูปที่ ค.5 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.5*

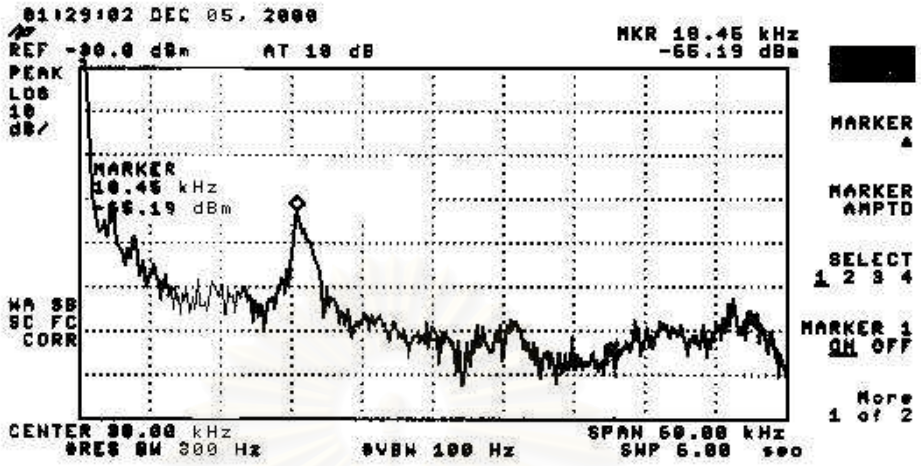
รูปที่ ค.6 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.6*



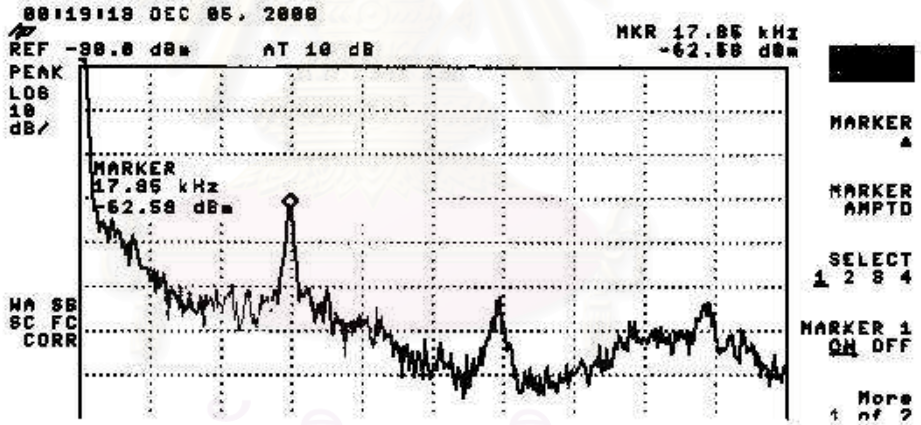
รูปที่ ค.7 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.7*



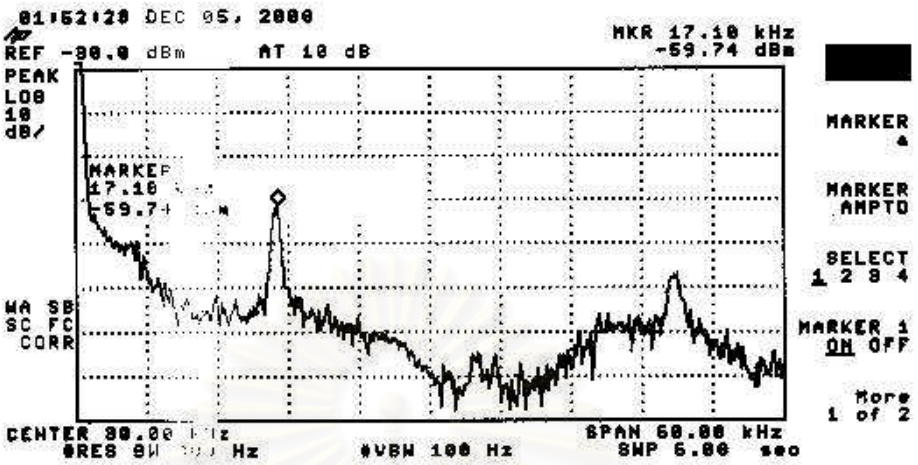
รูปที่ ค.8 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.8*



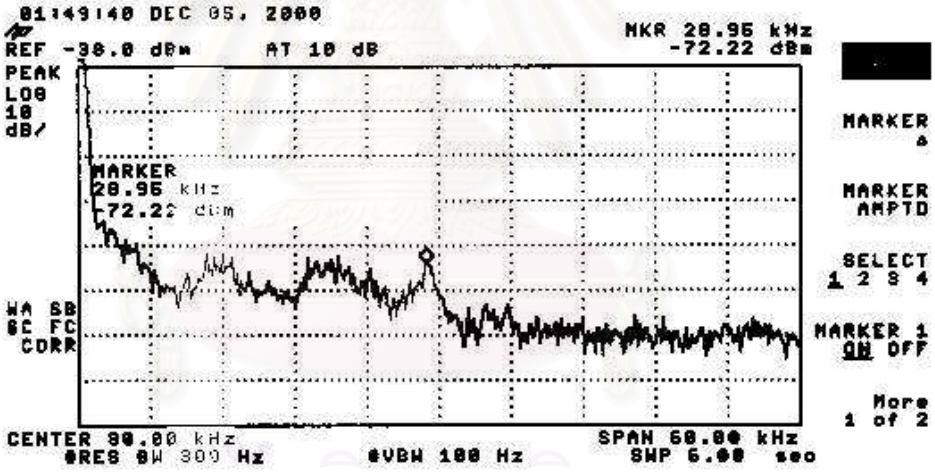
รูปที่ ค.9 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.9*



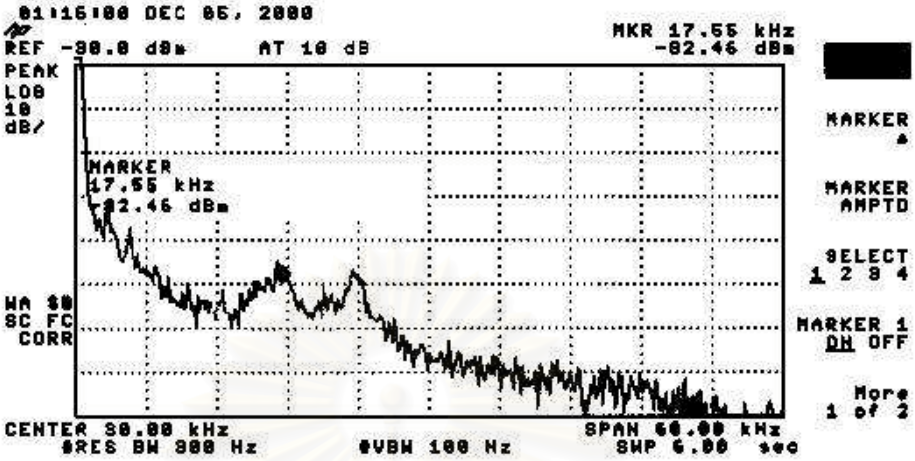
รูปที่ ค.10 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นแสียง No.10*



รูปที่ ค.11 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.11*



รูปที่ ค.12 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นแสียง No.12*



รูปที่ ค.13 *แสดงผลการวัดความถี่ของหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้รูปร่างของหัวฉีดในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง No.13*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ผลการทดลองด้านคุณสมบัติของฝุ่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองด้านสมบัติการไหลของฝุ่น

Sampling Test	1st	2nd	3rd	4th	5th	Avg.
Angle Repose (degree)	47.7	50.0	50.7	53.0	49.9	50.84
Index	12	12	12	12	12	12
Angle Spatula (degree)	69.4	66.0	65.2	67.0	67.7	67.27
Angle 1 (degree)	70.2	67.3	68.1	70.8	69.2	69.33
Angle 2 (degree)	68.5	67.7	62.4	63.2	66.3	5.51
Index	12	12	12	12	12	12
Aerated Dens. (g/cm^3)	0.799	0.802	0.793	0.760	0.751	0.781
Packed Dens. (g/cm^3)	1.40	1.432	1.409	1.393	1.394	1.405
Compressibility (%)	43.2	43.9	43.7	45.4	46.1	44.27
Index	2	2	2	2	0	2
Cohesiveness (%)	68.1	65.9	62.8	81.2	83.2	76.63
Top (g)	0.59	0.60	0.54	1.13	1.24	0.977
Central (g)	1.18	1.10	1.07	0.80	0.70	0.879
Bottom (g)	0.32	0.29	0.37	0.07	0.02	0.141
Index	2	2	2	0	0	2
Flowability Index	**28**	**28**	**28**	**26**	**24**	**Bad**
Angle Fall (degree)	32.6	28.9	30.9	34.8	27.6	30.69
Index	16	18	17	16	18	17
Angle Diff. (degree)	16.6	21.1	19.8	18.2	22.3	20.3
Index	16	18	18	17	18	18
Dispersibility (%)	52.8	47.1	50.2	56.4	46.3	55.25
Index	25	24	25	25	24	25
Floodability Index	**63.25**	**66.25**	**66.25**	**61.0**	**60.0**	**Fairly high**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของฝุ่นและหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์ในของรูป
เปอร์เซ็นต์ความทึบแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 *แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของหยดละอองน้ำที่ได้จากการสเปรย์ด้วยหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเบอร์ 1*

ลำดับที่	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความเข้มข้นของหยดละอองน้ำในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสง							
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ค่าเฉลี่ย
1	50	14.6	14.8	10.5	13.1	15.2	12.6	13.7	13.5
2	100	15.4	13.6	16.2	13.3	15.4	15.1	16.0	15.0
3	500	16.9	15.6	10.9	13.5	15.8	14.3	17.2	14.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.2 *แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์ และขณะที่เปิดสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดแต่ละชนิด (ทดลองในวันที่ 21 พ.ย. 2543)*

สถานที่วัด โรงโม่ศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว แห้ง ท้องฟ้าแจ่มใส

วันที่ทำการตรวจวัด 21 พฤศจิกายน 2543

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ซม.^{2})	ค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซนความทึบแสง							
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	ค่าเฉลี่ย
1. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	3.8	4.2	4.2	3.9	4.0	3.8	4.1	4.00
2. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
เบอร์ 1	510	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
3. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	4.8	4.2	3.2	4.2	3.9	3.4	3.7	3.91
4. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
เบอร์ 10	510	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	510	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	510	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	2	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	1380	3	0	0	0	0	0	0	0	0.00
5. ไม่สเปรย์	-	-	6	3.2	4.2	4.8	5.3	6.2	6.2	5.13
6. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0	0.2	0	0.3	0	0	0.5	0.14
ต้นแบบ	510	3	0	0	0.1	0.2	0.4	0	0	0.10
	1380	2	0	0	0	0	0.3	0.2	0	0.07
	1380	3	0	0	0.1	0.2	0.2	0	0	0.07

<u>ตารางที่ จ.3</u> *แสดงผลการทดลองวัดความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงในขณะที่ไม่ได้เปิดสเปรย์ และขณะที่เปิดสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดแต่ละชนิด (ทดลองในวันที่ 22 พ.ย. 2543)*

สถานที่วัด โรงโม่ศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว ลมแปรปรวน และมีฝุ่นมาก

วันที่ทำการตรวจวัด 22 พฤศจิกายน 2543

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ซม.^{2})	ค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซนต์ความทึบแสง							
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7	ค่าเฉลี่ย
1. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	6.5	7.2	9.2	4.9	9.6	8.5	7.8	7.67
2. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 1	2,800	-	3.8	2.9	3.2	2.4	6	6.2	2.7	3.89
	3,850	-	2.4	1.8	2.5	3.2	5.2	4.7	3.8	3.37
3. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 2	2,800	-	4.3	2.6	2.5	2.1	3.1	2	3.2	2.83
(สีแดง)	3,850	-	2.1	3.4	1.8	2.3	2.4	3.2	2.2	2.49
4. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	7.6	6.1	9.4	10.2	7.7	8.6	9.7	8.47
5. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 3	2,800	-	0.9	0.5	0	0	1.4	0	0.3	0.44
	3,850	-	0	0	0.3	0.1	0	0	0.5	0.13
6. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 4	2,850	-	0.5	0.7	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.24
(หัวฉีดจตุจักร)	3,850	-	0.3	0.4	0	0.1	0	0	0	0.11
7. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	9.2	6.5	5.9	10.9	11.8	11	5.7	8.71
8. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.5	0.8	0.5	0.8	1.2	0	1.1	0.70
เบอร์ 1	1,380	2	0	1	0.9	0.8	0	0.5	0	0.46
9. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0	1.5	0.5	1.3	0	0.9	0	0.60
เบอร์ 10	1,380	2	0	0.6	0.5	0.3	1.4	0	0	0.40
10. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	5.7	12.1	4.6	9.7	9.8	6.8	9.5	8.31
11. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.6	0.7	0.6	0.9	0	0.7	0.5	0.57
ต้นแบบ	1,380	2	0	0.9	0.3	0	0.7	0.6	0.8	0.47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ.

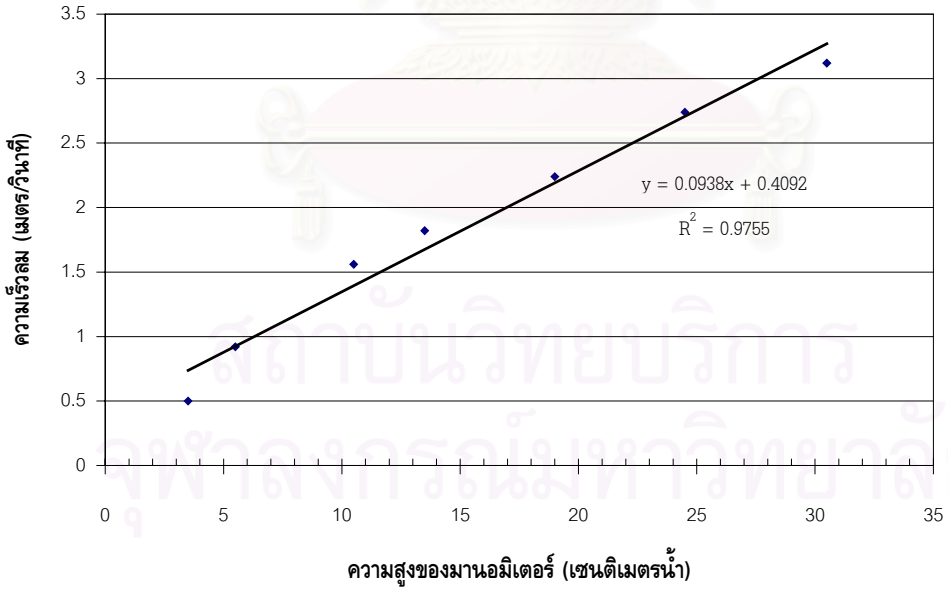
ผลการสอบเทียบอุปกรณ์ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.1 *ผลการสอบเทียบความเร็วลมในระบบโดยใช้มานอมิเตอร์ (manometer) และแผ่นออร์ริฟิซ (orifice plate)*

แผ่นออร์ริฟิซ หมายเลขที่	ความสูงของมานอมิเตอร์ (เซนติเมตรน้ำ)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
1	3.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	5.5	0.9	1	0.9	0.9	0.9	0.92
3	10.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.6	1.56
4	13.5	1.9	1.9	1.8	1.7	1.8	1.82
5	19	2.2	2.3	2.3	2.2	2.2	2.24
6	24.5	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.74
7	30.5	3.1	3	3.2	3.1	3.2	3.12

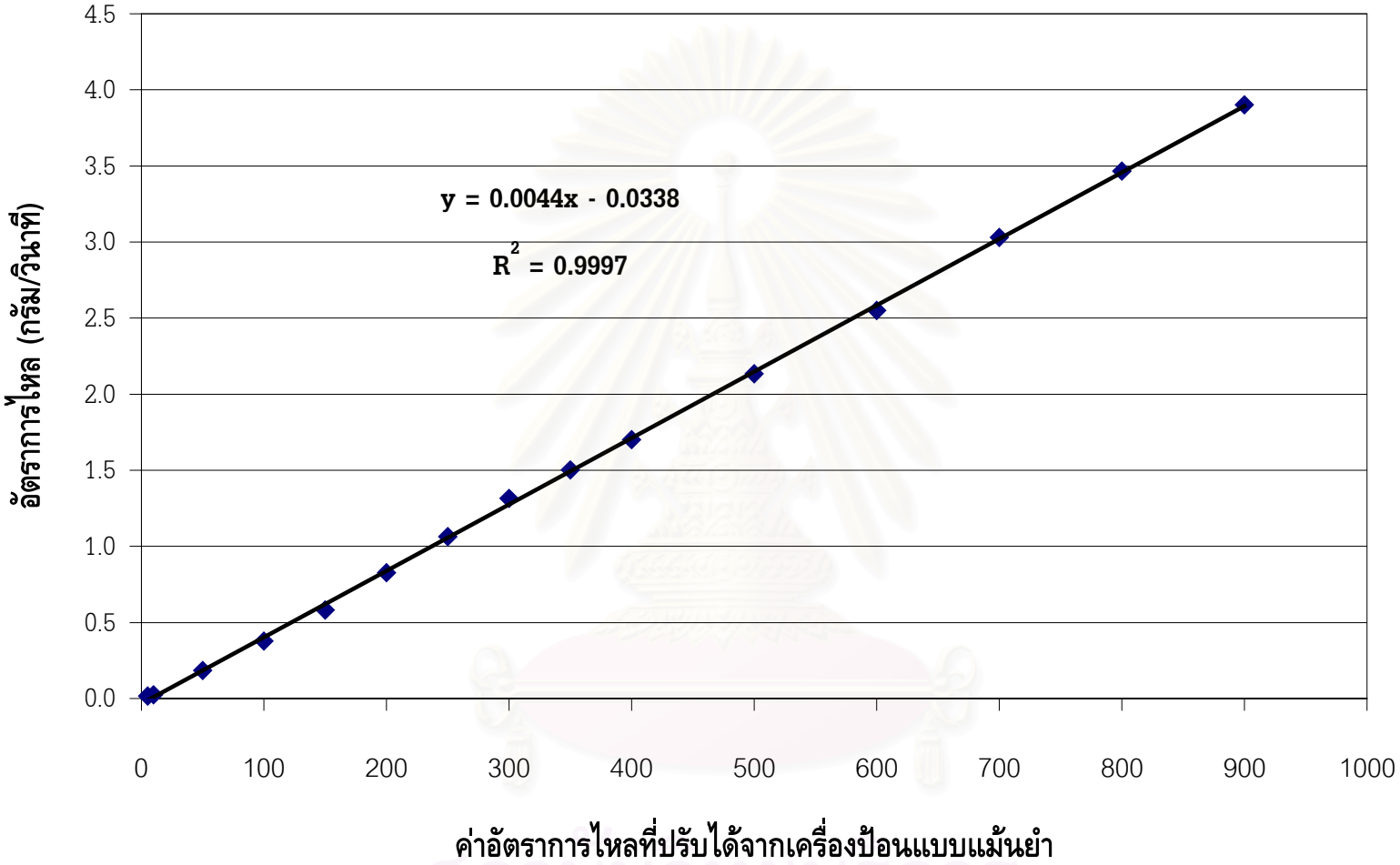
รูปที่ ฉ.1 *กราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วลมในระบบโดยใช้มานอมิเตอร์และแผ่นออร์ริฟิซ*



ตารางที่ ฉ.2 *ผลการสอบเทียบเครื่องป้อนชนิดแม่นยำ (Accurate Feeder)*

ค่าอัตรการไหลที่ปรับได้จากเครื่องป้อนแบบแม้นยำ	อัตราการไหล (กรัม/วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
5	0.018	0.017	0.018	0.018
10	0.023	0.022	0.026	0.024
50	0.177	0.191	0.189	0.186
100	0.378	0.375	0.379	0.377
150	0.586	0.580	0.581	0.582
200	0.827	0.831	0.821	0.826
250	1.071	1.063	1.060	1.065
300	1.314	1.312	1.317	1.314
350	1.500	1.501	1.504	1.502
400	1.698	1.705	1.701	1.701
500	2.132	2.141	2.130	2.134
600	2.551	2.545	2.557	2.551
700	3.028	3.034	3.031	3.031
800	3.460	3.467	3.467	3.465
900	3.912	3.892	3.899	3.901

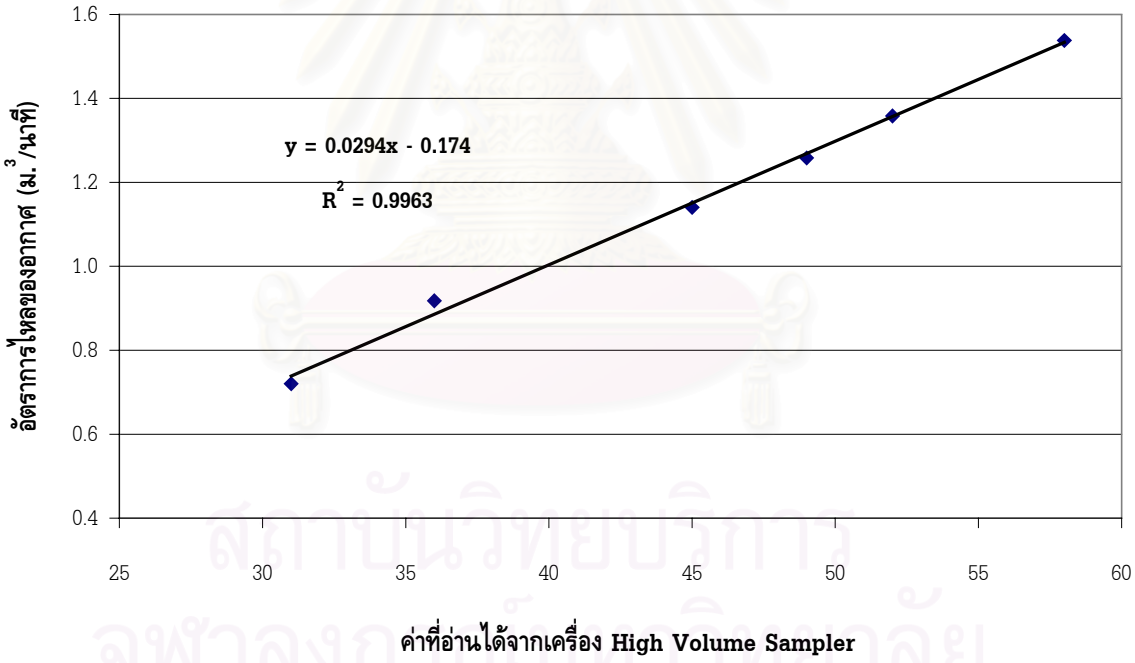
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ฉ.2 *กราฟแสดงผลการสอบเทียบเครื่องป้อนชนิดแม่นยำ (Accurate feeder)*

ตารางที่ ฉ.3 *ผลการสอบเทียบอัตราการไหลของเครื่อง High Volume Sampler*

แผ่นออร์ริฟิซ หมายเลขที่	ความสูงของมานอมิเตอร์ (นิ้วน้ำ)	ค่าอัตราการไหลของอากาศที่อ่านได้จากเครื่อง High Volume Sampler	อัตราการไหลของอากาศ (มม.^{3}/นาที)
5	2.3	31	0.72
7	3.7	36	0.918
10	5.8	45	1.14
13	7.05	49	1.258
18	8.3	52	1.358
26	10.5	58	1.538

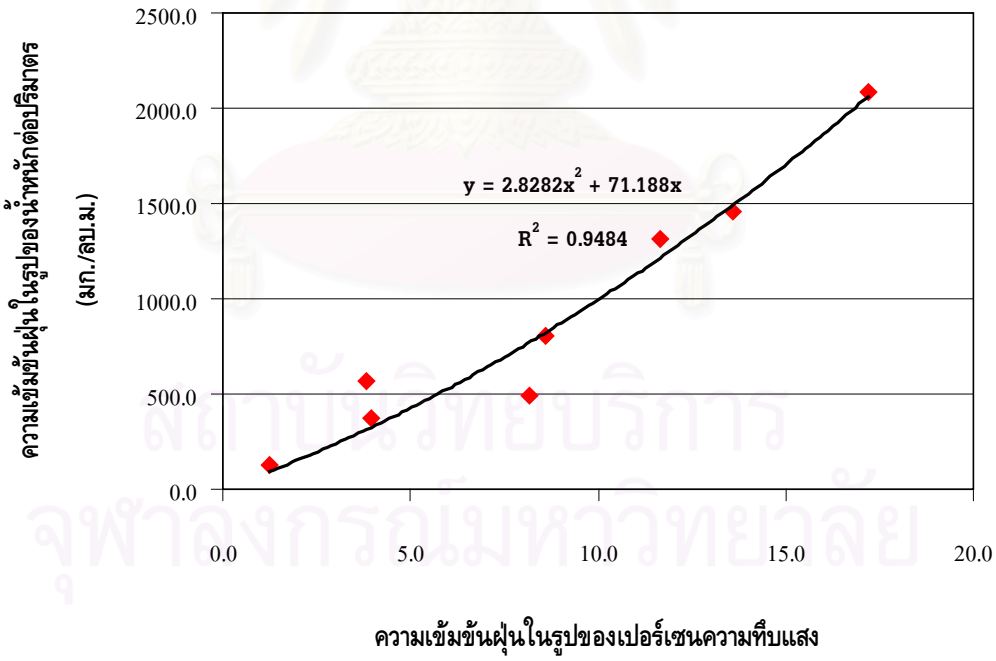


รูปที่ ฉ.3 *ผลการสอบเทียบอัตราการไหลของเครื่อง High Volume Sampler*

ตารางที่ ฉ.4 *แสดงผลทดลองการสอบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ*

ลำดับ	น.น.กระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (กรัม)	น.น.กระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง (กรัม)	ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง High Volume *	อัตราการไหลอากาศ (ลบ.ม./นาที)	ระยะเวลา (นาที)	ความเข้มข้นของฝุ่น (มก./ลบ.ม.)	ความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของ %ความทึบแสง
1	2.6209	4.3777	50	1.026	3	570.7602	3.8167
2	2.6313	4.324	51	1.05	2	806.0476	8.5857
3	2.6053	3.9805	51	1.05	1	1309.7143	11.6400
4	2.6154	4.1132	50	1.026	1	1459.8441	13.5750
5	2.6378	4.7755	50	1.026	1	2083.5283	17.2000
6	2.6324	3.6451	50	1.026	2	493.5185	8.1600
7	2.6321	3.7895	50	1.026	3	376.0234	3.9625
8	2.6334	3.0124	50	1.026	3	123.1319	1.2400

*ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง High volume สามารถเทียบเป็นอัตราการไหลของอากาศได้ ดังแสดงในรูปที่ ฉ.3



รูปที่ ฉ.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นในรูปของเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงกับน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ

ตารางที่ ฉ.5 *ผลการทดลองการสอบเทียบค่าเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงที่วัดได้จริงในโรงโม่กับค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ (ในวันที่ 21 พ.ย. 2543)*

สถานที่วัด โรงโม่ศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว แห้ง ท้องฟ้าแจ่มใส

วันที่ทำการตรวจวัด *21 พฤศจิกายน 2543*

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ซม.^{2})	ค่าความเข้มข้นฝุ่นในรูป%ความทึบแสงเฉลี่ย	ค่าความเข้มข้นฝุ่น (มก/ลบ.ม.)
1. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	4.00	330.00
2. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.00	0.00
เบอร์ 1	510	3	0.00	0.00
	1380	2	0.00	0.00
	1380	3	0.00	0.00
3. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	3.91	321.98
4. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.00	0.00
เบอร์ 10	510	2	0.00	0.00
	510	3	0.00	0.00
	510	3	0.00	0.00
	1380	2	0.00	0.00
	1380	2	0.00	0.00
	1380	3	0.00	0.00
	1380	3	0.00	0.00
5. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	5.13	439.48
6. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.14	10.23
ต้นแบบ	510	3	0.10	7.15
	1380	2	0.07	5.10
	1380	3	0.07	5.10

ตารางที่ ฉ.6 *ผลการทดลองการสอบเทียบค่าเข้มข้นของฝุ่นในรูปเปอร์เซ็นต์ความทึบแสงที่วัดได้จริงในโรงโม่กับค่าความเข้มข้นของฝุ่นในรูปน้ำของฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ (ในวันที่ 22 พ.ย. 2543)*

สถานที่วัด โรงโม่ศิลาเลิศจิต

ตำแหน่งที่วัด สายพานหลังปากซอย

สภาพอากาศ อากาศหนาว ลมแปรปรวน และมีฝุ่นมาก

วันที่ทำการตรวจวัด *22 พฤศจิกายน 2543*

ชนิดของหัวฉีด	อัตราการไหลของของเหลว (มิลลิลิตร/นาที)	ความดันอากาศ (กก./ซม.^{2})	ความเข้มข้นของฝุ่นในรูป %ความทึบแสงเฉลี่ย	ความเข้มข้นของฝุ่น (มก./ลบ.ม.)
1. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	7.67	712.56
2. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 1	2,800	-	3.89	319.32
	3,850	-	3.37	272.15
3. หัวฉีดโรงโม่แบอร์ 2	2,800	-	2.83	223.99
	3,850	-	2.49	194.43
4. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	8.47	806.03
5. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 3	2,800	-	0.44	32.08
	3,850	-	0.13	9.20
6. หัวฉีดโรงโม่เบอร์ 4	2850	-	0.24	17.46
	3,850	-	0.11	8.17
7. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	8.71	835.12
8. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.70	51.70
เบอร์ 1	1,380	2	0.46	33.45
9. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.60	44.15
เบอร์ 10	1,380	2	0.40	29.20
10. ไม่เปิดสเปรย์	-	-	8.31	793.14
11. หัวฉีดคลื่นเหนือเสียง	510	2	0.57	42.00
ต้นแบบ	1,380	2	0.47	34.51

ภาคผนวก ช

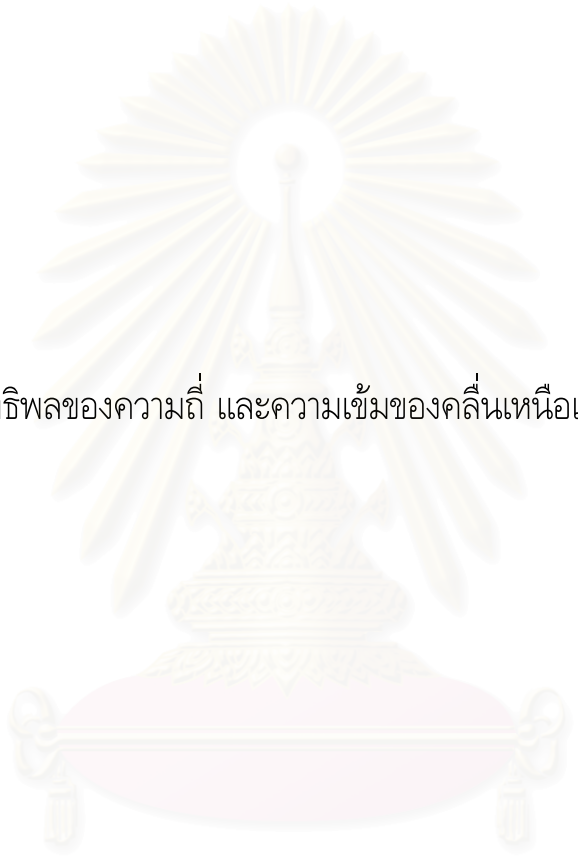
ผลการวัดขนาดและการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่สภาวะต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวัดการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริกเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิทธิพลของความถี่ และความเข้มของคลื่นเหนือเสียง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

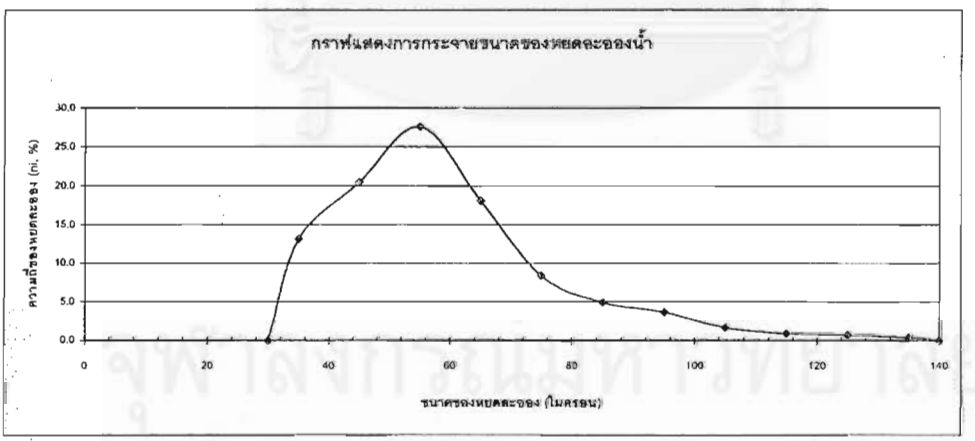
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<30	30	0	0.000	0.000	0.0	28.931	0	1.477	0.000	0.27361	0.000
30 - 40	35	72	13.163	13.163	460.7	23.931	7538	1.544	20.324	0.20666	0.562
40 -50	45	112	20.475	33.638	921.4	13.931	3973	1.653	33.850	0.09752	0.195
50 - 60	55	151	27.605	61.243	1518.3	3.931	426	1.740	48.043	0.01037	0.003
60 - 70	65	99	18.099	79.342	1176.4	-6.069	667	1.813	32.811	-0.06218	0.070
70 - 80	75	46	8.410	87.751	630.7	-16.069	2172	1.875	15.768	-0.12433	0.130
80 - 90	85	27	4.936	92.687	419.6	-26.069	3355	1.929	9.524	-0.17869	0.158
90 - 100	95	20	3.656	96.344	347.3	-36.069	4757	1.978	7.231	-0.22699	0.188
100 - 110	105	9	1.645	97.989	172.8	-46.069	3492	2.021	3.326	-0.27046	0.120
110 - 120	115	5	0.914	98.903	105.1	-56.069	2874	2.061	1.884	-0.30997	0.088
120 - 130	125	4	0.731	99.634	91.4	-66.069	3192	2.097	1.533	-0.34618	0.088
130 - 140	135	2	0.366	100.000	49.4	-76.069	2116	2.130	0.779	-0.37960	0.053
>140	140	0	0.000	100.000	0.0	-81.069	0	2.146	0.000	-0.39540	0.000
	Total	547	100.000		5893.1		34561		175.073		1.654

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 58.931 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.684

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 56.329 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.347



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียะโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

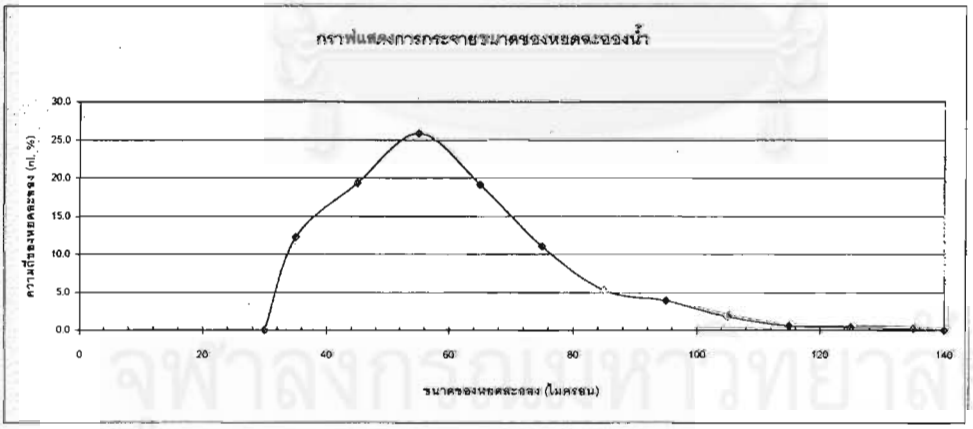
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 30	30	0	0.000	0.000	0.0	29.605	0	1.477	0.000	0.27967	0.000
30 - 40	35	62	12.253	12.253	428.9	24.605	7418	1.544	18.919	0.21272	0.554
40 -50	45	98	19.368	31.621	871.5	14.605	4131	1.653	32.019	0.10358	0.208
50 - 60	55	131	25.889	57.510	1423.9	4.605	549	1.740	45.057	0.01643	0.007
60 - 70	65	97	19.170	76.680	1246.0	-5.395	558	1.813	34.753	-0.05612	0.060
70 - 80	75	56	11.067	87.747	830.0	-15.395	2623	1.875	20.752	-0.11827	0.155
80 - 90	85	27	5.336	93.083	453.6	-25.395	3441	1.929	10.295	-0.17263	0.159
90 - 100	95	20	3.953	97.036	375.5	-35.395	4952	1.978	7.817	-0.22093	0.193
100 - 110	105	9	1.779	98.814	186.8	-45.395	3665	2.021	3.595	-0.26440	0.124
110 - 120	115	3	0.593	99.407	68.2	-55.395	1819	2.061	1.222	-0.30391	0.055
120 - 130	125	2	0.395	99.802	49.4	-65.395	1690	2.097	0.829	-0.34012	0.046
130 - 140	135	1	0.198	100.000	26.7	-75.395	1123	2.130	0.421	-0.37354	0.028
>140	140	0	0.000	100.000	0.0	-80.395	0	2.146	0.000	-0.38934	0.000
	Total	506	100.0		5960.5		31971		175.679		1.589

Arithmetic mean(d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 59.605 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 17.970

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 57.120 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.339



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 2.11 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

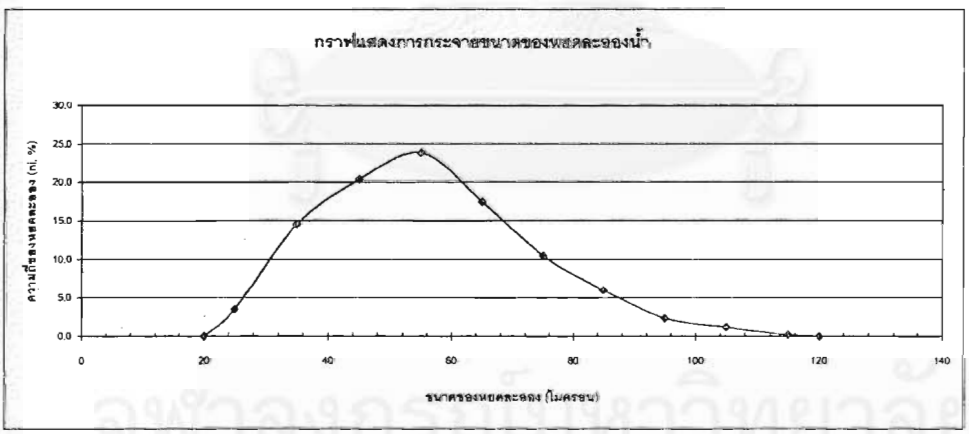
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	36.282	0	1.301	0.000	0.42862	0.000
20 - 30	25	18	3.495	3.495	87.4	31.282	3420	1.398	4.886	0.33171	0.385
30 - 40	35	75	14.563	18.058	509.7	21.282	6596	1.544	22.486	0.18558	0.502
40 -50	45	105	20.388	38.447	917.5	11.282	2595	1.653	33.706	0.07643	0.119
50 - 60	55	123	23.883	62.330	1313.6	1.282	39	1.740	41.566	-0.01072	0.003
60 - 70	65	90	17.476	79.806	1135.9	-8.718	1328	1.813	31.682	-0.08327	0.121
70 - 80	75	54	10.485	90.291	786.4	-18.718	3674	1.875	19.661	-0.14541	0.222
80 - 90	85	31	6.019	96.311	511.7	-28.718	4965	1.929	11.614	-0.19977	0.240
90 - 100	95	12	2.330	98.641	221.4	-38.718	3493	1.978	4.608	-0.24808	0.143
100 - 110	105	6	1.165	99.806	122.3	-48.718	2765	2.021	2.355	-0.29154	0.099
110 - 120	115	1	0.194	100.000	22.3	-58.718	669	2.061	0.400	-0.33105	0.021
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-63.718	0	2.079	0.000	-0.34953	0.000
	Total	515	100.0		5628.2		29544		172.965		1.855

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 56.282 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.275

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 53.658 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.370



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.11	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

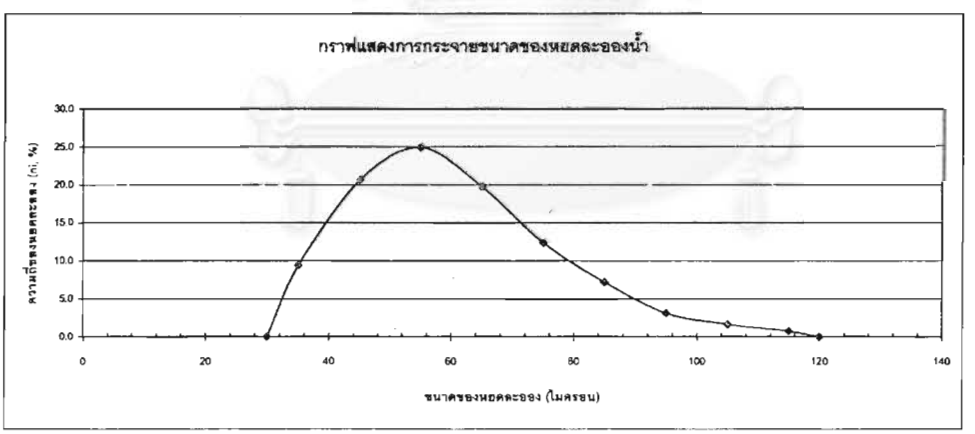
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 30	30	0	0.000	0.000	0.0	30.194	0	1.477	0.000	0.28585	0.000
30 - 40	35	51	9.427	9.427	329.9	25.194	5984	1.544	14.556	0.21891	0.452
40 -50	45	112	20.702	30.129	931.6	15.194	4779	1.653	34.225	0.10976	0.249
50 - 60	55	135	24.954	55.083	1372.5	5.194	673	1.740	43.429	0.02261	0.013
60 - 70	65	107	19.778	74.861	1285.6	-4.806	457	1.813	35.856	-0.04994	0.049
70 - 80	75	67	12.384	87.246	928.8	-14.806	2715	1.875	23.222	-0.11209	0.156
80 - 90	85	39	7.209	94.455	612.8	-24.806	4436	1.929	13.909	-0.16644	0.200
90 - 100	95	17	3.142	97.597	298.5	-34.806	3807	1.978	6.215	-0.21475	0.145
100 - 110	105	9	1.664	99.261	174.7	-44.806	3340	2.021	3.362	-0.25821	0.111
110 - 120	115	4	0.739	100.000	85.0	-54.806	2221	2.061	1.524	-0.29772	0.066
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-59.806	0	2.079	0.000	-0.31621	0.000
	Total	541	100.0		6019.4		28411		176.297		1.440

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 60.194 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]^{1/2}$ = 16.941

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 57.939 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.320



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

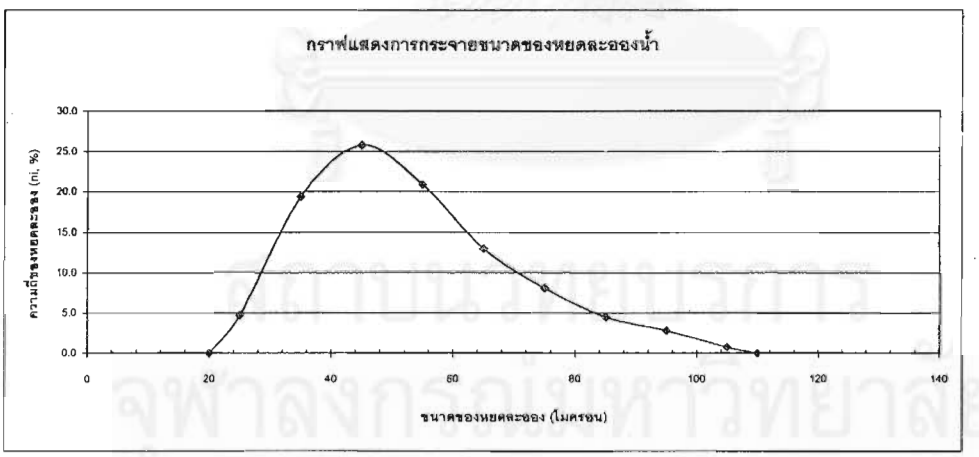
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.910	0	1.301	0.000	0.40035	0.000
20 - 30	25	25	4.708	4.708	117.7	27.910	3667	1.398	6.582	0.30344	0.434
30 - 40	35	103	19.397	24.105	678.9	17.910	6222	1.544	29.951	0.15731	0.480
40 -50	45	137	25.800	49.906	1161.0	7.910	1614	1.653	42.654	0.04817	0.060
50 - 60	55	111	20.904	70.810	1149.7	-2.090	91	1.740	36.380	-0.03898	0.032
60 - 70	65	69	12.994	83.804	844.6	-12.090	1899	1.813	23.558	-0.11153	0.162
70 - 80	75	43	8.098	91.902	607.3	-22.090	3952	1.875	15.184	-0.17368	0.244
80 - 90	85	24	4.520	96.422	384.2	-32.090	4654	1.929	8.721	-0.22804	0.235
90 - 100	95	15	2.825	99.247	268.4	-42.090	5005	1.978	5.587	-0.27634	0.216
100 - 110	105	4	0.753	100.000	79.1	-52.090	2044	2.021	1.523	-0.31981	0.077
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-57.090	0	2.041	0.000	-0.34001	0.000
	Total	531	100.000		5291.0		29149		170.138		1.939

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 52.910 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.159

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 50.278 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.380



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

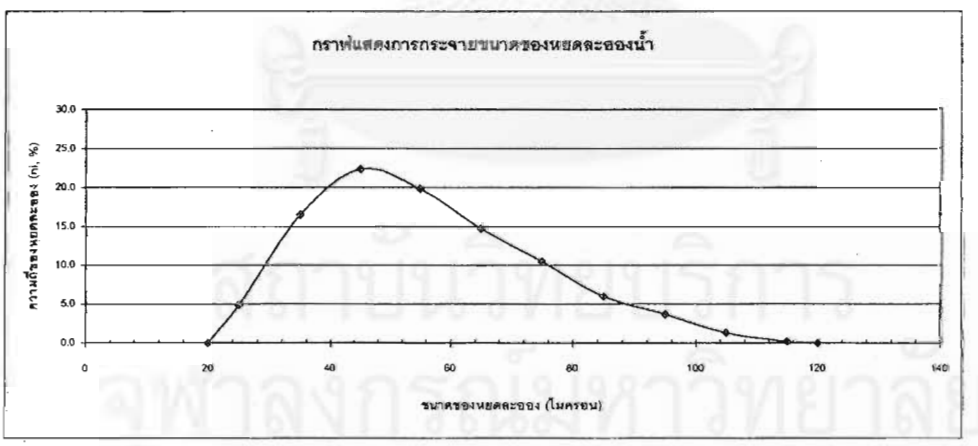
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	35.660	0	1.301	0.000	0.42026	0.000
20 - 30	25	25	4.854	4.854	121.4	30.660	4563	1.398	6.786	0.32335	0.508
30 - 40	35	85	16.505	21.359	577.7	20.660	7045	1.544	25.485	0.17722	0.518
40 -50	45	115	22.330	43.689	1004.9	10.660	2538	1.653	36.916	0.06808	0.103
50 - 60	55	102	19.806	63.495	1089.3	0.660	9	1.740	34.469	-0.01907	0.007
60 - 70	65	76	14.757	78.252	959.2	-9.340	1287	1.813	26.754	-0.09163	0.124
70 - 80	75	54	10.485	88.738	786.4	-19.340	3922	1.875	19.661	-0.15377	0.248
80 - 90	85	31	6.019	94.757	511.7	-29.340	5182	1.929	11.614	-0.20813	0.261
90 - 100	95	19	3.689	98.447	350.5	-39.340	5710	1.978	7.296	-0.25644	0.243
100 - 110	105	7	1.359	99.806	142.7	-49.340	3309	2.021	2.747	-0.29990	0.122
110 - 120	115	1	0.194	100.000	22.3	-59.340	684	2.061	0.400	-0.33941	0.022
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-64.340	0	2.079	0.000	-0.35789	0.000
	Total	515	100.000		5566.0		34248		172.129		2.156

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 55.660 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.599

geometric mean(σ_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 52.637 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.405



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

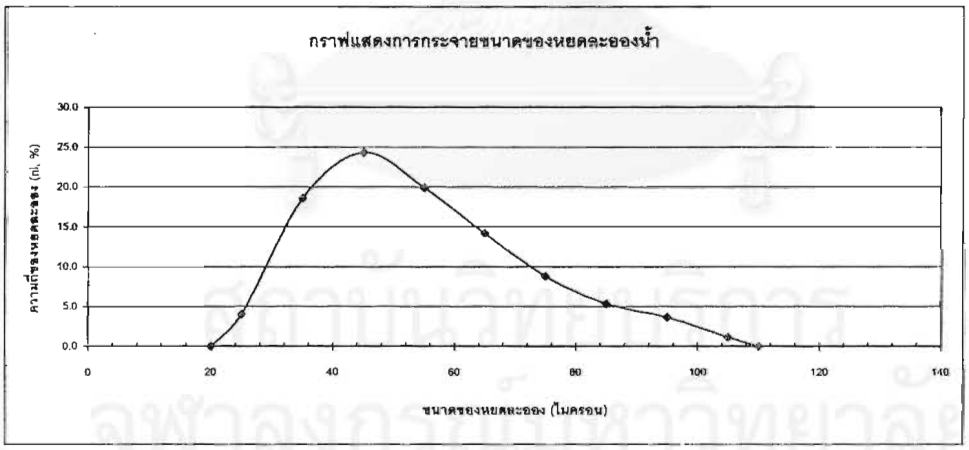
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	34.464	0	1.301	0.000	0.41204	0.000
20 - 30	25	21	4.023	4.023	100.6	29.464	3492	1.398	5.624	0.31513	0.400
30 - 40	35	97	18.582	22.605	650.4	19.464	7040	1.544	28.692	0.16900	0.531
40 -50	45	127	24.330	46.935	1094.8	9.464	2179	1.653	40.222	0.05986	0.087
50 - 60	55	104	19.923	66.858	1095.8	-0.536	6	1.740	34.674	-0.02729	0.015
60 - 70	65	74	14.176	81.034	921.5	-10.536	1574	1.813	25.700	-0.09984	0.141
70 - 80	75	46	8.812	89.847	660.9	-20.536	3717	1.875	16.524	-0.16199	0.231
80 - 90	85	28	5.364	95.211	455.9	-30.536	5002	1.929	10.349	-0.21635	0.251
90 - 100	95	19	3.640	98.851	345.8	-40.536	5981	1.978	7.199	-0.26465	0.255
100 - 110	105	6	1.149	100.000	120.7	-50.536	2936	2.021	2.323	-0.30812	0.109
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-55.536	0	2.041	0.000	-0.32832	0.000
	Total	522	100.000		5446.4		31925		171.307		2.020

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 54.464 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.958

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.650 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.389



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

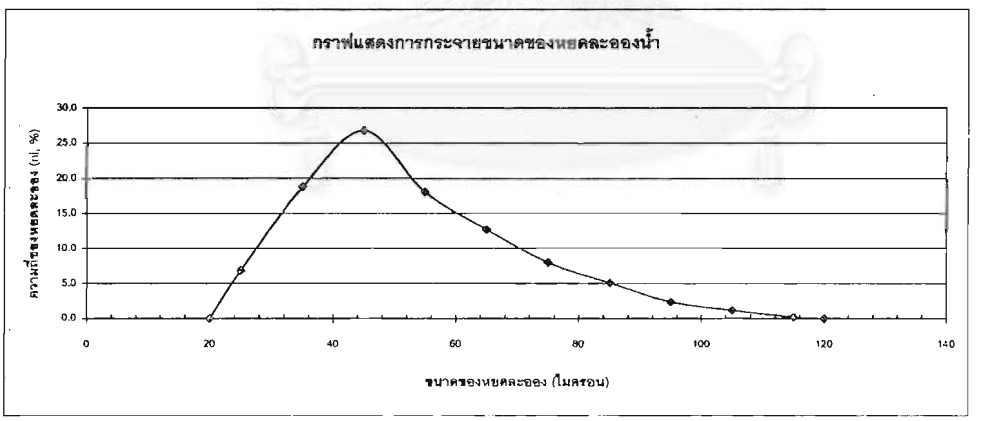
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.554	0	1.301	0.000	0.39479	0.000
20 - 30	25	35	6.849	6.849	171.2	27.554	5200	1.398	9.575	0.29788	0.608
30 - 40	35	96	18.787	25.636	657.5	17.554	5789	1.544	29.008	0.15175	0.433
40 -50	45	137	26.810	52.446	1206.5	7.554	1530	1.653	44.323	0.04261	0.049
50 - 60	55	92	18.004	70.450	990.2	-2.446	108	1.740	31.333	-0.04454	0.036
60 - 70	65	65	12.720	83.170	826.8	-12.446	1970	1.813	23.061	-0.11709	0.174
70 - 80	75	41	8.023	91.194	601.8	-22.446	4042	1.875	15.045	-0.17924	0.258
80 - 90	85	26	5.088	96.282	432.5	-32.446	5356	1.929	9.817	-0.23360	0.278
90 - 100	95	12	2.348	98.630	223.1	-42.446	4231	1.978	4.644	-0.28190	0.187
100 - 110	105	6	1.174	99.804	123.3	-52.446	3230	2.021	2.373	-0.32537	0.124
110 - 120	115	1	0.196	100.000	22.5	-62.446	763	2.061	0.403	-0.36488	0.026
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-67.446	0	2.079	0.000	-0.38336	0.000
	Total	511	100.000		5255.4		32220		169.582		2.172

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 52.554 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.040

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.639 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.406



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

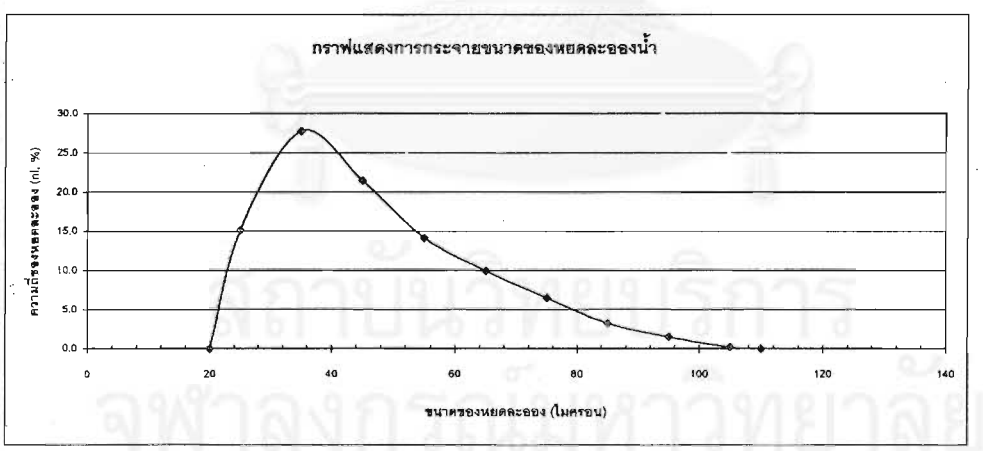
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	26.743	0	1.301	0.000	0.34062	0.000
20 - 30	25	79	15.134	15.134	378.4	21.743	7155	1.398	21.157	0.24371	0.899
30 - 40	35	145	27.778	42.912	972.2	11.743	3831	1.544	42.891	0.09758	0.264
40 -50	45	112	21.456	64.368	965.5	1.743	65	1.653	35.471	-0.01156	0.003
50 - 60	55	74	14.176	78.544	779.7	-8.257	966	1.740	24.672	-0.09871	0.138
60 - 70	65	52	9.962	88.506	647.5	-18.257	3320	1.813	18.060	-0.17126	0.292
70 - 80	75	34	6.513	95.019	488.5	-28.257	5201	1.875	12.213	-0.23341	0.355
80 - 90	85	17	3.257	98.276	276.8	-38.257	4766	1.929	6.284	-0.28777	0.270
90 - 100	95	8	1.533	99.808	145.6	-48.257	3569	1.978	3.031	-0.33608	0.173
100 - 110	105	1	0.192	100.000	20.1	-58.257	650	2.021	0.387	-0.37954	0.028
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-63.257	0	2.041	0.000	-0.39974	0.000
	Total	522	100.000		4674.3		29524		164.165		2.422

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.743 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 17.269

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.818 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.434



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอิเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

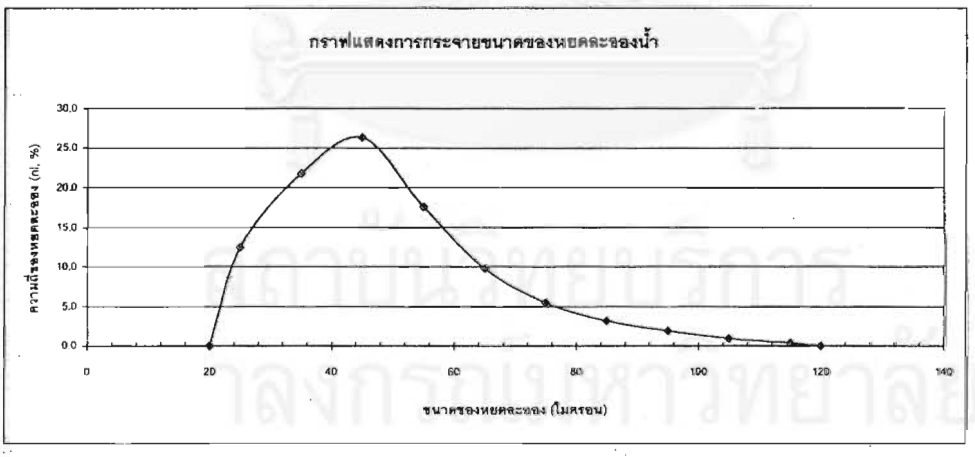
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	28.769	0	1.301	0.000	0.35983	0.000
20 - 30	25	66	12.500	12.500	312.5	23.769	7062	1.398	17.474	0.26292	0.864
30 - 40	35	115	21.780	34.280	762.3	13.769	4129	1.544	33.630	0.11679	0.297
40 -50	45	139	26.326	60.606	1184.7	3.769	374	1.653	43.522	0.00765	0.002
50 - 60	55	93	17.614	78.220	968.8	-6.231	684	1.740	30.654	-0.07950	0.111
60 - 70	65	52	9.848	88.068	640.2	-16.231	2595	1.813	17.854	-0.15205	0.228
70 - 80	75	29	5.492	93.561	411.9	-26.231	3779	1.875	10.299	-0.21420	0.252
80 - 90	85	17	3.220	96.780	273.7	-36.231	4226	1.929	6.212	-0.26856	0.232
90 - 100	95	10	1.894	98.674	179.9	-46.231	4048	1.978	3.746	-0.31686	0.190
100 - 110	105	5	0.947	99.621	99.4	-56.231	2994	2.021	1.914	-0.36033	0.123
110 - 120	115	2	0.379	100.000	43.6	-66.231	1662	2.061	0.781	-0.39984	0.061
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-71.231	0	2.079	0.000	-0.41832	0.000
	Total	528	100.000		4876.9		31553		166.086		2.360

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 48.769 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 17.853

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 45.800 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.427



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

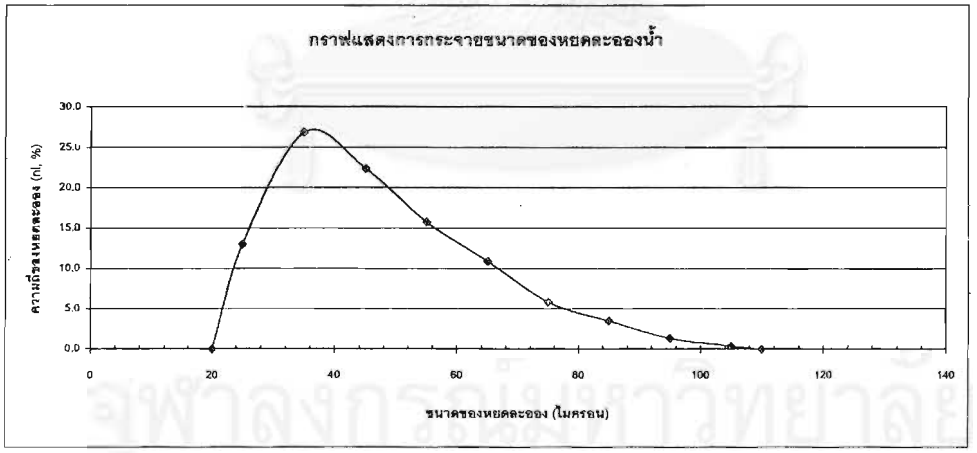
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	27.529	0	1.301	0.000	0.34921	0.000
20 - 30	25	67	13.035	13.035	325.9	22.529	6616	1.398	18.222	0.25230	0.830
30 - 40	35	138	26.848	39.883	939.7	12.529	4215	1.544	41.456	0.10617	0.303
40 -50	45	115	22.374	62.257	1006.8	2.529	143	1.653	36.988	-0.00297	0.000
50 - 60	55	81	15.759	78.016	866.7	-7.471	880	1.740	27.426	-0.09012	0.128
60 - 70	65	56	10.895	88.911	708.2	-17.471	3325	1.813	19.752	-0.16267	0.288
70 - 80	75	30	5.837	94.747	437.7	-27.471	4405	1.875	10.944	-0.22482	0.295
80 - 90	85	18	3.502	98.249	297.7	-37.471	4917	1.929	6.757	-0.27918	0.273
90 - 100	95	7	1.362	99.611	129.4	-47.471	3069	1.978	2.693	-0.32748	0.146
100 - 110	105	2	0.389	100.000	40.9	-57.471	1285	2.021	0.786	-0.37095	0.054
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-62.471	0	2.041	0.000	-0.39115	0.000
	Total	514	100.000		4752.9		28854		165.024		2.316

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 47.529 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.072

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 44.693 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.422



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

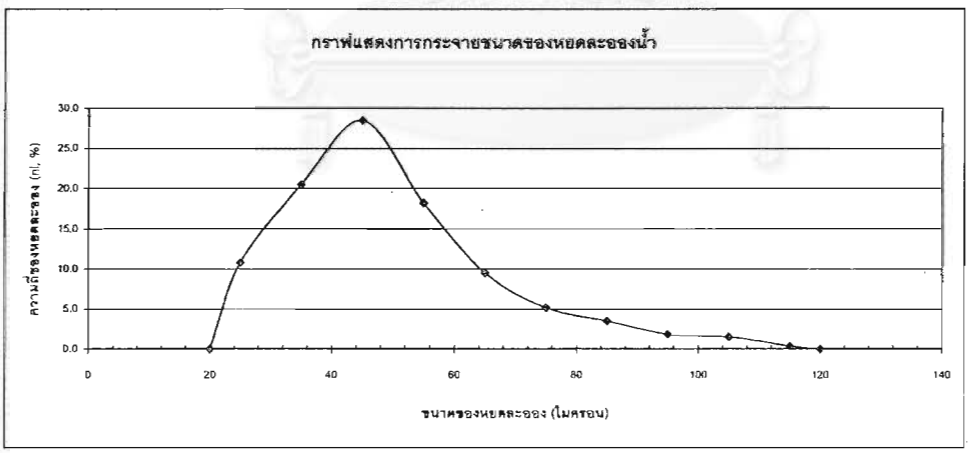
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	29.581	0	1.301	0.000	0.36771	0.000
20 - 30	25	58	10.801	10.801	270.0	24.581	6526	1.398	15.099	0.27080	0.792
30 - 40	35	110	20.484	31.285	716.9	14.581	4355	1.544	31.629	0.12467	0.318
40 -50	45	153	28.492	59.777	1282.1	4.581	598	1.653	47.103	0.01553	0.007
50 - 60	55	98	18.250	78.026	1003.7	-5.419	536	1.740	31.761	-0.07162	0.094
60 - 70	65	51	9.497	87.523	617.3	-15.419	2258	1.813	17.218	-0.14418	0.197
70 - 80	75	28	5.214	92.737	391.1	-25.419	3369	1.875	9.777	-0.20632	0.222
80 - 90	85	19	3.538	96.276	300.7	-35.419	4439	1.929	6.827	-0.26068	0.240
90 - 100	95	10	1.862	98.138	176.9	-45.419	3841	1.978	3.683	-0.30899	0.178
100 - 110	105	8	1.490	99.628	156.4	-55.419	4575	2.021	3.011	-0.35245	0.185
110 - 120	115	2	0.372	100.000	42.8	-65.419	1594	2.061	0.767	-0.39196	0.057
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-70.419	0	2.079	0.000	-0.41044	0.000
	Total	537	100.000		4958.1		32091		166.874		2.291

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 49.581 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 18.064

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 46.638 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.419



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 8.08 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

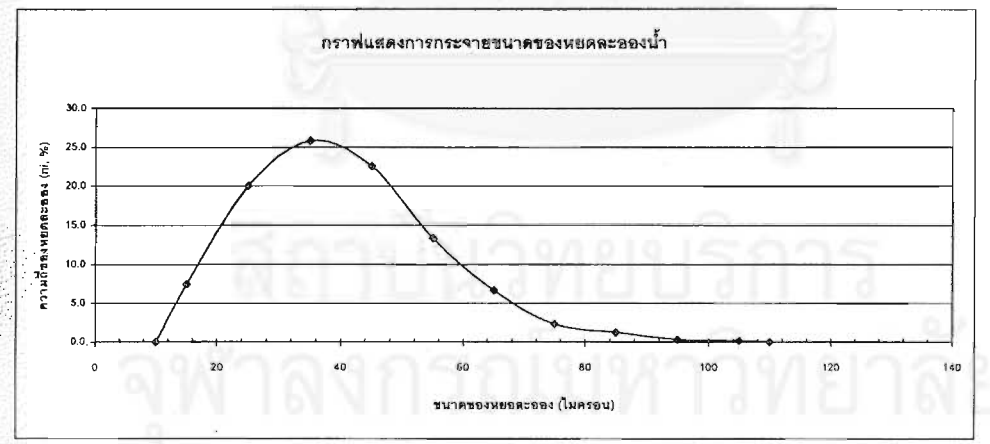
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.361	0	1.000	0.000	0.57142	0.000
10 - 20	15	41	7.401	7.401	111.0	25.361	4760	1.176	8.704	0.39533	1.157
20 - 30	25	111	20.036	27.437	500.9	15.361	4728	1.398	28.009	0.17348	0.603
30 - 40	35	143	25.812	53.249	903.4	5.361	742	1.544	39.856	0.02735	0.019
40 -50	45	125	22.563	75.812	1015.3	-4.639	486	1.653	37.302	-0.08179	0.151
50 - 60	55	74	13.357	89.170	734.7	-14.639	2862	1.740	23.247	-0.16894	0.381
60 - 70	65	37	6.679	95.848	434.1	-24.639	4055	1.813	12.108	-0.24149	0.389
70 - 80	75	13	2.347	98.195	176.0	-34.639	2816	1.875	4.400	-0.30364	0.216
80 - 90	85	7	1.264	99.458	107.4	-44.639	2518	1.929	2.438	-0.35800	0.162
90 - 100	95	2	0.361	99.819	34.3	-54.639	1078	1.978	0.714	-0.40630	0.060
100 - 110	105	1	0.181	100.000	19.0	-64.639	754	2.021	0.365	-0.44977	0.037
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-69.639	0	2.041	0.000	-0.46997	0.000
	Total	554	100.000		4036.1		24797		157.142		3.175

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.361 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.827

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.275 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.510



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

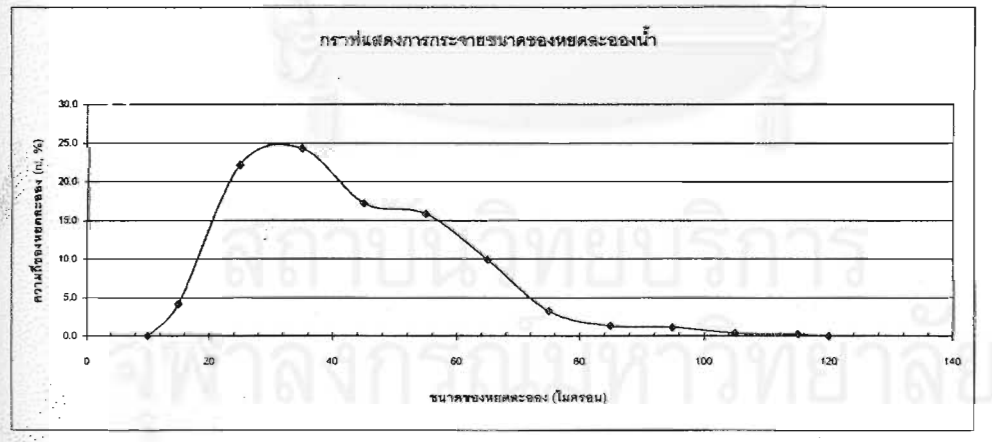
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.897	0	1.000	0.000	0.59655	0.000
10 - 20	15	22	4.207	4.207	63.1	27.897	3274	1.176	4.947	0.42046	0.744
20 - 30	25	116	22.180	26.386	554.5	17.897	7104	1.398	31.006	0.19861	0.875
30 - 40	35	127	24.283	50.669	849.9	7.897	1514	1.544	37.495	0.05248	0.067
40 -50	45	90	17.208	67.878	774.4	-2.103	76	1.653	28.449	-0.05667	0.055
50 - 60	55	83	15.870	83.748	872.8	-12.103	2325	1.740	27.620	-0.14382	0.328
60 - 70	65	52	9.943	93.690	646.3	-22.103	4858	1.813	18.025	-0.21637	0.465
70 - 80	75	17	3.250	96.941	243.8	-32.103	3350	1.875	6.095	-0.27851	0.252
80 - 90	85	7	1.338	98.279	113.8	-42.103	2373	1.929	2.582	-0.33287	0.148
90 - 100	95	6	1.147	99.426	109.0	-52.103	3114	1.978	2.269	-0.38118	0.167
100 - 110	105	2	0.382	99.809	40.2	-62.103	1475	2.021	0.773	-0.42464	0.069
110 - 120	115	1	0.191	100.000	22.0	-72.103	994	2.061	0.394	-0.46415	0.041
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-77.103	0	2.079	0.000	-0.48263	0.000
	Total	523	100.000		4289.7		30456		159.655		3.212

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.897 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.540

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 39.495 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / [(\Sigma n_i - 1)])$ = 1.514



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

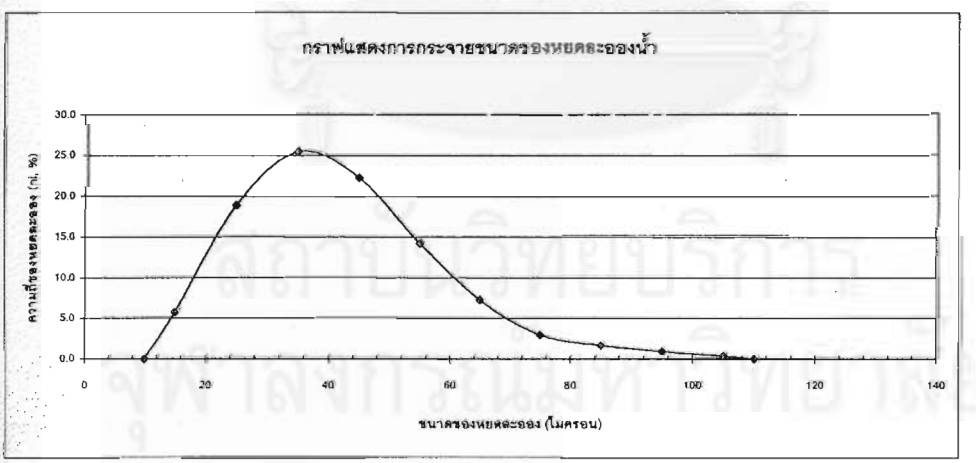
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.079	0	1.000	0.000	0.58922	0.000
10 - 20	15	31	5.805	5.805	87.1	27.079	4257	1.176	6.827	0.41313	0.991
20 - 30	25	101	18.914	24.719	472.8	17.079	5517	1.398	26.440	0.19128	0.692
30 - 40	35	136	25.468	50.187	891.4	7.079	1276	1.544	39.325	0.04515	0.052
40 -50	45	119	22.285	72.472	1002.8	-2.921	190	1.653	36.841	-0.06399	0.091
50 - 60	55	76	14.232	86.704	782.8	-12.921	2376	1.740	24.769	-0.15114	0.325
60 - 70	65	39	7.303	94.007	474.7	-22.921	3837	1.813	13.240	-0.22369	0.365
70 - 80	75	16	2.996	97.004	224.7	-32.921	3247	1.875	5.618	-0.28584	0.245
80 - 90	85	9	1.685	98.689	143.3	-42.921	3105	1.929	3.252	-0.34020	0.195
90 - 100	95	5	0.936	99.625	89.0	-52.921	2622	1.978	1.852	-0.38850	0.141
100 - 110	105	2	0.375	100.000	39.3	-62.921	1483	2.021	0.757	-0.43197	0.070
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.921	0	2.041	0.000	-0.45217	0.000
	Total	534	100.000		4207.9		27911		158.922		3.168

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.079 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.791

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.835 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.510



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

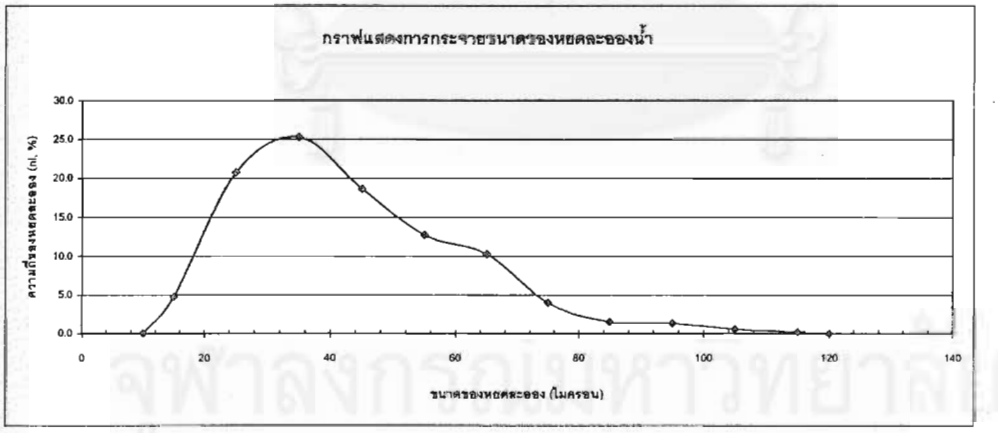
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	33.175	0	1.000	0.000	0.59779	0.000
10 - 20	15	25	4.753	4.753	71.3	28.175	3773	1.176	5.590	0.42169	0.845
20 - 30	25	109	20.722	25.475	518.1	18.175	6845	1.398	28.969	0.19985	0.828
30 - 40	35	133	25.285	50.760	885.0	8.175	1690	1.544	39.042	0.05372	0.073
40 -50	45	98	18.631	69.392	838.4	-1.825	62	1.653	30.801	-0.05543	0.057
50 - 60	55	67	12.738	82.129	700.6	-11.825	1781	1.740	22.168	-0.14258	0.259
60 - 70	65	54	10.266	92.395	667.3	-21.825	4890	1.813	18.612	-0.21513	0.475
70 - 80	75	21	3.992	96.388	299.4	-31.825	4044	1.875	7.486	-0.27728	0.307
80 - 90	85	8	1.521	97.909	129.3	-41.825	2661	1.929	2.934	-0.33163	0.167
90 - 100	95	7	1.331	99.240	126.4	-51.825	3574	1.978	2.632	-0.37994	0.192
100 - 110	105	3	0.570	99.810	59.9	-61.825	2180	2.021	1.153	-0.42340	0.102
110 - 120	115	1	0.190	100.000	21.9	-71.825	981	2.061	0.392	-0.46291	0.041
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-76.825	0	2.079	0.000	-0.48140	0.000
	Total	526	100.000		4317.5		32481		159.779		3.346

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 43.175 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.113

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 39.608 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.527



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

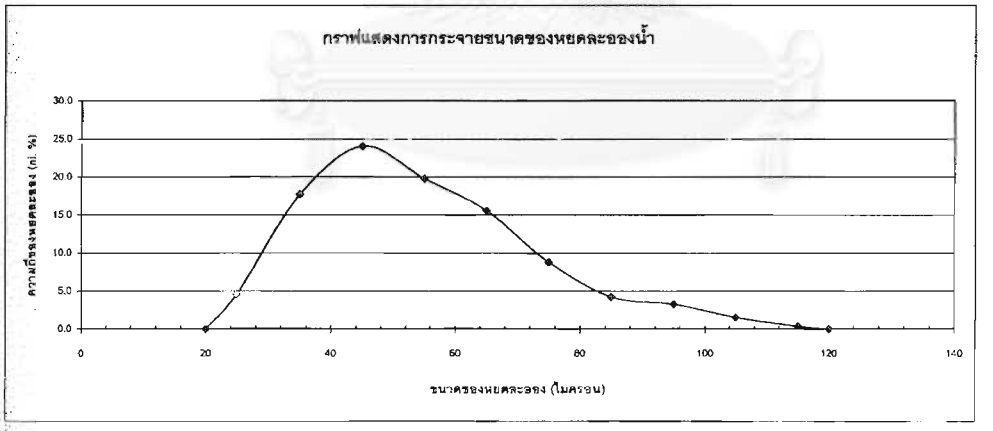
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	34.577	0	1.301	0.000	0.41238	0.000
20 - 30	25	24	4.615	4.615	115.4	29.577	4038	1.398	6.452	0.31547	0.459
30 - 40	35	92	17.692	22.308	619.2	19.577	6781	1.544	27.318	0.16934	0.507
40 - 50	45	125	24.038	46.346	1081.7	9.577	2205	1.653	39.741	0.06020	0.087
50 - 60	55	103	19.808	66.154	1089.4	-0.423	4	1.740	34.473	-0.02696	0.014
60 - 70	65	81	15.577	81.731	1012.5	-10.423	1692	1.813	28.240	-0.09951	0.154
70 - 80	75	46	8.846	90.577	663.5	-20.423	3690	1.875	16.587	-0.16165	0.231
80 - 90	85	22	4.231	94.808	359.6	-30.423	3916	1.929	8.163	-0.21601	0.197
90 - 100	95	17	3.269	98.077	310.6	-40.423	5342	1.978	6.466	-0.26432	0.228
100 - 110	105	8	1.538	99.615	161.5	-50.423	3912	2.021	3.110	-0.30778	0.146
110 - 120	115	2	0.385	100.000	44.2	-60.423	1404	2.061	0.793	-0.34729	0.046
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-65.423	0	2.079	0.000	-0.36577	0.000
	Total	520	100		5457.7		32982		171.341		2.071

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 54.577 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 18.252

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.690 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.395



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

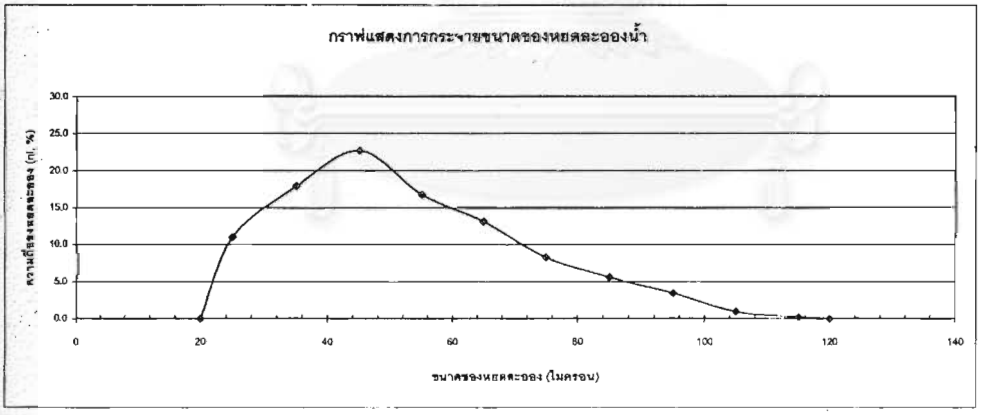
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.476	0	1.301	0.000	0.38952	0.000
20 - 30	25	57	10.983	10.983	274.6	27.476	8291	1.398	15.353	0.29261	0.940
30 - 40	35	93	17.919	28.902	627.2	17.476	5473	1.544	27.668	0.14648	0.384
40 -50	45	118	22.736	51.638	1023.1	7.476	1271	1.653	37.587	0.03734	0.032
50 - 60	55	87	16.763	68.401	922.0	-2.524	107	1.740	29.174	-0.04981	0.042
60 - 70	65	68	13.102	81.503	851.6	-12.524	2055	1.813	23.753	-0.12236	0.196
70 - 80	75	43	8.285	89.788	621.4	-22.524	4203	1.875	15.535	-0.18451	0.282
80 - 90	85	29	5.588	95.376	475.0	-32.524	5911	1.929	10.781	-0.23887	0.319
90 - 100	95	18	3.468	98.844	329.5	-42.524	6272	1.978	6.859	-0.28717	0.286
100 - 110	105	5	0.963	99.807	101.2	-52.524	2658	2.021	1.947	-0.33064	0.105
110 - 120	115	1	0.193	100.000	22.2	-62.524	753	2.061	0.397	-0.37015	0.026
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-67.524	0	2.079	0.000	-0.38663	0.000
	Total	519	1.00		5247.6		36993		169.055		2.613

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 52.476 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 19.330

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.040 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.454



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

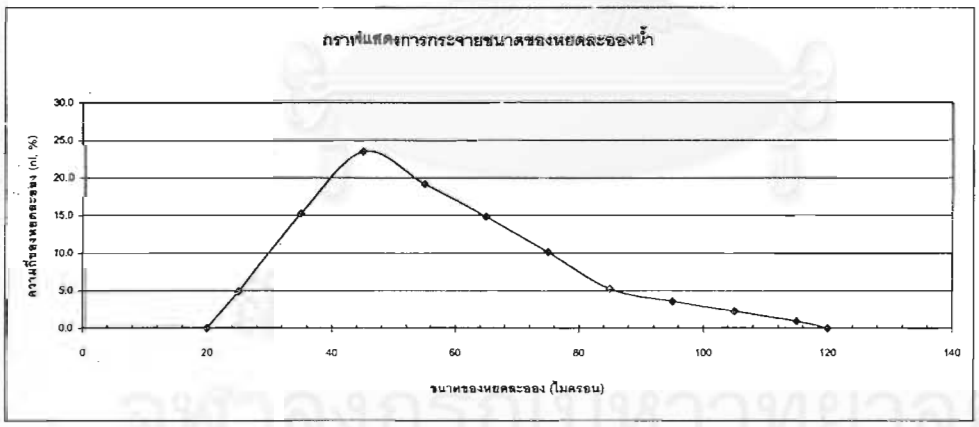
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	36.356	0	1.301	0.000	0.42442	0.000
20 - 30	25	26	4.896	4.896	122.4	31.356	4814	1.398	6.845	0.32751	0.525
30 - 40	35	81	15.254	20.151	533.9	21.356	6957	1.544	23.554	0.18139	0.502
40 -50	45	125	23.540	43.691	1059.3	11.356	3038	1.653	38.917	0.07224	0.123
50 - 60	55	102	19.209	62.900	1056.5	1.356	35	1.740	33.431	-0.01491	0.004
60 - 70	65	79	14.878	77.778	967.0	-8.644	1112	1.813	26.972	-0.08746	0.114
70 - 80	75	54	10.169	87.947	762.7	-18.644	3535	1.875	19.068	-0.14961	0.228
80 - 90	85	28	5.273	93.220	448.2	-28.644	4326	1.929	10.174	-0.20396	0.219
90 - 100	95	19	3.578	96.798	339.9	-38.644	5343	1.978	7.077	-0.25227	0.228
100 - 110	105	12	2.260	99.058	237.3	-48.644	5347	2.021	4.568	-0.29574	0.198
110 - 120	115	5	0.942	100.000	108.3	-58.644	3238	2.061	1.940	-0.33524	0.106
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-63.644	0	2.079	0.000	-0.35373	0.000
	Total	531	100		5635.6		37745		172.545		2.246

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 56.356 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 19.526

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 53.144 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_{gi} - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.415



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

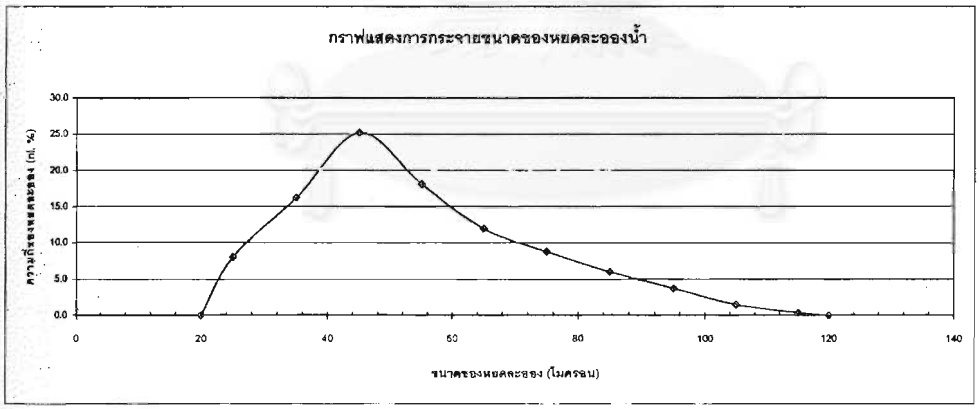
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	34.028	0	1.301	0.000	0.40399	0.000
20 - 30	25	43	8.037	8.037	200.9	29.028	6773	1.398	11.236	0.30708	0.758
30 - 40	35	87	16.262	24.299	569.2	19.026	5888	1.544	25.109	0.16095	0.421
40 - 50	45	135	25.234	49.533	1135.5	9.028	2057	1.653	41.717	0.05181	0.068
50 - 60	55	97	18.131	67.664	997.2	-0.972	17	1.740	31.554	-0.03534	0.023
60 - 70	65	64	11.963	79.626	777.6	-10.972	1440	1.813	21.687	-0.10789	0.139
70 - 80	75	47	8.785	88.411	658.9	-20.972	3864	1.875	16.473	-0.17004	0.254
80 - 90	85	32	5.981	94.393	508.4	-30.972	5738	1.929	11.540	-0.22440	0.301
90 - 100	95	20	3.738	98.131	355.1	-40.972	6276	1.978	7.393	-0.27270	0.278
100 - 110	105	8	1.495	99.626	157.0	-50.972	3885	2.021	3.022	-0.31617	0.149
110 - 120	115	2	0.374	100.000	43.0	-60.972	1390	2.061	0.770	-0.35568	0.047
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-65.972	0	2.079	0.000	-0.37416	0.000
	Total	535	100		5402.8		37326		170.502		2.439

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 54.028 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d)^2 / ((\Sigma n) - 1)\}^{1/2}$ = 19.417

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 50.701 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.435



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.03	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

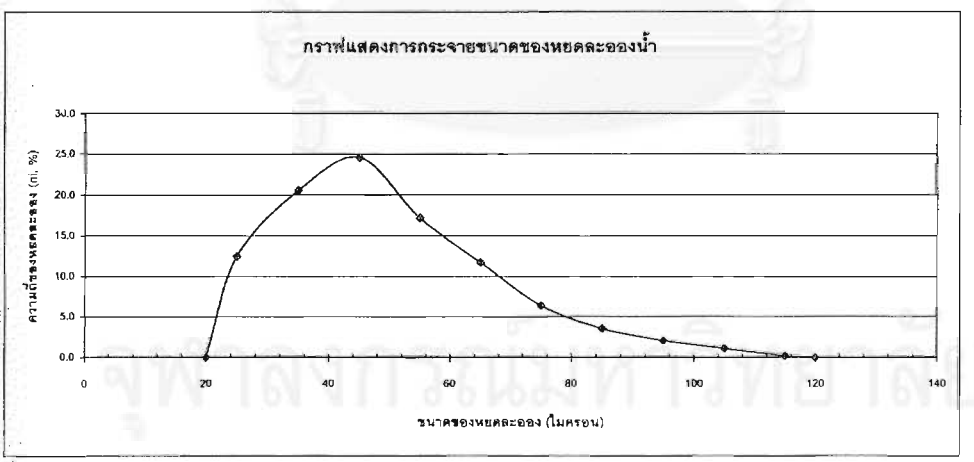
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	29.726	0	1.301	0.000	0.36742	0.000
20 - 30	25	66	12.476	12.476	311.9	24.726	7628	1.398	17.441	0.27051	0.913
30 - 40	35	109	20.605	33.081	721.2	14.726	4468	1.544	31.815	0.12439	0.319
40 -50	45	130	24.575	57.656	1105.9	4.726	549	1.653	40.627	0.01524	0.006
50 - 60	55	91	17.202	74.858	946.1	-5.274	479	1.740	29.938	-0.07191	0.089
60 - 70	65	62	11.720	86.578	761.8	-15.274	2734	1.813	21.248	-0.14446	0.245
70 - 80	75	34	6.427	93.006	482.0	-25.274	4106	1.875	12.051	-0.20661	0.274
80 - 90	85	19	3.592	96.597	305.3	-35.274	4469	1.929	6.930	-0.26096	0.245
90 - 100	95	11	2.079	98.677	197.5	-45.274	4262	1.978	4.112	-0.30927	0.199
100 - 110	105	6	1.134	99.811	119.1	-55.274	3465	2.021	2.292	-0.35273	0.141
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-65.274	805	2.061	0.390	-0.39224	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-70.274	0	2.079	0.000	-0.41073	0.000
	Total	529	100.000		4972.6		32965		166.845		2.459

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 49.726 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.248

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 46.607 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.437



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.03	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

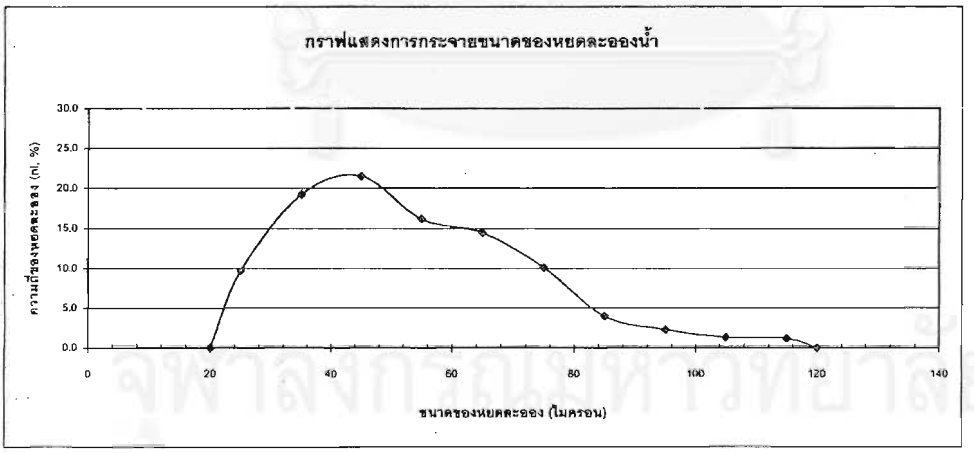
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.019	0	1.301	0.000	0.39404	0.000
20 - 30	25	51	9.714	9.714	242.9	28.019	7626	1.398	13.580	0.29713	0.858
30 - 40	35	101	19.238	28.952	673.3	18.019	6246	1.544	29.705	0.15100	0.439
40 -50	45	113	21.524	50.476	968.6	8.019	1384	1.653	35.583	0.04186	0.038
50 - 60	55	85	16.190	66.667	890.5	-1.981	64	1.740	28.177	-0.04529	0.033
60 - 70	65	76	14.476	81.143	941.0	-11.981	2078	1.813	26.244	-0.11784	0.201
70 - 80	75	53	10.095	91.238	757.1	-21.981	4878	1.875	18.929	-0.17999	0.327
80 - 90	85	21	4.000	95.238	340.0	-31.981	4091	1.929	7.718	-0.23435	0.220
90 - 100	95	12	2.286	97.524	217.1	-41.981	4028	1.978	4.521	-0.28265	0.183
100 - 110	105	7	1.333	98.857	140.0	-51.981	3603	2.021	2.695	-0.32612	0.142
110 - 120	115	6	1.143	100.000	131.4	-61.981	4390	2.061	2.355	-0.36563	0.153
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-66.981	0	2.079	0.000	-0.38411	0.000
	Total	525	100.000		5301.9		38389		169.507		2.592

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 53.019 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 19.692

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.553 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.451



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.03	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

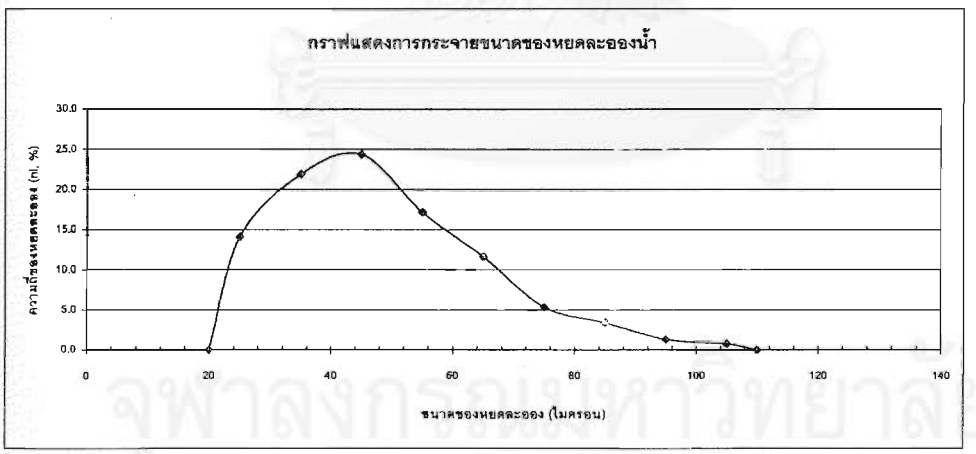
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	28.124	0	1.301	0.000	0.35422	0.000
20 - 30	25	74	14.095	14.095	352.4	23.124	7537	1.398	19.704	0.25731	0.933
30 - 40	35	115	21.905	36.000	766.7	13.124	3773	1.544	33.822	0.11118	0.271
40 -50	45	128	24.381	60.381	1097.1	3.124	238	1.653	40.307	0.00204	0.000
50 - 60	55	90	17.143	77.524	942.9	-6.876	811	1.740	29.835	-0.08511	0.124
60 - 70	65	61	11.619	89.143	755.2	-16.876	3309	1.813	21.064	-0.15766	0.289
70 - 80	75	28	5.333	94.476	400.0	-26.876	3852	1.875	10.000	-0.21981	0.258
80 - 90	85	18	3.429	97.905	291.4	-36.876	4662	1.929	6.615	-0.27417	0.258
90 - 100	95	7	1.333	99.238	126.7	-46.876	2930	1.978	2.637	-0.32247	0.139
100 - 110	105	4	0.762	100.000	80.0	-56.876	2465	2.021	1.540	-0.36594	0.102
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-61.876	0	2.041	0.000	-0.38614	0.000
	Total	525	100.000		4812.4		29577		165.525		2.373

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 48.124 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.284

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 45.212 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.428



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.03	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

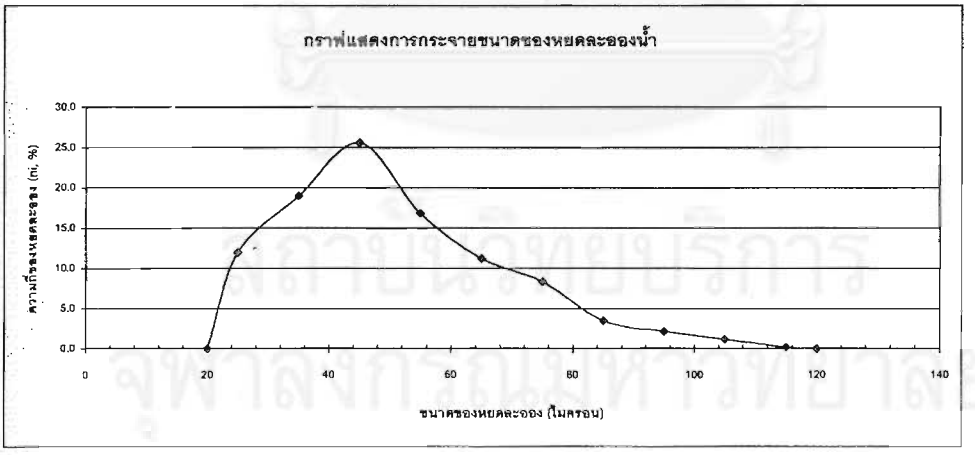
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.426	0	1.301	0.000	0.37353	0.000
20 - 30	25	62	12.016	12.016	300.4	25.426	7768	1.398	16.797	0.27662	0.919
30 - 40	35	98	18.992	31.008	664.7	15.426	4520	1.544	29.325	0.13050	0.323
40 -50	45	132	25.581	56.589	1151.2	5.426	753	1.653	42.291	0.02135	0.012
50 - 60	55	87	16.860	73.450	927.3	-4.574	353	1.740	29.343	-0.06580	0.073
60 - 70	65	58	11.240	84.690	730.6	-14.574	2387	1.813	20.378	-0.13835	0.215
70 - 80	75	43	8.333	93.023	625.0	-24.574	5032	1.875	15.626	-0.20050	0.335
80 - 90	85	18	3.488	96.512	296.5	-34.574	4170	1.929	6.731	-0.25485	0.227
90 - 100	95	11	2.132	98.643	202.5	-44.574	4235	1.978	4.216	-0.30316	0.196
100 - 110	105	6	1.163	99.806	122.1	-54.574	3463	2.021	2.350	-0.34662	0.140
110 - 120	115	1	0.194	100.000	22.3	-64.574	808	2.061	0.399	-0.38613	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.574	0	2.079	0.000	-0.40462	0.000
	Total	516	100.000		5042.6		33490		167.456		2.469

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.426 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 18.392

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 47.268 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.439



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.00	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

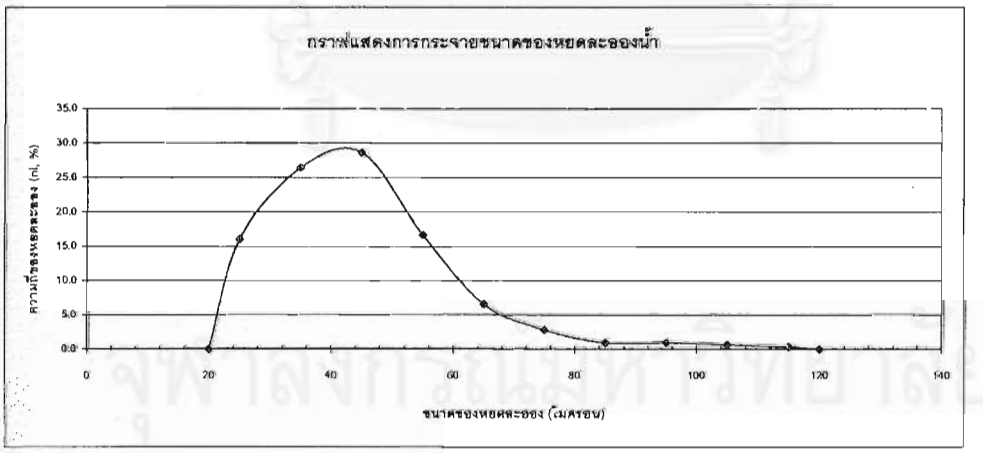
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	22.819	0	1.301	0.000	0.30555	0.000
20 - 30	25	108	20.849	20.849	521.2	17.819	6620	1.398	29.146	0.20864	0.908
30 - 40	35	143	27.606	48.456	966.2	7.819	1688	1.544	42.626	0.06251	0.108
40 -50	45	132	25.483	73.938	1146.7	-2.181	121	1.653	42.128	-0.04663	0.055
50 - 60	55	74	14.286	88.224	785.7	-12.181	2120	1.740	24.862	-0.13378	0.256
60 - 70	65	35	6.757	94.981	439.2	-22.181	3324	1.813	12.249	-0.20633	0.288
70 - 80	75	13	2.510	97.490	188.2	-32.181	2599	1.875	4.706	-0.26848	0.181
80 - 90	85	6	1.158	98.649	98.5	-42.181	2061	1.929	2.235	-0.32284	0.121
90 - 100	95	4	0.772	99.421	73.4	-52.181	2103	1.978	1.527	-0.37114	0.106
100 - 110	105	2	0.386	99.807	40.5	-62.181	1493	2.021	0.780	-0.41461	0.066
110 - 120	115	1	0.193	100.000	22.2	-72.181	1006	2.061	0.398	-0.45412	0.040
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-77.181	0	2.079	0.000	-0.47260	0.000
	Total	518	100.000		4281.9		23134		160.658		2.128

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.819 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 15.287

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 40.418 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.402



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.00	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

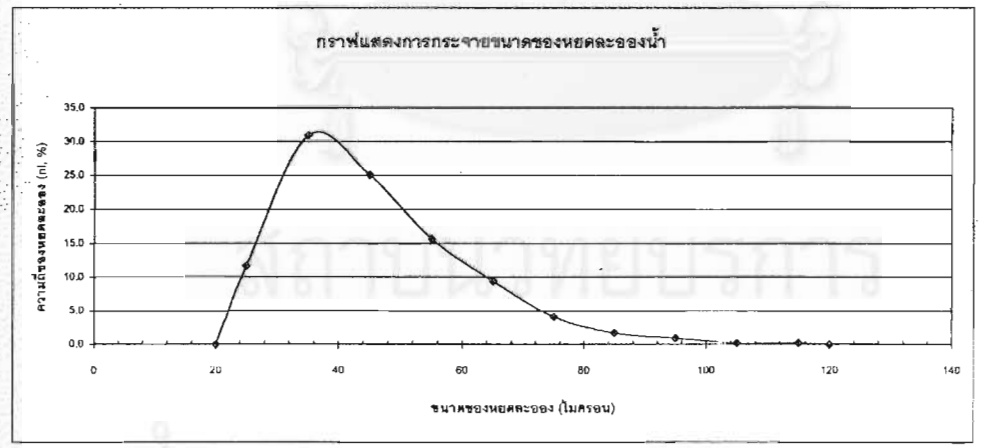
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.660	0	1.301	0.000	0.33569	0.000
20 - 30	25	62	11.698	11.698	292.5	20.660	4993	1.398	16.353	0.23878	0.667
30 - 40	35	164	30.943	42.642	1083.0	10.660	3517	1.544	47.779	0.09265	0.266
40 -50	45	133	25.094	67.736	1129.2	0.660	11	1.653	41.486	-0.01650	0.007
50 - 60	55	83	15.660	83.396	861.3	-9.340	1366	1.740	27.255	-0.10365	0.168
60 - 70	65	50	9.434	92.830	613.2	-19.340	3529	1.813	17.103	-0.17620	0.293
70 - 80	75	22	4.151	96.981	311.3	-29.340	3573	1.875	7.783	-0.23835	0.236
80 - 90	85	9	1.698	98.679	144.3	-39.340	2628	1.929	3.276	-0.29270	0.145
90 - 100	95	5	0.943	99.623	89.6	-49.340	2297	1.978	1.866	-0.34101	0.110
100 - 110	105	1	0.189	99.811	19.8	-59.340	664	2.021	0.381	-0.38447	0.028
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-69.340	907	2.061	0.389	-0.42398	0.034
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.340	0	2.079	0.000	-0.44247	0.000
	Total	530	100.000		4566.0		23485		163.672		1.953

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.660 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 15.402

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.323 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.382



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 39.80 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 6.00 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

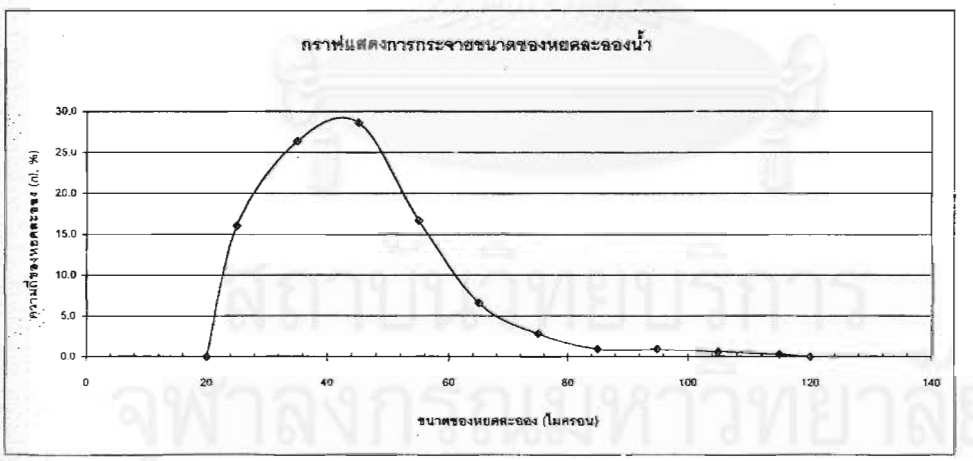
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.845	0	1.301	0.000	0.33308	0.000
20 - 30	25	86	16.896	16.896	422.4	20.845	7341	1.398	23.619	0.23617	0.942
30 - 40	35	123	24.165	41.061	845.8	10.845	2842	1.544	37.312	0.09004	0.196
40 -50	45	134	26.326	67.387	1184.7	0.845	19	1.653	43.523	-0.01910	0.010
50 - 60	55	80	15.717	83.104	864.4	-9.155	1317	1.740	27.353	-0.10625	0.177
60 - 70	65	39	7.662	90.766	498.0	-19.155	2811	1.813	13.891	-0.17881	0.245
70 - 80	75	21	4.126	94.892	309.4	-29.155	3507	1.875	7.736	-0.24095	0.240
80 - 90	85	16	3.143	98.035	267.2	-39.155	4819	1.929	6.065	-0.29531	0.274
90 - 100	95	7	1.375	99.411	130.6	-49.155	3323	1.976	2.720	-0.34362	0.162
100 - 110	105	3	0.589	100.000	61.9	-59.155	2062	2.021	1.191	-0.38708	0.088
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-64.155	0	2.041	0.000	-0.40728	0.000
	Total	509	100.000		4584.5		28043		163.411		2.335

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.845 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.830

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.063 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.424



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.00	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

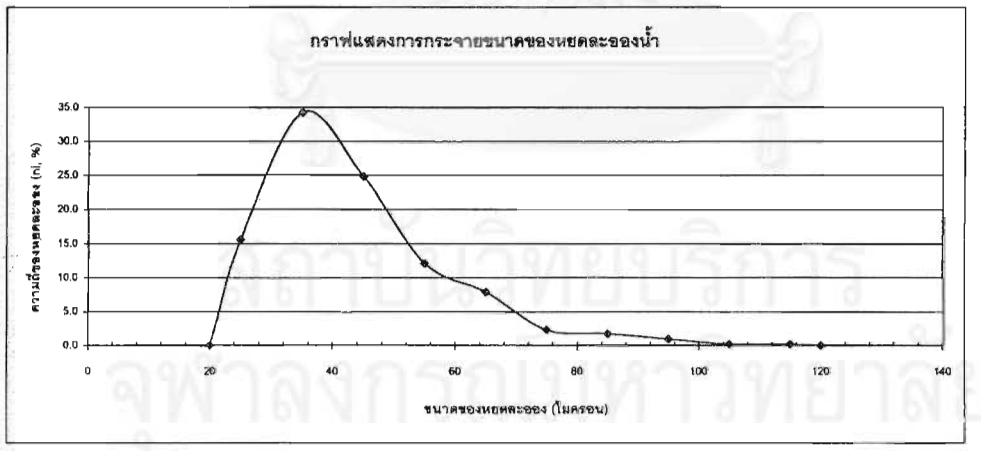
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	23.365	0	1.301	0.000	0.31272	0.000
20 - 30	25	81	15.577	15.577	389.4	18.365	5254	1.398	21.776	0.21581	0.725
30 - 40	35	178	34.231	49.808	1198.1	8.365	2395	1.544	52.855	0.06968	0.166
40 -50	45	129	24.808	74.615	1116.3	-1.635	66	1.653	41.012	-0.03946	0.039
50 - 60	55	63	12.115	86.731	666.3	-11.635	1640	1.740	21.085	-0.12661	0.194
60 - 70	65	41	7.885	94.615	512.5	-21.635	3690	1.813	14.294	-0.19916	0.313
70 - 80	75	12	2.308	96.923	173.1	-31.635	2309	1.875	4.327	-0.26131	0.158
80 - 90	85	9	1.731	98.654	147.1	-41.635	3000	1.929	3.339	-0.31567	0.172
90 - 100	95	5	0.962	99.615	91.3	-51.635	2564	1.978	1.902	-0.36397	0.127
100 - 110	105	1	0.192	99.808	20.2	-61.635	731	2.021	0.389	-0.40744	0.032
110 - 120	115	1	0.192	100.000	22.1	-71.635	987	2.061	0.396	-0.44695	0.038
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-76.635	0	2.079	0.000	-0.46543	0.000
	Total	520	100.000		4336.5		22637		161.375		1.965

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 43.365 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.121

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 41.091 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.383



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.16	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

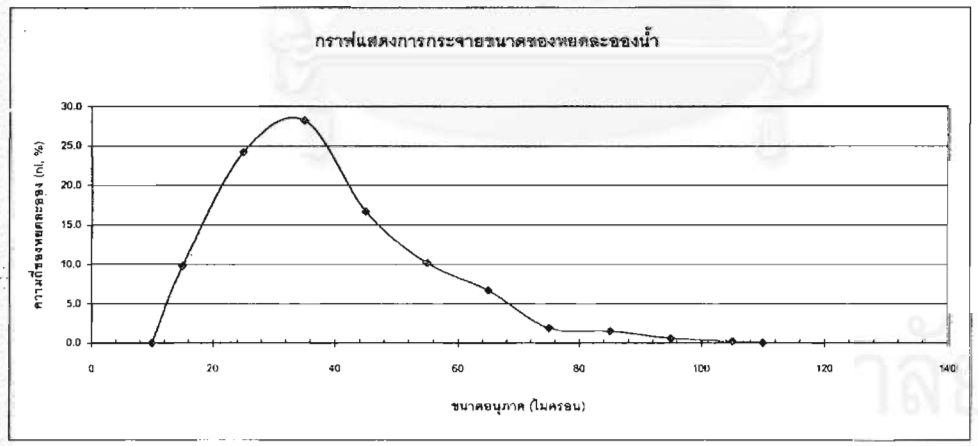
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.359	0	1.000	0.000	0.54465	0.000
10 - 20	15	51	9.789	9.789	146.8	23.359	5341	1.176	11.513	0.36855	1.330
20 - 30	25	126	24.184	33.973	604.6	13.359	4316	1.398	33.808	0.14671	0.521
30 - 40	35	147	28.215	62.188	987.5	3.359	318	1.544	43.566	0.00058	0.000
40 -50	45	87	16.699	78.887	751.4	-6.641	736	1.653	27.606	-0.10857	0.197
50 - 60	55	53	10.173	89.060	559.5	-16.641	2817	1.740	17.704	-0.19572	0.390
60 - 70	65	35	6.718	95.777	436.7	-26.641	4768	1.813	12.179	-0.26827	0.483
70 - 80	75	10	1.919	97.697	144.0	-36.641	2577	1.875	3.599	-0.33042	0.210
80 - 90	85	8	1.536	99.232	130.5	-46.641	3340	1.929	2.963	-0.38477	0.227
90 - 100	95	3	0.576	99.808	54.7	-56.641	1847	1.978	1.139	-0.43308	0.108
100 - 110	105	1	0.192	100.000	20.2	-66.641	852	2.021	0.388	-0.47654	0.044
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-71.641	0	2.041	0.000	-0.49675	0.000
	Total	521	100.000		3835.9		26914		154.465		3.509

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 36.359 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i)-1)]^{1/2}$ = 16.488

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.047 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.543



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.16	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

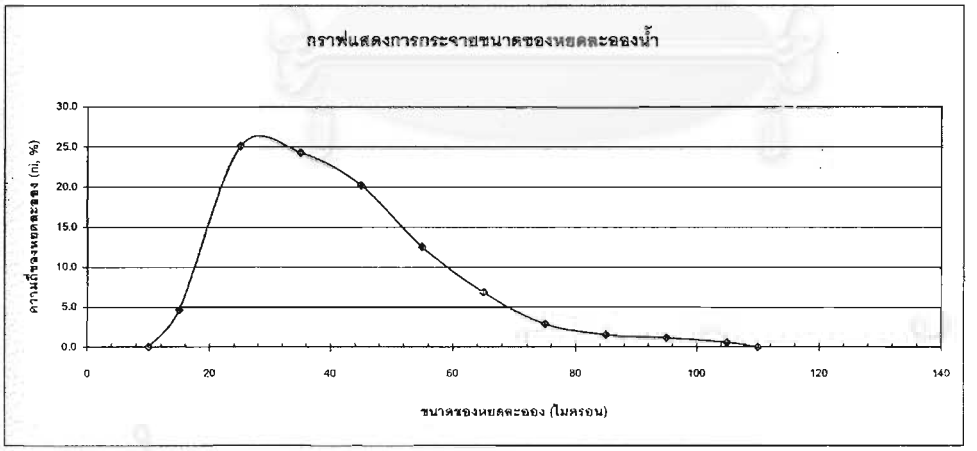
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.216	0	1.000	0.000	0.57889	0.000
10 - 20	15	24	4.706	4.706	70.6	26.216	3234	1.176	5.535	0.40280	0.764
20 - 30	25	128	25.098	29.804	627.5	16.216	6599	1.398	35.086	0.18095	0.822
30 - 40	35	124	24.314	54.118	851.0	6.216	939	1.544	37.542	0.03482	0.029
40 -50	45	103	20.196	74.314	908.8	-3.784	289	1.653	33.388	-0.07432	0.112
50 - 60	55	64	12.549	86.863	690.2	-13.784	2384	1.740	21.840	-0.16147	0.327
60 - 70	65	35	6.863	93.725	446.1	-23.784	3882	1.813	12.442	-0.23402	0.376
70 - 80	75	15	2.941	96.667	220.6	-33.784	3357	1.875	5.515	-0.29617	0.258
80 - 90	85	8	1.569	98.235	133.3	-43.784	3007	1.929	3.027	-0.35053	0.193
90 - 100	95	6	1.176	99.412	111.8	-53.784	3403	1.978	2.327	-0.39883	0.187
100 - 110	105	3	0.588	100.000	61.8	-63.784	2393	2.021	1.189	-0.44230	0.115
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-68.784	0	2.041	0.000	-0.46250	0.000
	Total	510	100.000		4121.6		29489		157.889		3.182

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 41.216 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.259

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 37.922 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.511



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.16	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

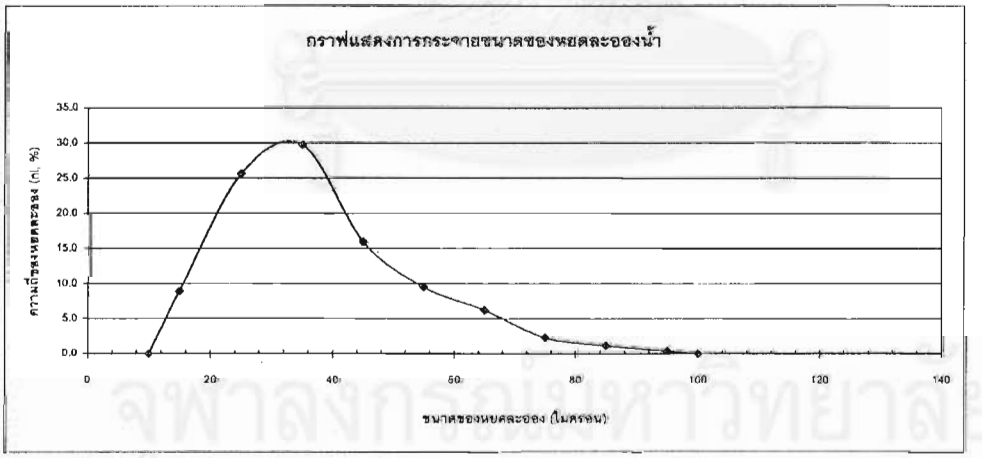
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.763	0	1.000	0.000	0.54038	0.000
10 - 20	15	46	8.949	8.949	134.2	22.763	4637	1.176	10.525	0.36429	1.188
20 - 30	25	132	25.681	34.630	642.0	12.763	4183	1.398	35.900	0.14244	0.521
30 - 40	35	153	29.767	64.397	1041.8	2.763	227	1.544	45.962	-0.00368	0.000
40 -50	45	82	15.953	80.350	717.9	-7.237	836	1.653	26.374	-0.11283	0.203
50 - 60	55	49	9.533	89.883	524.3	-17.237	2833	1.740	16.591	-0.19998	0.381
60 - 70	65	32	6.226	96.109	404.7	-27.237	4619	1.813	11.287	-0.27253	0.462
70 - 80	75	12	2.335	98.444	175.1	-37.237	3237	1.875	4.378	-0.33468	0.261
80 - 90	85	6	1.167	99.611	99.2	-47.237	2605	1.929	2.252	-0.38903	0.177
90 - 100	95	2	0.389	100.000	37.0	-57.237	1275	1.978	0.770	-0.43734	0.074
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.237	0	2.000	0.000	-0.45962	0.000
	Total	514	100.000		3776.3		24451		154.038		3.268

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 37.763 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 15.716

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 34.704 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.519



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	8.16	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

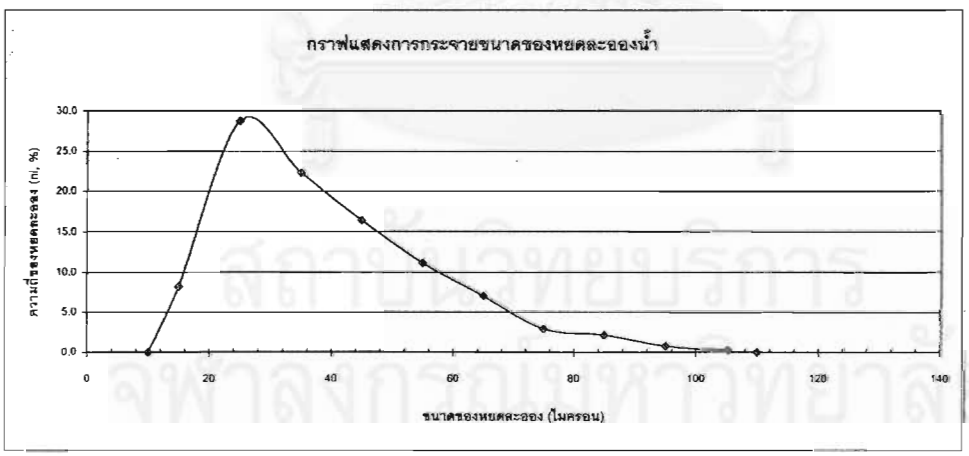
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.325	0	1.000	0.000	0.55290	0.000
10 - 20	15	42	8.219	8.219	123.3	24.325	4863	1.176	9.667	0.37681	1.167
20 - 30	25	147	28.767	36.986	719.2	14.325	5903	1.398	40.215	0.15496	0.691
30 - 40	35	114	22.309	59.295	780.8	4.325	417	1.544	34.447	0.00884	0.002
40 -50	45	84	16.438	75.734	739.7	-5.675	529	1.653	27.176	-0.10031	0.165
50 - 60	55	57	11.155	86.888	613.5	-15.675	2741	1.740	19.413	-0.18746	0.392
60 - 70	65	36	7.045	93.933	457.9	-25.675	4644	1.813	12.772	-0.26001	0.476
70 - 80	75	15	2.935	96.869	220.2	-35.675	3736	1.875	5.504	-0.32216	0.305
80 - 90	85	11	2.153	99.022	183.0	-45.675	4491	1.929	4.153	-0.37652	0.305
90 - 100	95	4	0.783	99.804	74.4	-55.675	2426	1.978	1.548	-0.42482	0.141
100 - 110	105	1	0.196	100.000	20.5	-65.675	844	2.021	0.396	-0.46829	0.043
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-70.675	0	2.041	0.000	-0.48849	0.000
	Total	511	100.000		3932.5		30595		155.290		3.687

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.325 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.580

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.719 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.560



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 2.37 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

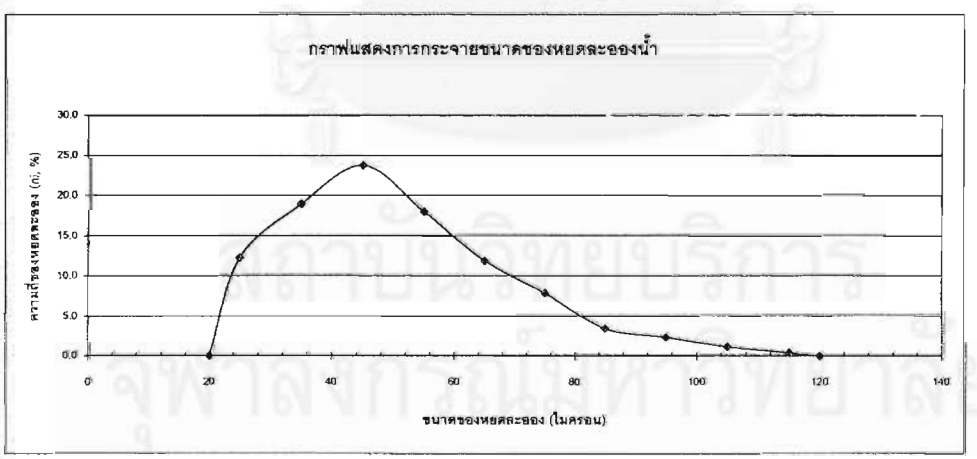
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.670	0	1.301	0.000	0.37505	0.000
20 - 30	25	64	12.261	12.261	306.5	25.670	8079	1.398	17.139	0.27814	0.948
30 - 40	35	99	18.966	31.226	663.8	15.670	4657	1.544	29.284	0.13201	0.331
40 - 50	45	124	23.755	54.981	1069.0	5.670	764	1.653	39.272	0.02286	0.012
50 - 60	55	94	18.008	72.989	990.4	-4.330	338	1.740	31.340	-0.06429	0.074
60 - 70	65	62	11.877	84.866	772.0	-14.330	2439	1.813	21.533	-0.13684	0.222
70 - 80	75	41	7.854	92.720	589.1	-24.330	4649	1.875	14.727	-0.19898	0.311
80 - 90	85	18	3.448	96.169	293.1	-34.330	4064	1.929	6.653	-0.25334	0.221
90 - 100	95	12	2.299	98.467	218.4	-44.330	4517	1.978	4.546	-0.30165	0.209
100 - 110	105	6	1.149	99.617	120.7	-54.330	3393	2.021	2.323	-0.34511	0.137
110 - 120	115	2	0.383	100.000	44.1	-64.330	1586	2.061	0.790	-0.38462	0.057
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.330	0	2.079	0.000	-0.40310	0.000
	Total	522	100.000		5067.0		34486		167.608		2.467

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.670 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 18.664

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 47.433 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.438



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.37	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

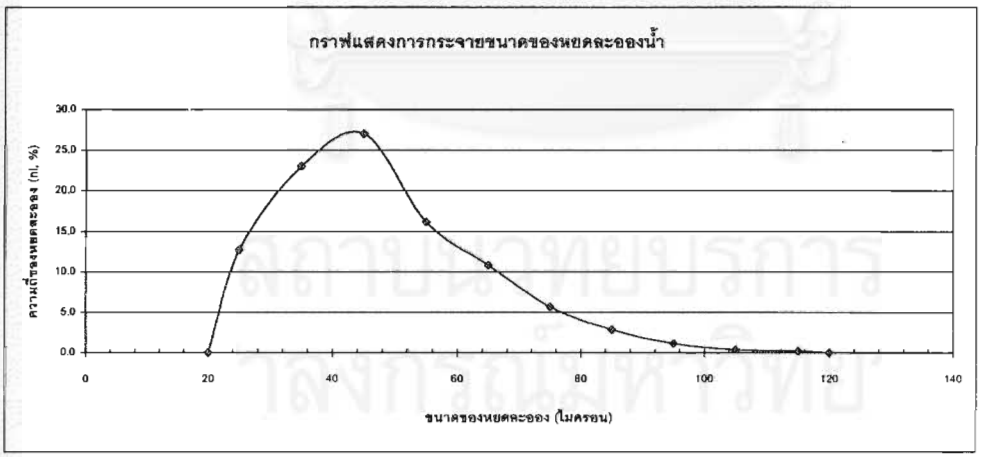
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	27.719	0	1.301	0.000	0.35235	0.000
20 - 30	25	67	12.738	12.738	318.4	22.719	6574	1.398	17.806	0.25544	0.831
30 - 40	35	121	23.004	35.741	805.1	12.719	3721	1.544	35.519	0.10932	0.275
40 -50	45	142	26.996	62.738	1214.8	2.719	200	1.653	44.630	0.00017	0.000
50 - 60	55	85	16.160	78.897	888.8	-7.281	857	1.740	28.124	-0.08698	0.122
60 - 70	65	57	10.837	89.734	704.4	-17.281	3236	1.813	19.646	-0.15953	0.276
70 - 80	75	30	5.703	95.437	427.8	-27.281	4245	1.875	10.694	-0.22168	0.280
80 - 90	85	15	2.852	98.289	242.4	-37.281	3964	1.929	5.502	-0.27694	0.217
90 - 100	95	6	1.141	99.430	108.4	-47.281	2550	1.978	2.256	-0.32434	0.120
100 - 110	105	2	0.380	99.810	39.9	-57.281	1248	2.021	0.769	-0.36781	0.051
110 - 120	115	1	0.190	100.000	21.9	-67.281	861	2.061	0.392	-0.40731	0.032
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-72.281	0	2.079	0.000	-0.42580	0.000
	Total	526	100.000		4771.9		27455		165.338		2.173

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 47.719 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.653

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 45.018 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.407



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.37	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

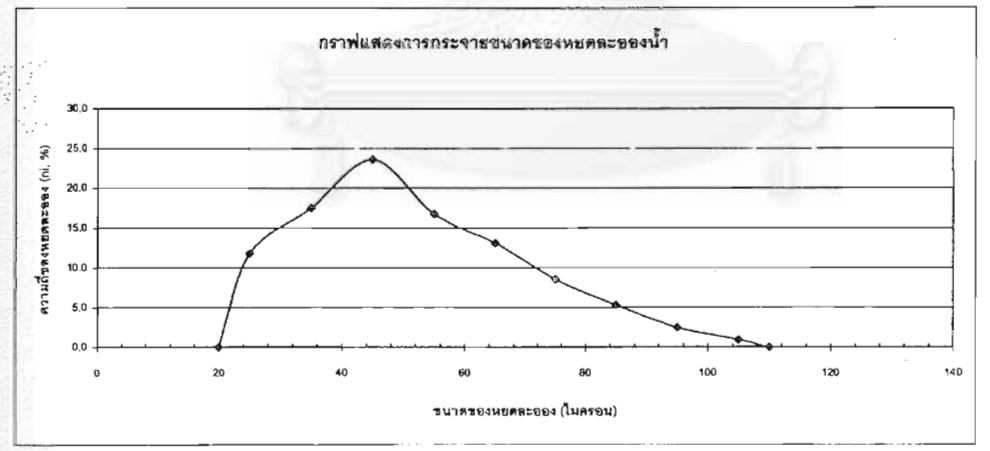
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i/\log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	31.692	0	1.301	0.000	0.38373	0.000
20 - 30	25	62	11.787	11.787	294.7	26.692	8398	1.398	16.478	0.28682	0.970
30 - 40	35	92	17.490	29.278	612.2	16.692	4873	1.544	27.007	0.14070	0.346
40 -50	45	124	23.574	52.852	1060.8	6.692	1056	1.653	38.973	0.03155	0.023
50 - 60	55	88	16.730	69.582	920.2	-3.308	183	1.740	29.116	-0.05560	0.052
60 - 70	65	69	13.118	82.700	852.7	-13.308	2323	1.813	23.782	-0.12815	0.215
70 - 80	75	45	8.555	91.255	641.6	-23.308	4648	1.875	16.041	-0.19030	0.310
80 - 90	85	28	5.323	96.578	452.5	-33.308	5906	1.929	10.271	-0.24466	0.319
90 - 100	95	13	2.471	99.049	234.8	-43.308	4635	1.978	4.888	-0.29296	0.212
100 - 110	105	5	0.951	100.000	99.8	-53.308	2701	2.021	1.921	-0.33643	0.108
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-58.308	0	2.041	0.000	-0.35663	0.000
	Total	526	100.000		5169.2		34723		168.476		2.555

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 51.692 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 18.728

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 48.391 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_{ij} - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.448



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.37	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

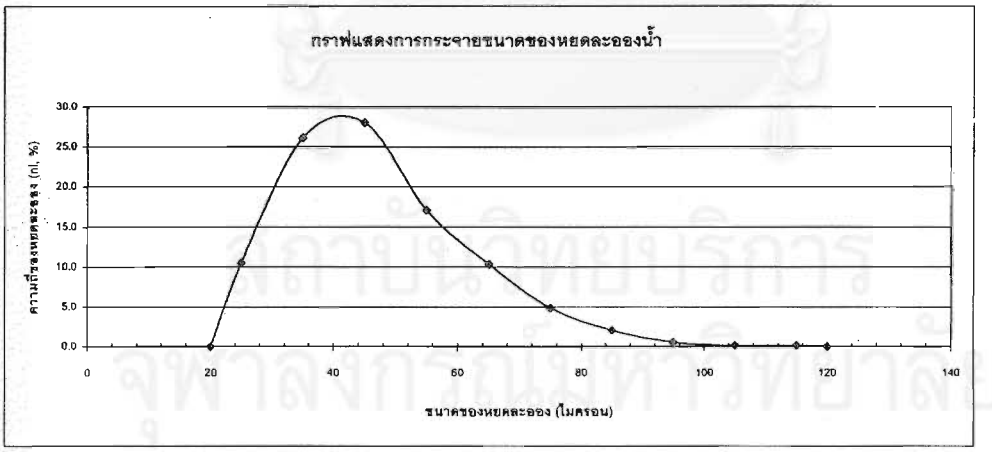
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	26.880	0	1.301	0.000	0.34805	0.000
20 - 30	25	56	10.526	10.526	263.2	21.880	5039	1.398	14.715	0.25114	0.664
30 - 40	35	139	26.128	36.654	914.5	11.880	3687	1.544	40.343	0.10502	0.288
40 -50	45	149	28.008	64.662	1260.3	1.880	99	1.653	46.302	-0.00413	0.000
50 - 60	55	91	17.105	81.767	940.8	-8.120	1128	1.740	29.769	-0.09128	0.143
60 - 70	65	55	10.338	92.105	672.0	-18.120	3395	1.813	18.743	-0.16383	0.277
70 - 80	75	26	4.887	96.992	366.5	-28.120	3865	1.875	9.164	-0.22598	0.250
80 - 90	85	11	2.068	99.060	175.8	-38.120	3005	1.929	3.989	-0.28034	0.162
90 - 100	95	3	0.564	99.624	53.6	-48.120	1306	1.978	1.115	-0.32864	0.061
100 - 110	105	1	0.188	99.812	19.7	-58.120	635	2.021	0.380	-0.37211	0.026
110 - 120	115	1	0.188	100.000	21.6	-68.120	872	2.061	0.387	-0.41161	0.032
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-73.120	0	2.079	0.000	-0.43010	0.000
	Total	532	100.000		4688.0		23030		164.908		1.872

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.890 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.252

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 44.574 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.372



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.15 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

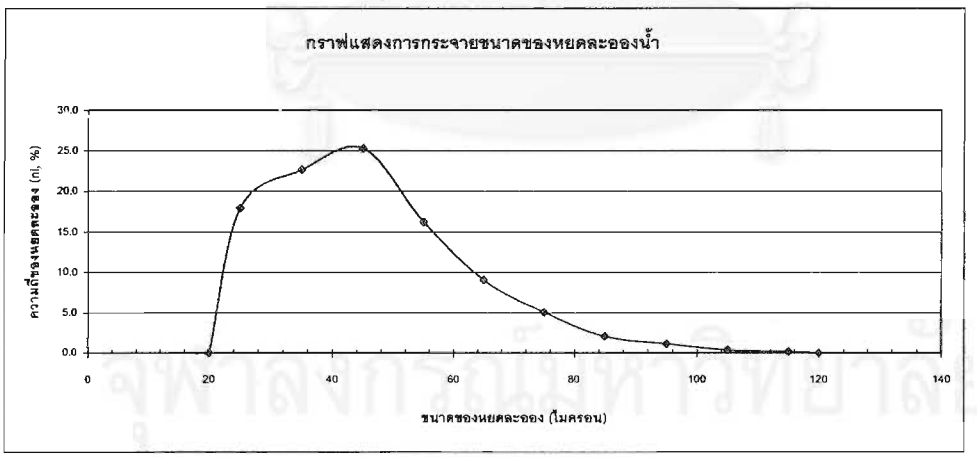
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.868	0	1.301	0.000	0.33318	0.000
20 - 30	25	95	17.925	17.925	448.1	20.868	7806	1.398	25.057	0.23627	1.001
30 - 40	35	120	22.642	40.566	792.5	10.868	2674	1.544	34.960	0.09015	0.184
40 -50	45	134	25.283	65.849	1137.7	0.868	19	1.653	41.798	-0.01900	0.009
50 - 60	55	86	16.226	82.075	892.5	-9.132	1353	1.740	28.240	-0.10615	0.183
60 - 70	65	48	9.057	91.132	588.7	-19.132	3315	1.813	16.419	-0.17870	0.289
70 - 80	75	27	5.094	96.226	382.1	-29.132	4323	1.875	9.552	-0.24085	0.296
80 - 90	85	11	2.075	98.302	176.4	-39.132	3178	1.929	4.004	-0.29520	0.181
90 - 100	95	6	1.132	99.434	107.5	-49.132	2733	1.978	2.239	-0.34351	0.134
100 - 110	105	2	0.377	99.811	39.6	-59.132	1319	2.021	0.763	-0.38697	0.057
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-69.132	902	2.061	0.389	-0.42648	0.034
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.132	0	2.079	0.000	-0.44497	0.000
	Total	530	100.000		4586.8		27623		163.421		2.367

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.868 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.704

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.074 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n - 1)\}$ = 1.428



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

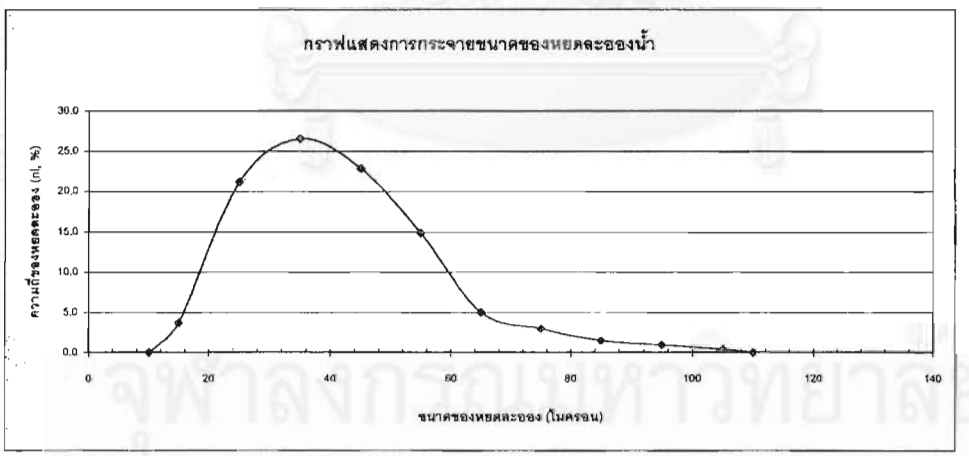
interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.654	0	1.000	0.000	0.58844	0.000
10 - 20	15	20	3.717	3.717	55.8	26.654	2641	1.176	4.372	0.41235	0.632
20 - 30	25	114	21.190	24.907	529.7	16.654	5877	1.398	29.622	0.19050	0.769
30 - 40	35	143	26.580	51.487	930.3	6.654	1177	1.544	41.041	0.04437	0.052
40 -50	45	123	22.862	74.349	1028.8	-3.346	256	1.653	37.796	-0.06478	0.096
50 - 60	55	80	14.870	89.219	817.8	-13.346	2648	1.740	25.879	-0.15193	0.343
60 - 70	65	27	5.019	94.238	326.2	-23.346	2735	1.813	9.098	-0.22448	0.253
70 - 80	75	16	2.974	97.212	223.0	-33.346	3307	1.875	5.576	-0.28662	0.244
80 - 90	85	8	1.487	98.699	126.4	-43.346	2794	1.929	2.869	-0.34098	0.173
90 - 100	95	5	0.929	99.628	88.3	-53.346	2645	1.978	1.838	-0.38929	0.141
100 - 110	105	2	0.372	100.000	39.0	-63.346	1492	2.021	0.751	-0.43275	0.070
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-68.346	0	2.041	0.000	-0.45296	0.000
	Total	538	100.000		4165.4		25572		158.844		2.773

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.654 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.072

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.765 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.470



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

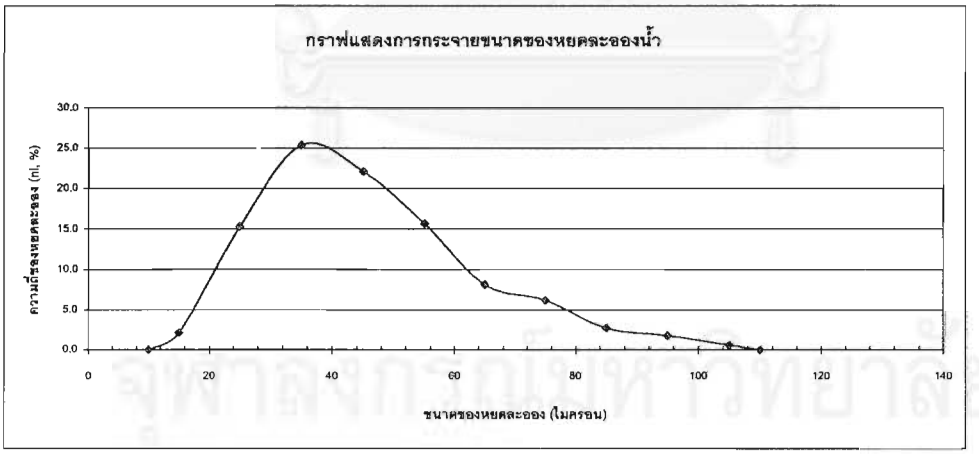
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	36.124	0	1.000	0.000	0.63198	0.000
10 - 20	15	11	2.132	2.132	32.0	31.124	2065	1.176	2.507	0.45589	0.443
20 - 30	25	79	15.310	17.442	382.8	21.124	6832	1.398	21.403	0.23404	0.839
30 - 40	35	131	25.388	42.829	888.6	11.124	3142	1.544	39.200	0.08791	0.196
40 -50	45	114	22.093	64.922	994.2	1.124	28	1.653	36.524	-0.02123	0.010
50 - 60	55	81	15.698	80.620	863.4	-8.876	1237	1.740	27.320	-0.10838	0.184
60 - 70	65	42	8.140	88.760	529.1	-18.876	2900	1.813	14.756	-0.18093	0.266
70 - 80	75	32	6.202	94.961	465.1	-28.876	5171	1.875	11.628	-0.24308	0.366
80 - 90	85	14	2.713	97.674	230.6	-38.876	4101	1.929	5.235	-0.29744	0.240
90 - 100	95	9	1.744	99.419	165.7	-48.876	4167	1.978	3.450	-0.34574	0.208
100 - 110	105	3	0.581	100.000	61.0	-58.876	2015	2.021	1.175	-0.38921	0.088
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-63.876	0	2.041	0.000	-0.40941	0.000
	Total	516	100.000		4612.4		31657		163.198		2.842

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.124 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / \{(\Sigma n_i) - 1\}]^{1/2}$ = 17.882

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.853 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.477



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.15	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

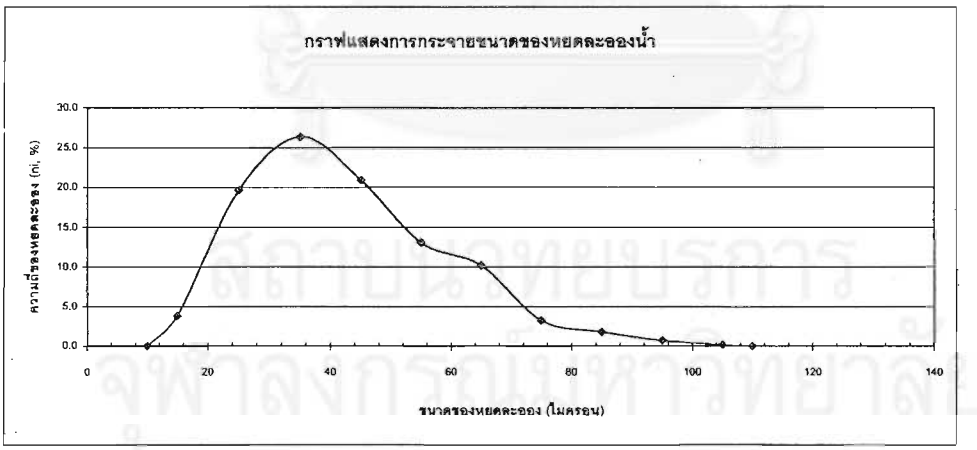
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.818	0	1.000	0.000	0.59908	0.000
10 - 20	15	21	3.818	3.818	57.3	27.818	2955	1.176	4.491	0.42298	0.683
20 - 30	25	108	19.636	23.455	490.9	17.818	6234	1.398	27.450	0.20114	0.794
30 - 40	35	145	26.364	49.818	922.7	7.818	1611	1.544	40.707	0.05501	0.080
40 -50	45	115	20.909	70.727	940.9	-2.182	100	1.653	34.567	-0.05414	0.061
50 - 60	55	72	13.091	83.818	720.0	-12.182	1943	1.740	22.783	-0.14129	0.261
60 - 70	65	56	10.182	94.000	661.8	-22.182	5010	1.813	18.459	-0.21384	0.466
70 - 80	75	18	3.273	97.273	245.5	-32.182	3389	1.875	6.137	-0.27599	0.249
80 - 90	85	10	1.818	99.091	154.5	-42.182	3235	1.929	3.508	-0.33034	0.198
90 - 100	95	4	0.727	99.818	69.1	-52.182	1980	1.978	1.438	-0.37865	0.104
100 - 110	105	1	0.182	100.000	19.1	-62.182	703	2.021	0.367	-0.42211	0.032
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.182	0	2.041	0.000	-0.44232	0.000
	Total	550	100.000		4281.8		27160		159.908		2.930

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.818 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.563

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 39.726 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.486



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียวโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.19	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

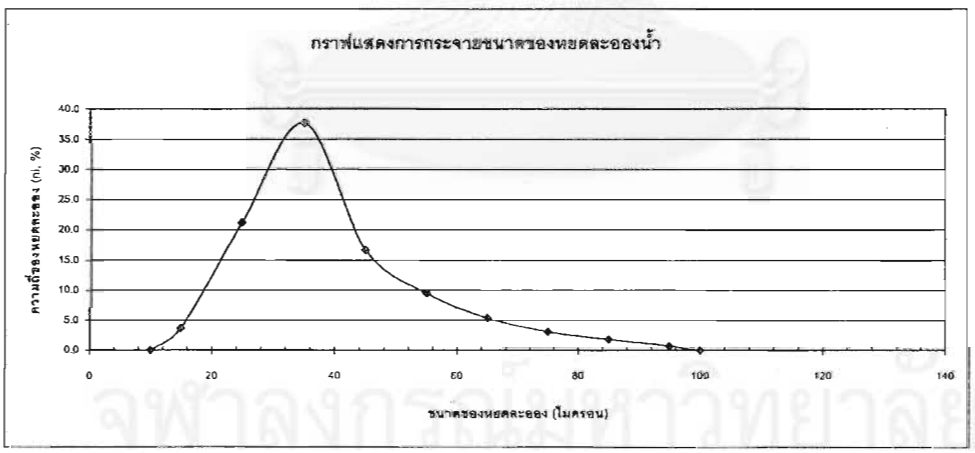
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.963	0	1.000	0.000	0.57163	0.000
10 - 20	15	20	3.717	3.717	55.8	24.963	2317	1.176	4.372	0.39554	0.582
20 - 30	25	114	21.190	24.907	529.7	14.963	4744	1.398	29.622	0.17369	0.639
30 - 40	35	203	37.732	62.639	1320.6	4.963	929	1.544	58.261	0.02756	0.029
40 -50	45	90	16.729	79.368	752.8	-5.037	424	1.653	27.656	-0.08158	0.111
50 - 60	55	51	9.480	88.848	521.4	-15.037	2143	1.740	16.498	-0.16873	0.270
60 - 70	65	29	5.390	94.238	350.4	-25.037	3379	1.813	9.772	-0.24129	0.314
70 - 80	75	17	3.160	97.398	237.0	-35.037	3879	1.875	5.925	-0.30343	0.291
80 - 90	85	10	1.859	99.257	158.0	-45.037	3770	1.929	3.586	-0.35779	0.238
90 - 100	95	4	0.743	100.000	70.6	-55.037	2252	1.978	1.470	-0.40610	0.123
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.037	0	2.000	0.000	-0.42837	0.000
	Total	538	100.000		3996.3		23838		157.163		2.596

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.963 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.517

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.293 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.452



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.19	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

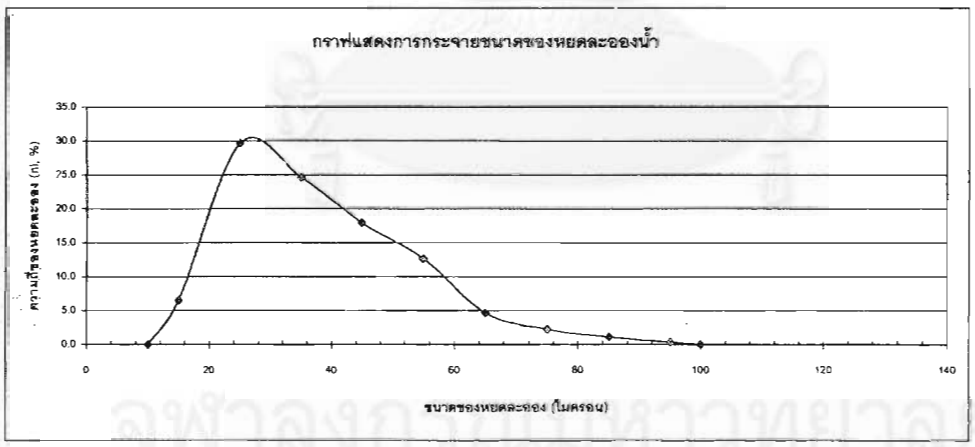
Interval,µm	Micipoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.140	0	1.000	0.000	0.54703	0.000
10 - 20	15	35	6.542	6.542	98.1	23.140	3503	1.176	7.694	0.37094	0.900
20 - 30	25	159	29.720	36.262	743.0	13.140	5132	1.398	41.546	0.14909	0.661
30 - 40	35	132	24.673	60.935	863.6	3.140	243	1.544	38.097	0.00296	0.000
40 -50	45	96	17.944	78.879	807.5	-6.860	844	1.653	29.665	-0.10618	0.202
50 - 60	55	68	12.710	91.589	699.1	-16.860	3613	1.740	22.120	-0.19333	0.475
60 - 70	65	25	4.673	96.262	303.7	-26.860	3371	1.813	8.472	-0.26588	0.330
70 - 80	75	12	2.243	98.505	168.2	-36.860	3047	1.875	4.206	-0.32803	0.241
80 - 90	85	6	1.121	99.626	95.3	-46.860	2463	1.929	2.164	-0.38239	0.164
90 - 100	95	2	0.374	100.000	35.5	-56.860	1709	1.978	0.739	-0.43069	0.069
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.860	0	2.000	0.000	-0.45297	0.000
	Total	535	100.000		3814.0		23425		154.703		3.043

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.140 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i)-1)]^{1/2}$ = 15.362

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.240 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} [\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.497



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 6.19 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

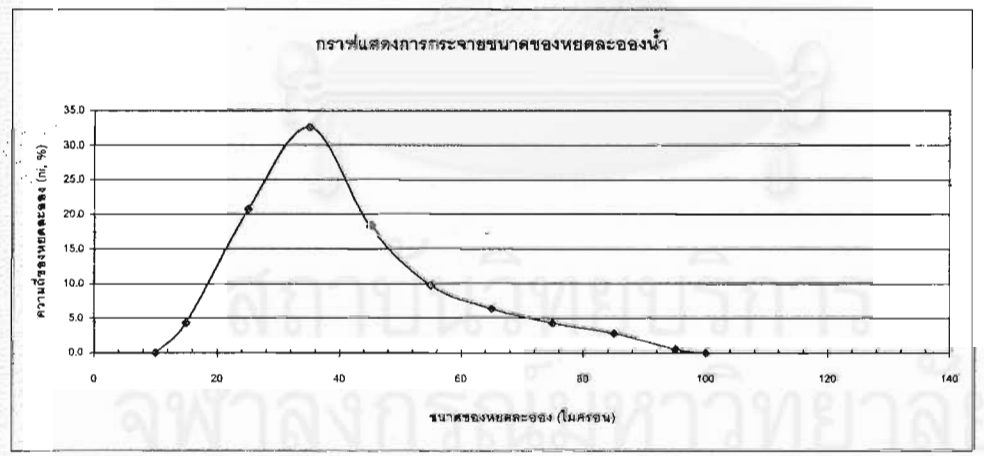
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.264	0	1.000	0.000	0.58198	0.000
10 - 20	15	23	4.340	4.340	65.1	26.264	2993	1.176	5.104	0.40589	0.715
20 - 30	25	110	20.755	25.094	518.9	16.264	5490	1.398	29.014	0.18404	0.703
30 - 40	35	173	32.642	57.736	1142.5	6.264	1281	1.544	50.401	0.03791	0.047
40 -50	45	97	18.302	76.038	823.6	-3.736	255	1.653	30.257	-0.07124	0.093
50 - 60	55	52	9.811	85.849	539.6	-13.736	1851	1.740	17.075	-0.15839	0.246
60 - 70	65	34	6.415	92.264	417.0	-23.736	3614	1.813	11.630	-0.23094	0.342
70 - 80	75	23	4.340	96.604	325.5	-33.736	4939	1.875	8.137	-0.29308	0.373
80 - 90	85	15	2.830	99.434	240.6	-43.736	5414	1.929	5.461	-0.34744	0.342
90 - 100	95	3	0.566	100.000	53.8	-53.736	1634	1.978	1.119	-0.39575	0.089
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-58.736	0	2.000	0.000	-0.41802	0.000
	Total	530	100.000		4126.4		27472		158.198		2.949

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.264 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.658

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.192 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.488



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.19	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

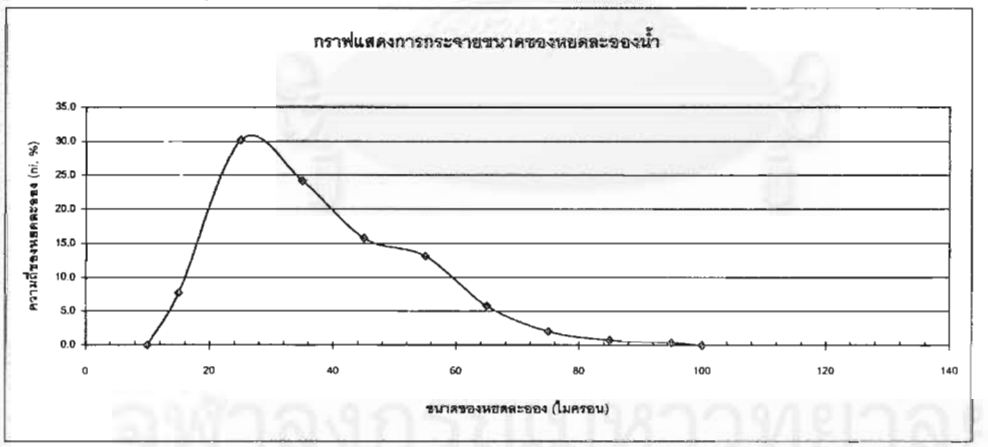
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.814	0	1.000	0.000	0.54159	0.000
10 - 20	15	41	7.692	7.692	115.4	22.814	4004	1.176	9.047	0.36550	1.028
20 - 30	25	161	30.206	37.899	755.2	12.814	4960	1.398	42.227	0.14365	0.623
30 - 40	35	129	24.203	62.101	847.1	2.814	192	1.544	37.371	-0.00248	0.000
40 -50	45	84	15.760	77.861	709.2	-7.186	814	1.653	26.054	-0.11162	0.196
50 - 60	55	70	13.133	90.994	722.3	-17.186	3879	1.740	22.857	-0.19877	0.519
60 - 70	65	31	5.816	96.811	378.0	-27.186	4298	1.813	10.544	-0.27132	0.428
70 - 80	75	11	2.064	98.874	154.8	-37.186	2854	1.875	3.870	-0.33347	0.230
80 - 90	85	4	0.750	99.625	63.8	-47.186	1671	1.929	1.448	-0.38783	0.113
90 - 100	95	2	0.375	100.000	35.6	-57.186	1227	1.978	0.742	-0.43613	0.071
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.186	0	2.000	0.000	-0.45841	0.000
	Total	533	100.000		3781.4		23898		154.159		3.208

Arithmelic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.814 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.537

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} \{\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i\}$ = 34.801 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.514



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.24	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

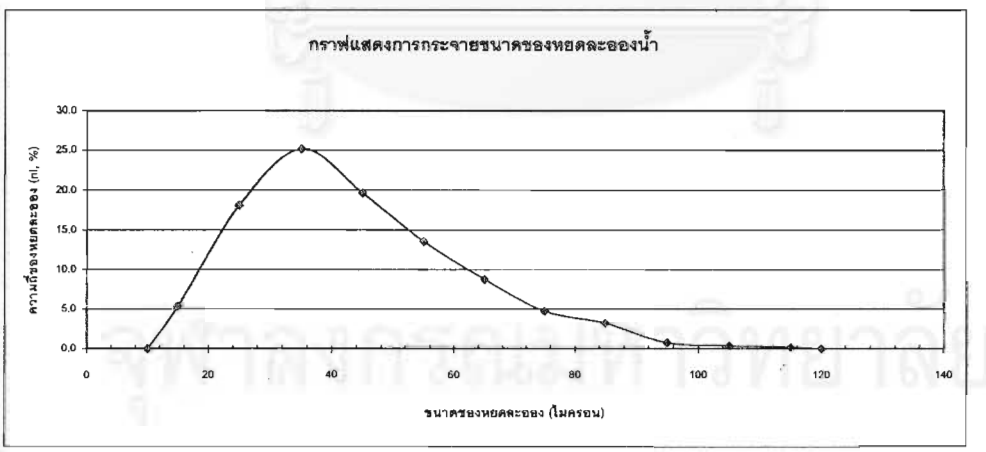
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	33.836	0	1.000	0.000	0.60398	0.000
10 - 20	15	28	5.344	5.344	80.2	28.836	4443	1.176	6.284	0.42788	0.978
20 - 30	25	95	18.130	23.473	453.2	18.836	6432	1.398	25.344	0.20604	0.770
30 - 40	35	132	25.191	48.664	881.7	8.836	1967	1.544	38.896	0.05991	0.090
40 -50	45	103	19.656	68.321	884.5	-1.164	27	1.653	32.496	-0.04924	0.048
50 - 60	55	71	13.550	81.870	745.2	-11.164	1689	1.740	23.581	-0.13639	0.252
60 - 70	65	46	8.779	90.649	570.6	-21.164	3932	1.813	15.915	-0.20894	0.383
70 - 80	75	25	4.771	95.420	357.8	-31.164	4634	1.875	8.946	-0.27109	0.351
80 - 90	85	17	3.244	98.664	275.8	-41.164	5497	1.929	6.260	-0.32544	0.344
90 - 100	95	4	0.763	99.427	72.5	-51.164	1998	1.978	1.510	-0.37375	0.107
100 - 110	105	2	0.382	99.809	40.1	-61.164	1428	2.021	0.771	-0.41721	0.066
110 - 120	115	1	0.191	100.000	21.9	-71.164	966	2.061	0.393	-0.45672	0.040
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-76.164	0	2.079	0.000	-0.47521	0.000
	Total	524	100.000		4383.6		33013		160.398		3.428

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 43.836 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.261

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 40.177 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.535



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 56.49 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 2.24 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

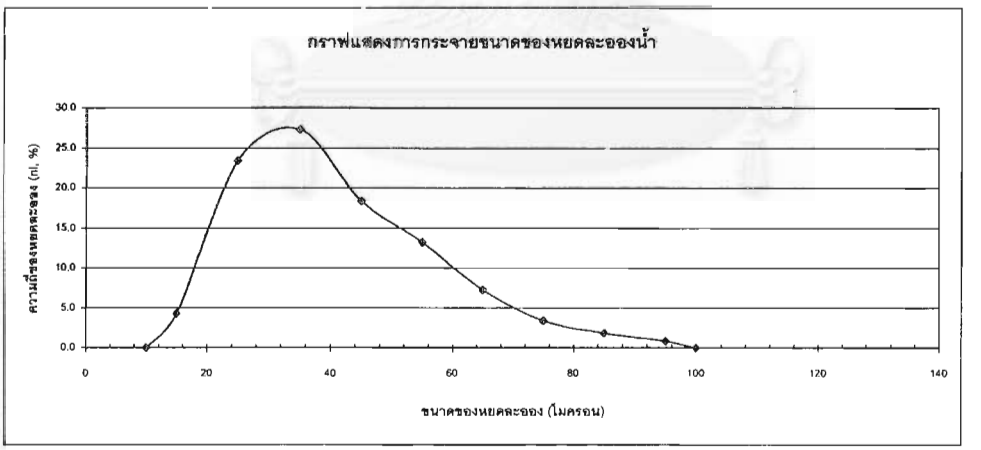
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.282	0	1.000	0.000	0.58196	0.000
10 - 20	15	25	4.244	4.244	63.7	26.282	2932	1.176	4.992	0.40587	0.699
20 - 30	25	138	23.430	27.674	585.7	16.282	6211	1.398	32.753	0.18402	0.793
30 - 40	35	161	27.334	55.008	956.7	6.282	1079	1.544	42.206	0.03790	0.039
40 -50	45	108	18.336	73.345	825.1	-3.718	253	1.653	30.314	-0.07125	0.093
50 - 60	55	78	13.243	86.587	728.4	-13.718	2492	1.740	23.047	-0.15840	0.332
60 - 70	65	43	7.301	93.888	474.5	-23.718	4107	1.813	13.235	-0.23095	0.389
70 - 80	75	20	3.396	97.284	254.7	-33.718	3860	1.875	6.367	-0.29310	0.292
80 - 90	85	11	1.868	99.151	158.7	-43.718	3569	1.929	3.603	-0.34745	0.225
90 - 100	95	5	0.849	100.000	80.0	-53.718	2450	1.978	1.679	-0.39576	0.133
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-58.718	0	2.000	0.000	-0.41804	0.000
	Total	589	100.000		4128.2		26954		158.196		2.997

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.282 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.500

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.191 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.493



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.24	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

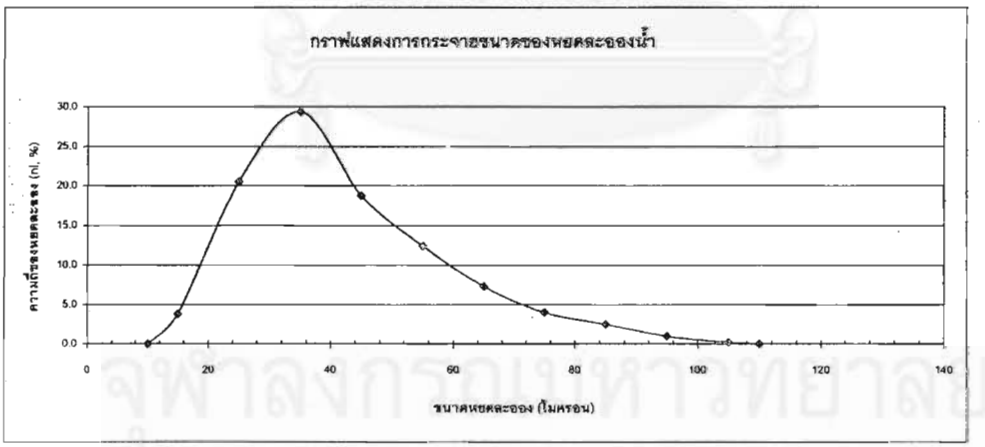
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.313	0	1.000	0.000	0.59259	0.000
10 - 20	15	20	3.839	3.839	57.6	27.313	2864	1.176	4.515	0.41650	0.666
20 - 30	25	107	20.537	24.376	513.4	17.313	6156	1.398	28.710	0.19465	0.778
30 - 40	35	153	29.367	53.743	1027.8	7.313	1570	1.544	45.344	0.04853	0.069
40 -50	45	98	18.810	72.553	846.4	-2.687	136	1.653	31.097	-0.06062	0.069
50 - 60	55	65	12.476	85.029	686.2	-12.687	2008	1.740	21.713	-0.14777	0.272
60 - 70	65	38	7.294	92.322	474.1	-22.687	3754	1.813	13.223	-0.22032	0.354
70 - 80	75	21	4.031	96.353	302.3	-32.687	4307	1.875	7.558	-0.28247	0.322
80 - 90	85	13	2.495	98.848	212.1	-42.687	4547	1.929	4.814	-0.33682	0.283
90 - 100	95	5	0.960	99.808	91.2	-52.687	2664	1.978	1.898	-0.38513	0.142
100 - 110	105	1	0.192	100.000	20.2	-62.687	754	2.021	0.386	-0.42860	0.035
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.687	0	2.041	0.000	-0.44880	0.000
	Total	521	100.000		4231.3		28760		159.259		2.991

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.313 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 17.044

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 39.138 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.492



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	2.24	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

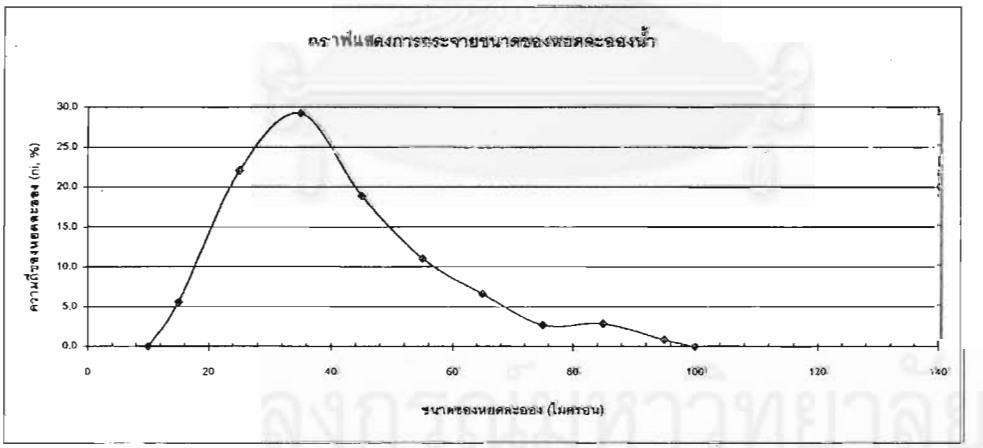
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.799	0	1.000	0.000	0.57508	0.000
10 - 20	15	33	5.612	5.612	84.2	25.799	3736	1.176	6.601	0.39899	0.893
20 - 30	25	130	22.109	27.721	552.7	15.799	5519	1.398	30.907	0.17714	0.694
30 - 40	35	172	29.252	56.973	1023.8	5.799	984	1.544	45.167	0.03101	0.028
40 -50	45	111	18.878	75.850	849.5	-4.201	333	1.653	31.209	-0.07813	0.115
50 - 60	55	65	11.054	86.905	608.0	-14.201	2229	1.740	19.239	-0.16528	0.302
60 - 70	65	39	6.633	93.537	431.1	-24.201	3885	1.813	12.024	-0.23763	0.375
70 - 80	75	16	2.721	96.259	204.1	-34.201	3183	1.875	5.102	-0.29998	0.245
80 - 90	85	17	2.891	99.150	245.7	-44.201	5648	1.929	5.578	-0.35434	0.363
90 - 100	95	5	0.850	100.000	80.8	-54.201	2498	1.978	1.682	-0.40264	0.138
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-59.201	0	2.000	0.000	-0.42492	0.000
	Total	588	100.000		4079.9		28014		157.508		3.153

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.799 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 16.822

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.591 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.508



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

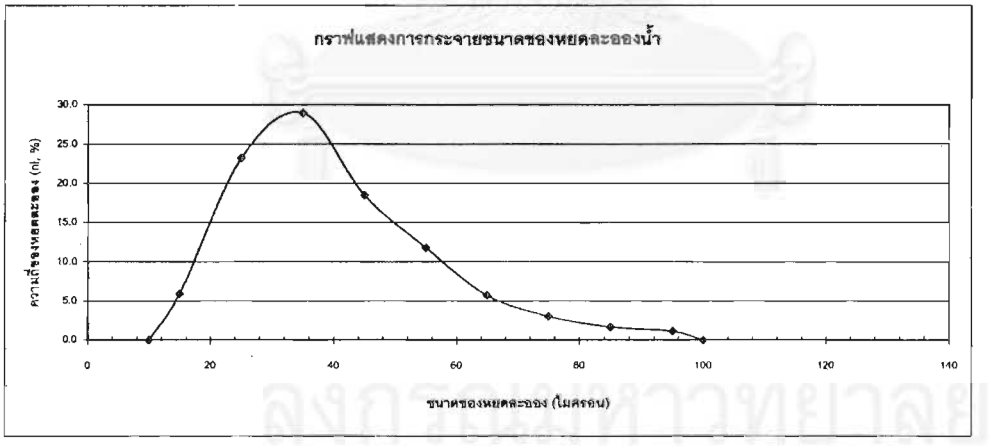
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.181	0	1.000	0.000	0.56874	0.000
10 - 20	15	31	5.905	5.905	88.6	25.181	3744	1.176	6.945	0.39265	0.910
20 - 30	25	122	23.238	29.143	581.0	15.181	5355	1.398	32.485	0.17080	0.678
30 - 40	35	152	28.952	58.095	1013.3	5.181	777	1.544	44.704	0.02467	0.018
40 -50	45	97	18.476	76.571	831.4	-4.819	429	1.653	30.545	-0.08447	0.132
50 - 60	55	62	11.810	88.381	649.5	-14.819	2593	1.740	20.553	-0.17162	0.348
60 - 70	65	30	5.714	94.095	371.4	-24.819	3520	1.813	10.360	-0.24417	0.341
70 - 80	75	16	3.048	97.143	228.6	-34.819	3695	1.875	5.714	-0.30632	0.286
80 - 90	85	9	1.714	98.857	145.7	-44.819	3444	1.929	3.308	-0.36068	0.223
90 - 100	95	6	1.143	100.000	108.6	-54.819	3434	1.978	2.260	-0.40898	0.191
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-59.819	0	2.000	0.000	-0.43126	0.000
	Total	525	100.000		4018.1		26992		156.874		3.126

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.181 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.512

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 37.046 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.506



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

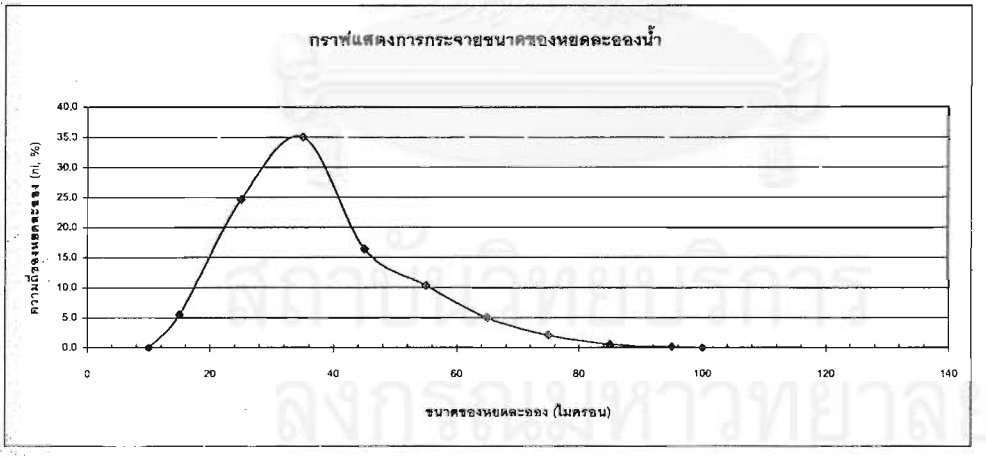
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.880	0	1.000	0.000	0.54933	0.000
10 - 20	15	31	5.546	5.546	83.2	22.880	2903	1.176	6.522	0.37324	0.773
20 - 30	25	138	24.687	30.233	617.2	12.880	4096	1.398	34.511	0.15139	0.566
30 - 40	35	196	35.063	65.295	1227.2	2.880	291	1.544	54.139	0.00526	0.001
40 -50	45	92	16.458	81.753	740.6	-7.120	834	1.653	27.209	-0.10388	0.178
50 - 60	55	58	10.376	92.129	570.7	-17.120	3041	1.740	18.057	-0.19103	0.379
60 - 70	65	28	5.009	97.138	325.6	-27.120	3684	1.813	9.081	-0.26358	0.348
70 - 80	75	12	2.147	99.284	161.0	-37.120	2958	1.875	4.025	-0.32573	0.228
80 - 90	85	3	0.537	99.821	45.6	-47.120	1192	1.929	1.035	-0.38009	0.078
90 - 100	95	1	0.179	100.000	17.0	-57.120	584	1.978	0.354	-0.42839	0.033
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.120	0	2.000	0.000	-0.45067	0.000
	Total	559	100.000		3788.0		19582		154.933		2.582

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.880 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 14.064

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.427 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.450



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

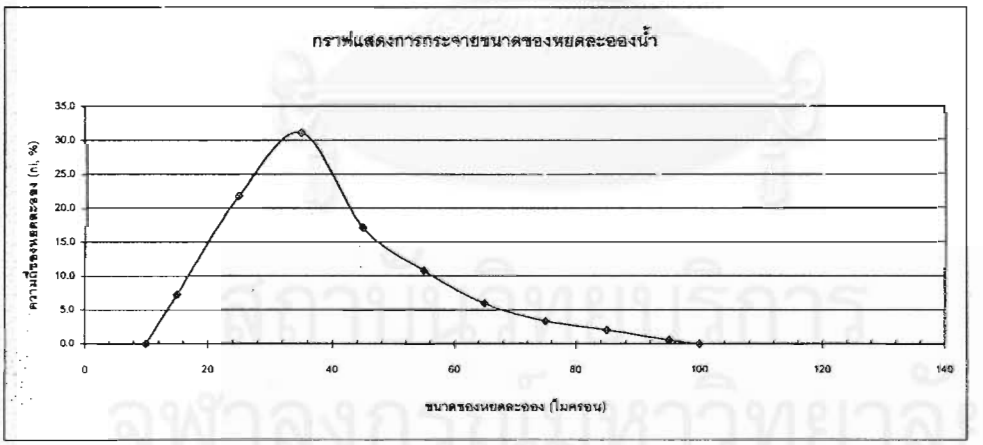
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.730	0	1.000	0.000	0.56284	0.000
10 - 20	15	39	7.263	7.263	108.9	24.730	4442	1.176	8.541	0.38675	1.086
20 - 30	25	117	21.788	29.050	544.7	14.730	4727	1.398	30.458	0.16490	0.592
30 - 40	35	167	31.099	60.149	1088.5	4.730	696	1.544	48.019	0.01877	0.011
40 -50	45	92	17.132	77.281	770.9	-5.270	476	1.653	28.323	-0.09038	0.140
50 - 60	55	58	10.801	88.082	594.0	-15.270	2518	1.740	18.797	-0.17753	0.340
60 - 70	65	32	5.959	94.041	387.3	-25.270	3805	1.813	10.803	-0.25008	0.373
70 - 80	75	18	3.352	97.393	251.4	-35.270	4170	1.875	6.285	-0.31222	0.327
80 - 90	85	11	2.048	99.441	174.1	-45.270	4198	1.929	3.952	-0.36658	0.275
90 - 100	95	3	0.559	100.000	53.1	-55.270	1707	1.978	1.105	-0.41489	0.096
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.270	0	2.000	0.000	-0.43716	0.000
	Total	537	100.000		3973.0		26739		156.284		3.241

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.730 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]^{1/2}$ = 16.434

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} [\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i]$ = 36.546 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} [\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.517



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.08	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

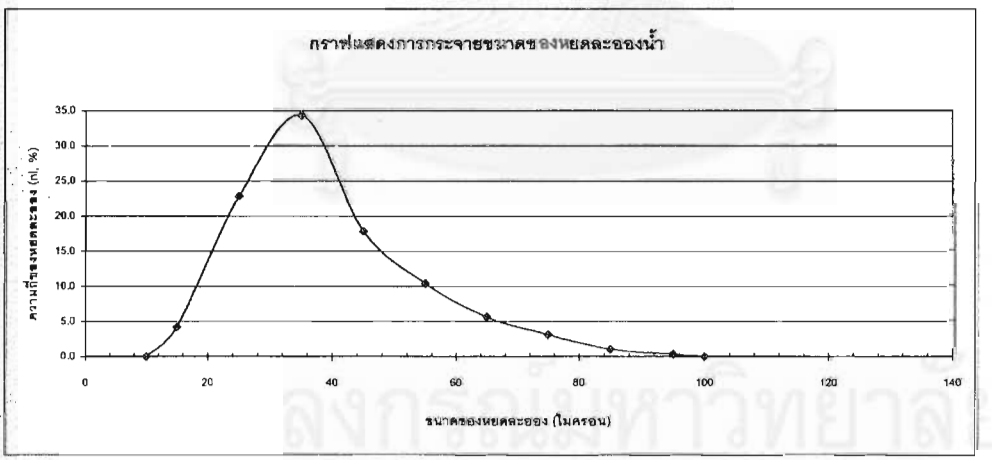
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.460	0	1.000	0.000	0.56648	0.000
10 - 20	15	24	4.248	4.248	63.7	24.460	2541	1.176	4.996	0.39039	0.647
20 - 30	25	129	22.832	27.080	570.8	14.460	4774	1.398	31.918	0.16854	0.649
30 - 40	35	194	34.336	61.416	1201.8	4.460	683	1.544	53.018	0.02241	0.017
40 -50	45	101	17.876	79.292	804.4	-5.540	549	1.653	29.553	-0.08673	0.134
50 - 60	55	59	10.442	89.735	574.3	-15.540	2522	1.740	18.174	-0.17388	0.316
60 - 70	65	32	5.664	95.398	368.1	-25.540	3694	1.813	10.268	-0.24643	0.344
70 - 80	75	18	3.186	98.584	238.9	-35.540	4024	1.875	5.974	-0.30858	0.303
80 - 90	85	6	1.062	99.646	90.3	-45.540	2202	1.929	2.049	-0.36294	0.140
90 - 100	95	2	0.354	100.000	33.6	-55.540	1092	1.978	0.700	-0.41124	0.060
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.540	0	2.000	0.000	-0.43352	0.000
	Total	565	100.000		3946.0		22081		156.648		2.610

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.460 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.935

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.854 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.453



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.27	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

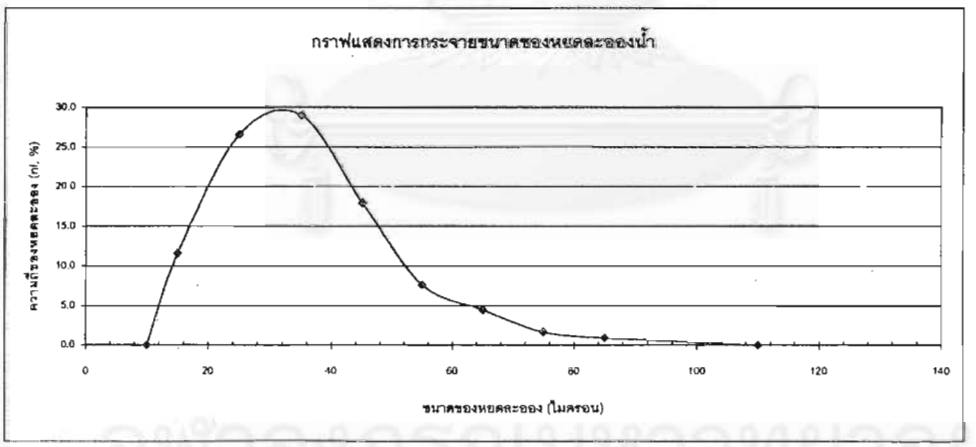
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	25.843	0	1.000	0.000	0.51845	0.000
10 - 20	15	62	11.610	11.610	174.2	20.843	5044	1.176	13.655	0.34236	1.361
20 - 30	25	142	26.592	38.202	664.8	10.843	3126	1.398	37.174	0.12051	0.386
30 - 40	35	155	29.026	67.228	1015.9	0.843	21	1.544	44.818	-0.02562	0.019
40 -50	45	96	17.978	85.206	809.0	-9.157	1508	1.653	29.721	-0.13476	0.326
50 - 60	55	41	7.678	92.884	422.3	-19.157	2818	1.740	13.362	-0.22191	0.378
60 - 70	65	24	4.494	97.378	292.1	-29.157	3821	1.813	8.148	-0.29446	0.390
70 - 80	75	9	1.685	99.064	126.4	-39.157	2584	1.875	3.160	-0.35661	0.214
80 - 90	85	5	0.936	100.000	79.6	-49.157	2263	1.929	1.807	-0.41097	0.158
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-74.157	0	2.041	0.000	-0.52294	0.000
	Total	534	100.000		3584.3		21184		151.845		3.233

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 35.843 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]^{1/2}$ = 14.628

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 32.995 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.516



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.27	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

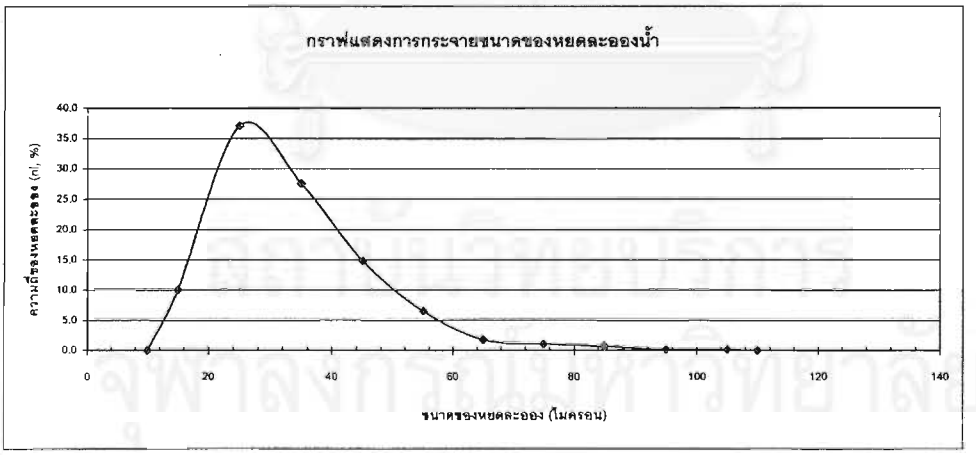
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	23.604	0	1.000	0.000	0.49441	0.000
10 - 20	15	57	10.071	10.071	151.1	18.604	3486	1.176	11.844	0.31832	1.020
20 - 30	25	210	37.102	47.173	927.6	8.604	2747	1.398	51.867	0.09647	0.345
30 - 40	35	156	27.562	74.735	964.7	-1.396	54	1.544	42.557	-0.04965	0.068
40 -50	45	84	14.841	89.576	667.8	-11.396	1927	1.653	24.535	-0.15880	0.374
50 - 60	55	37	6.537	96.113	359.5	-21.396	2993	1.740	11.377	-0.24595	0.395
60 - 70	65	10	1.767	97.880	114.8	-31.396	1742	1.813	3.203	-0.31850	0.179
70 - 80	75	6	1.060	98.940	79.5	-41.396	1817	1.875	1.988	-0.38065	0.154
80 - 90	85	4	0.707	99.647	60.1	-51.396	1867	1.929	1.364	-0.43500	0.134
90 - 100	95	1	0.177	99.823	16.8	-61.396	666	1.978	0.349	-0.48331	0.041
100 - 110	105	1	0.177	100.000	18.6	-71.396	901	2.021	0.357	-0.52677	0.049
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-76.396	0	2.041	0.000	-0.54698	0.000
	Total	566	100.000		3360.4		18197		149.441		2.760

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.604 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.558

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.219 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_T - 1)\}$ = 1.469



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.27	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

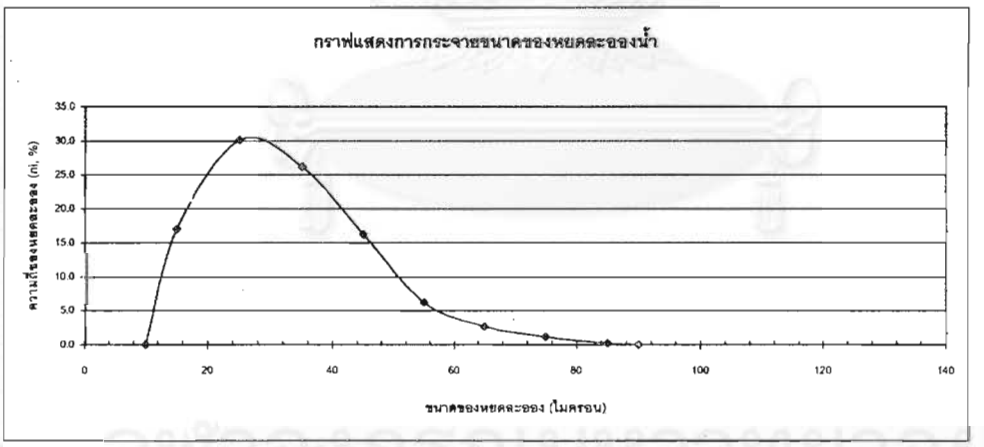
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	%Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	22.847	0	1.000	0.000	0.47941	0.000
10 - 20	15	87	17.025	17.025	255.4	17.847	5423	1.176	20.023	0.30332	1.566
20 - 30	25	154	30.137	47.162	753.4	7.847	1856	1.398	42.130	0.08147	0.200
30 - 40	35	134	26.223	73.386	917.8	-2.153	122	1.544	40.490	-0.06466	0.110
40 -50	45	83	16.243	89.628	730.9	-12.153	2399	1.653	26.853	-0.17381	0.491
50 - 60	55	32	6.262	95.890	344.4	-22.153	3073	1.740	10.899	-0.26096	0.426
60 - 70	65	14	2.740	98.630	178.1	-32.153	2832	1.813	4.967	-0.33351	0.305
70 - 80	75	6	1.174	99.804	88.1	-42.153	2086	1.875	2.202	-0.39565	0.184
80 - 90	85	1	0.196	100.000	16.6	-52.153	532	1.929	0.378	-0.45001	0.040
> 90	90	0	0.000	100.000	0.0	-57.153	0	1.954	0.000	-0.47484	0.000
	Total	511	100.000		3284.7		18323		147.941		3.321

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.847 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 13.605

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 30.158 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.525



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	56.49	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	6.27	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

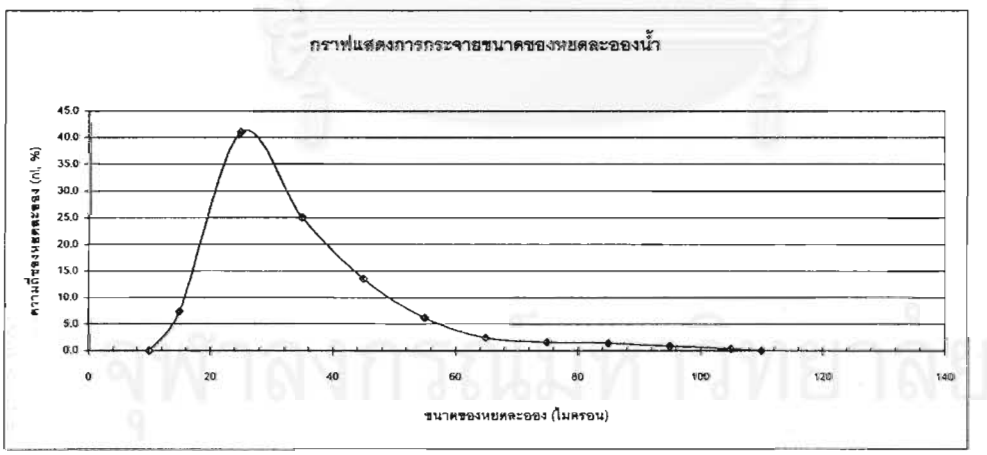
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	24.876	0	1.000	0.000	0.50673	0.000
10 - 20	15	42	7.420	7.420	111.3	19.876	2932	1.176	8.727	0.33064	0.811
20 - 30	25	232	40.989	48.410	1024.7	9.876	3998	1.398	57.301	0.10879	0.485
30 - 40	35	142	25.088	73.498	878.1	-0.124	0	1.544	38.738	-0.03734	0.035
40 -50	45	77	13.604	87.102	612.2	-10.124	1394	1.653	22.491	-0.14648	0.292
50 - 60	55	35	6.184	93.286	340.1	-20.124	2504	1.740	10.762	-0.23363	0.338
60 - 70	65	14	2.473	95.760	160.8	-30.124	2245	1.813	4.484	-0.30618	0.232
70 - 80	75	9	1.590	97.350	119.3	-40.124	2560	1.875	2.982	-0.36833	0.216
80 - 90	85	8	1.413	98.763	120.1	-50.124	3551	1.929	2.727	-0.42269	0.253
90 - 100	95	5	0.883	99.647	83.9	-60.124	3193	1.978	1.747	-0.47100	0.156
100 - 110	105	2	0.353	100.000	37.1	-70.124	1738	2.021	0.714	-0.51446	0.094
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-75.124	0	2.041	0.000	-0.53466	0.000
	Total	566	100.000		3487.6		24115		150.673		2.950

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.876 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 15.607

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 32.117 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.468



อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

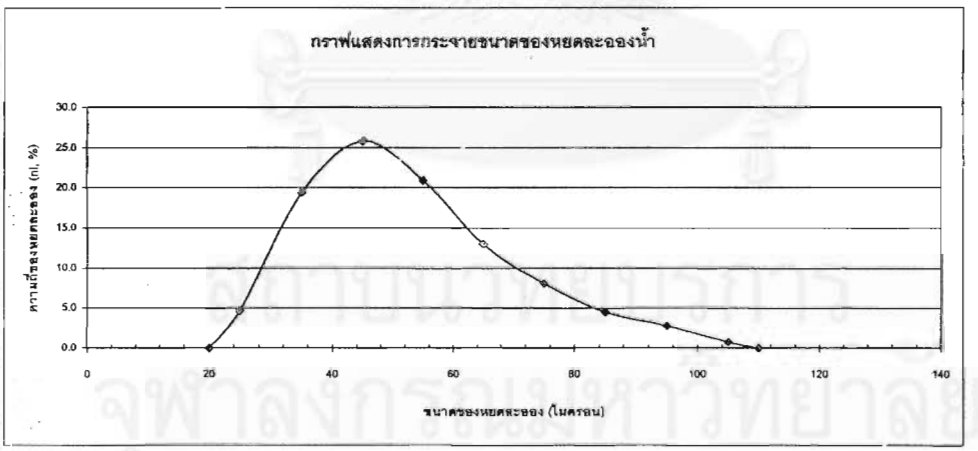
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$[\log d_{mean} - \log d_i]^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.910	0	1.301	0.000	0.40035	0.000
20 - 30	25	25	4.708	4.708	117.7	27.910	3667	1.398	6.582	0.30344	0.434
30 - 40	35	103	19.397	24.105	678.9	17.910	6222	1.544	29.951	0.15731	0.480
40 -50	45	137	25.800	49.906	1161.0	7.910	1614	1.653	42.654	0.04817	0.060
50 - 60	55	111	20.904	70.810	1149.7	-2.090	91	1.740	36.380	-0.03898	0.032
60 - 70	65	69	12.994	83.804	844.6	-12.090	1899	1.813	23.558	-0.11153	0.162
70 - 80	75	43	8.098	91.902	607.3	-22.090	3952	1.875	15.184	-0.17368	0.244
80 - 90	85	24	4.520	96.422	384.2	-32.090	4654	1.929	8.721	-0.22804	0.235
90 - 100	95	15	2.825	99.247	268.4	-42.090	5005	1.978	5.587	-0.27634	0.216
100 - 110	105	4	0.753	100.000	79.1	-52.090	2044	2.021	1.523	-0.31981	0.077
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-57.090	0	2.041	0.000	-0.34001	0.000
	Total	531	100.000		5291.0		29149		170.138		1.939

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 52.910 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.159

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 50.278 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.380



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

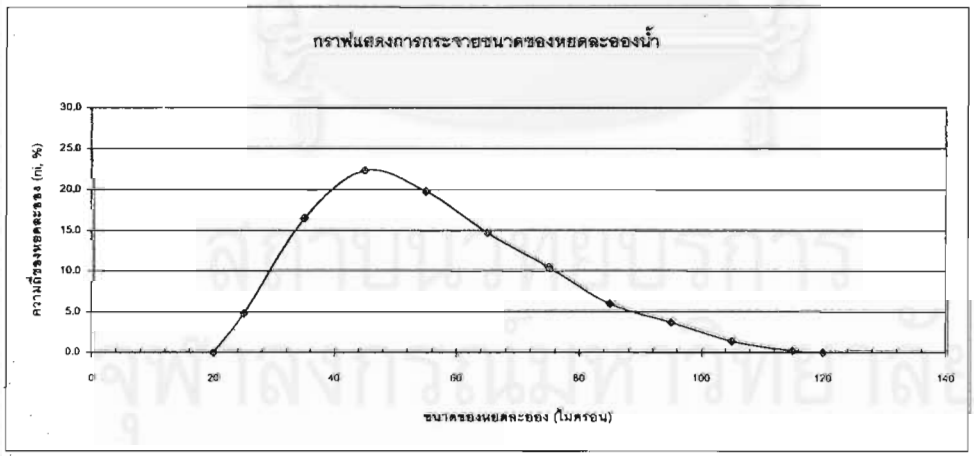
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	35.660	0	1.301	0.000	0.42026	0.000
20 - 30	25	25	4.854	4.854	121.4	30.660	4563	1.398	6.786	0.32335	0.508
30 - 40	35	85	16.505	21.359	577.7	20.660	7045	1.544	25.485	0.17722	0.518
40 -50	45	115	22.330	43.689	1004.9	10.660	2538	1.653	36.916	0.06808	0.103
50 - 60	55	102	19.806	63.495	1089.3	0.660	9	1.740	34.469	-0.01907	0.007
60 - 70	65	76	14.757	78.252	959.2	-9.340	1287	1.813	26.754	-0.09163	0.124
70 - 80	75	54	10.485	88.738	786.4	-19.340	3922	1.875	19.661	-0.15377	0.248
80 - 90	85	31	6.019	94.757	511.7	-29.340	5182	1.929	11.614	-0.20813	0.261
90 - 100	95	19	3.689	98.447	350.5	-39.340	5710	1.978	7.296	-0.25644	0.243
100 - 110	105	7	1.359	99.806	142.7	-49.340	3309	2.021	2.747	-0.29990	0.122
110 - 120	115	1	0.194	100.000	22.3	-59.340	684	2.061	0.400	-0.33941	0.022
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-64.340	0	2.079	0.000	-0.35789	0.000
	Total	515	100.000		5566.0		34248		172.129		2.156

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 55.660 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.599

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 52.637 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.405



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

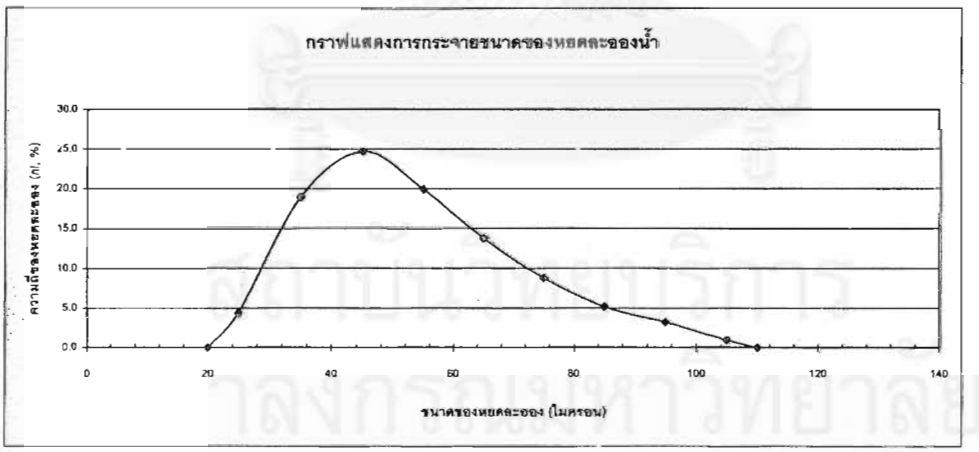
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.889	0	1.301	0.000	0.40756	0.000
20 - 30	25	23	4.406	4.406	110.2	28.889	3677	1.398	6.160	0.31065	0.425
30 - 40	35	99	18.966	23.372	663.8	18.889	6767	1.544	29.284	0.16452	0.513
40 -50	45	129	24.713	48.084	1112.1	8.889	1953	1.653	40.855	0.05537	0.076
50 - 60	55	104	19.923	68.008	1095.8	-1.111	25	1.740	34.674	-0.03178	0.020
60 - 70	65	72	13.793	81.801	896.6	-11.111	1703	1.813	25.006	-0.10433	0.150
70 - 80	75	46	8.812	90.613	660.9	-21.111	3927	1.875	16.524	-0.16648	0.244
80 - 90	85	27	5.172	95.785	439.7	-31.111	5006	1.929	9.980	-0.22083	0.252
90 - 100	95	17	3.257	99.042	309.4	-41.111	5504	1.978	6.441	-0.26914	0.236
100 - 110	105	5	0.958	100.000	100.6	-51.111	2502	2.021	1.936	-0.31260	0.094
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-56.111	0	2.041	0.000	-0.33281	0.000
	Total	522	100.000		5388.9		31064		170.859		2.011

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 53.889 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.714

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.119 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.388



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

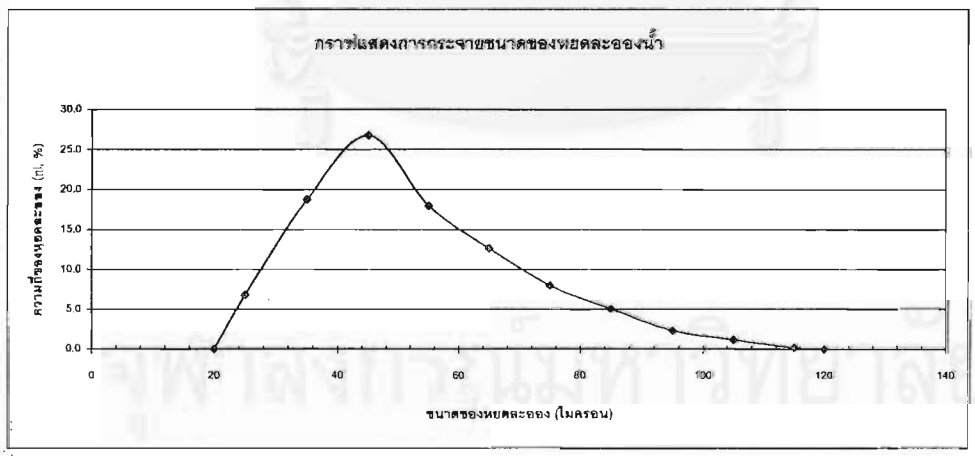
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.554	0	1.301	0.000	0.39479	0.000
20 - 30	25	35	6.849	6.849	171.2	27.554	5200	1.398	9.575	0.29788	0.608
30 - 40	35	96	18.787	25.636	657.5	17.554	5789	1.544	29.008	0.15175	0.433
40 -50	45	137	26.810	52.446	1206.5	7.554	1530	1.653	44.323	0.04261	0.049
50 - 60	55	92	18.004	70.450	990.2	-2.446	108	1.740	31.333	-0.04454	0.036
60 - 70	65	65	12.720	83.170	826.8	-12.446	1970	1.813	23.061	-0.11709	0.174
70 - 80	75	41	8.023	91.194	601.8	-22.446	4042	1.875	15.045	-0.17924	0.258
80 - 90	85	26	5.088	96.282	432.5	-32.446	5356	1.929	9.817	-0.23360	0.278
90 - 100	95	12	2.348	98.630	223.1	-42.446	4231	1.978	4.644	-0.28190	0.187
100 - 110	105	6	1.174	99.804	123.3	-52.446	3230	2.021	2.373	-0.32537	0.124
110 - 120	115	1	0.196	100.000	22.5	-62.446	763	2.061	0.403	-0.36488	0.026
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-67.446	0	2.079	0.000	-0.38336	0.000
	Total	511	100.000		5255.4		32220		169.582		2.172

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 52.554 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 18.040

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.639 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.406



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.085	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

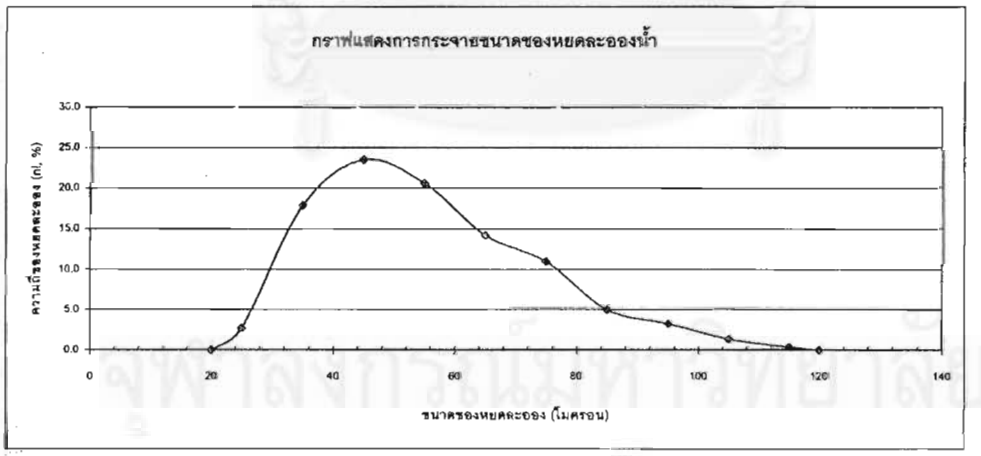
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	35.597	0	1.301	0.000	0.42184	0.000
20 - 30	25	14	2.697	2.697	67.4	30.597	2525	1.398	3.771	0.32493	0.285
30 - 40	35	93	17.919	20.617	627.2	20.597	7602	1.544	27.668	0.17880	0.573
40 -50	45	122	23.507	44.123	1057.8	10.597	2640	1.653	38.862	0.06966	0.114
50 - 60	55	107	20.617	64.740	1133.9	0.597	7	1.740	35.880	-0.01749	0.006
60 - 70	65	74	14.258	78.998	926.8	-9.403	1261	1.813	25.849	-0.09004	0.116
70 - 80	75	57	10.983	89.981	823.7	-19.403	4135	1.875	20.593	-0.15219	0.254
80 - 90	85	26	5.010	94.990	425.8	-29.403	4331	1.929	9.666	-0.20655	0.214
90 - 100	95	17	3.276	98.266	311.2	-39.403	5085	1.978	6.478	-0.25485	0.213
100 - 110	105	7	1.349	99.615	141.6	-49.403	3292	2.021	2.726	-0.29832	0.120
110 - 120	115	2	0.385	100.000	44.3	-59.403	1360	2.061	0.794	-0.33783	0.044
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-64.403	0	2.079	0.000	-0.35631	0.000
	Total	519	100.000		5559.7		32238		172.287		1.939

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 55.597 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.045

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 52.829 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.380



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.085	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

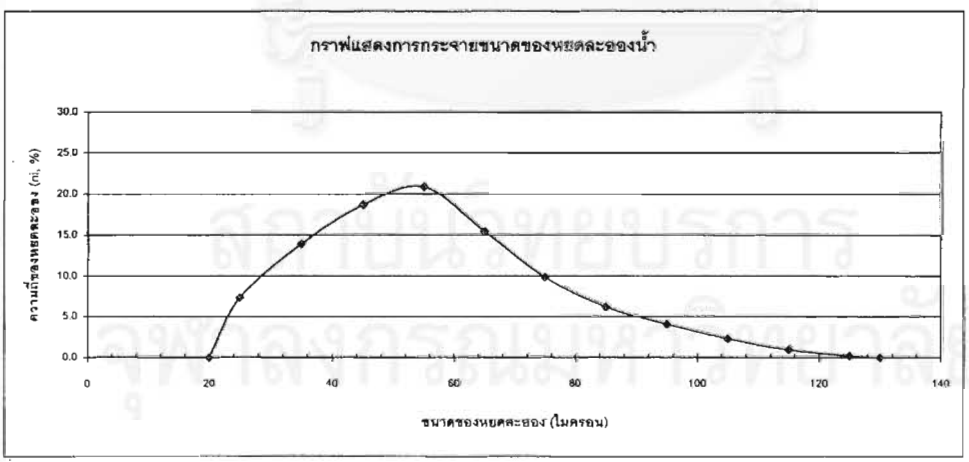
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	37.012	0	1.301	0.000	0.42664	0.000
20 - 30	25	38	7.350	7.350	183.8	32.012	7532	1.398	10.275	0.32973	0.799
30 - 40	35	72	13.926	21.277	487.4	22.012	6748	1.544	21.503	0.18360	0.469
40 -50	45	97	18.762	40.039	844.3	12.012	2707	1.653	31.018	0.07446	0.104
50 - 60	55	108	20.890	60.928	1148.9	2.012	85	1.740	36.356	-0.01269	0.003
60 - 70	65	80	15.474	76.402	1005.8	-7.988	987	1.813	28.053	-0.08524	0.112
70 - 80	75	51	9.865	86.267	739.8	-17.988	3192	1.875	18.497	-0.14739	0.214
80 - 90	85	32	6.190	92.456	526.1	-27.988	4849	1.929	11.942	-0.20175	0.252
90 - 100	95	21	4.062	96.518	385.9	-37.988	5862	1.978	8.033	-0.25005	0.254
100 - 110	105	12	2.321	98.839	243.7	-47.988	5345	2.021	4.691	-0.29352	0.200
110 - 120	115	5	0.967	99.807	111.2	-57.988	3252	2.061	1.993	-0.33303	0.107
120 - 130	125	1	0.193	100.000	24.2	-67.988	894	2.097	0.406	-0.36924	0.026
> 130	130	0	0.000	100.000	0.0	-72.988	0	2.114	0.000	-0.38627	0.000
	Total	517	100.000		5701.2		41452		172.767		2.542

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 57.012 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 20.462

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 53.416 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.446



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.085	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

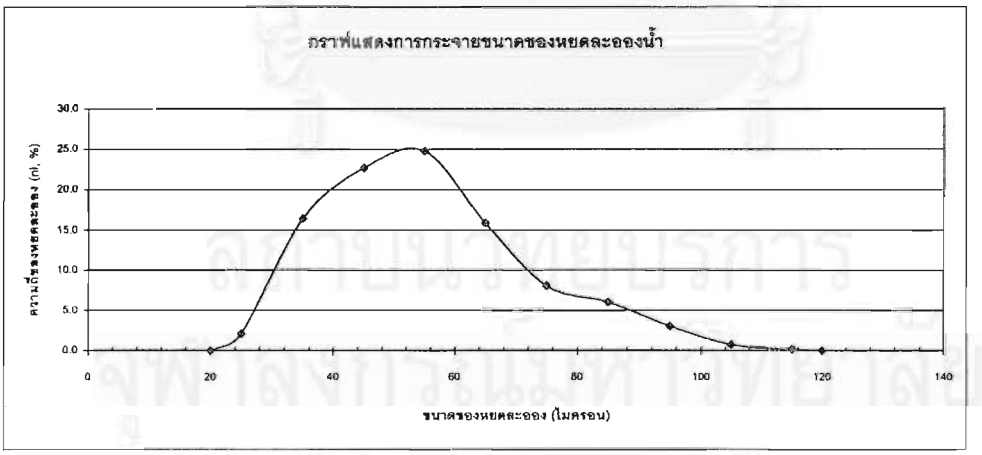
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	35.548	0	1.301	0.000	0.42397	0.000
20 - 30	25	11	2.079	2.079	52.0	30.548	1940	1.398	2.907	0.32706	0.222
30 - 40	35	87	16.446	18.526	575.6	20.548	6944	1.544	25.394	0.18094	0.538
40 -50	45	120	22.684	41.210	1020.8	10.548	2524	1.653	37.502	0.07179	0.117
50 - 60	55	131	24.764	65.974	1362.0	0.548	7	1.740	43.098	-0.01536	0.006
60 - 70	65	84	15.879	81.853	1032.1	-9.452	1419	1.813	28.787	-0.08791	0.123
70 - 80	75	43	8.129	89.981	609.6	-19.452	3076	1.875	15.242	-0.15006	0.183
80 - 90	85	32	6.049	96.030	514.2	-29.452	5247	1.929	11.671	-0.20442	0.253
90 - 100	95	16	3.025	99.055	287.3	-39.452	4708	1.978	5.982	-0.25272	0.193
100 - 110	105	4	0.756	99.811	79.4	-49.452	1849	2.021	1.528	-0.29619	0.066
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-59.452	668	2.061	0.390	-0.33569	0.021
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-64.452	0	2.079	0.000	-0.35418	0.000
	Total	529	100.000		5554.8		28382		172.500		1.723

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 55.548 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\{\Sigma n_i\} - 1)\}^{1/2}$ = 16.932

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 53.089 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.355



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.085	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

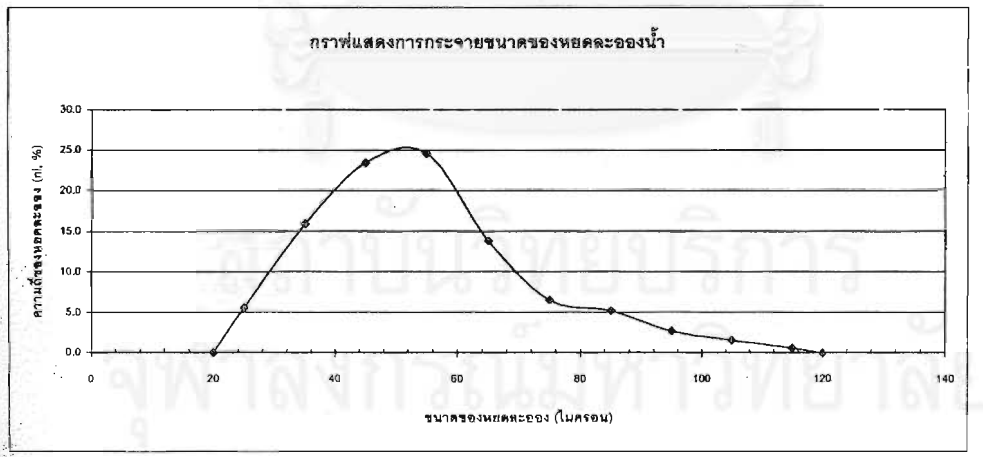
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	34.231	0	1.301	0.000	0.40969	0.000
20 - 30	25	29	5.577	5.577	139.4	29.231	4765	1.398	7.796	0.31278	0.546
30 - 40	35	83	15.962	21.538	558.7	19.231	5903	1.544	24.646	0.16665	0.443
40 -50	45	122	23.462	45.000	1055.8	9.231	1999	1.653	38.787	0.05750	0.078
50. - 60	55	128	24.615	69.615	1353.8	-0.769	15	1.740	42.840	-0.02965	0.022
60 - 70	65	72	13.846	83.462	900.0	-10.769	1606	1.813	25.102	-0.10220	0.145
70 - 80	75	34	6.538	90.000	490.4	-20.769	2820	1.875	12.260	-0.16435	0.177
80 - 90	85	27	5.192	95.192	441.3	-30.769	4916	1.929	10.018	-0.21870	0.248
90 - 100	95	14	2.692	97.885	255.8	-40.769	4475	1.978	5.325	-0.26701	0.192
100 - 110	105	8	1.538	99.423	161.5	-50.769	3965	2.021	3.110	-0.31047	0.148
110 - 120	115	3	0.577	100.000	66.3	-60.769	2131	2.061	1.189	-0.34998	0.071
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-65.769	0	2.079	0.000	-0.36847	0.000
	Total	520	100.000		5423.1		32595		171.072		2.069

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 54.231 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.145

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.371 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.395



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.146	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

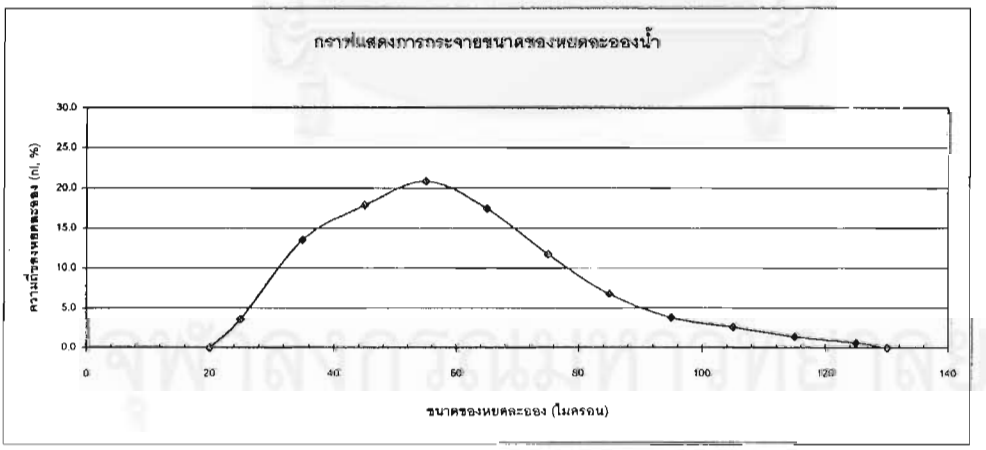
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	39.603	0	1.301	0.000	0.44901	0.000
20 - 30	25	18	3.571	3.571	89.3	34.603	4276	1.398	4.993	0.35210	0.443
30 - 40	35	68	13.492	17.063	472.2	24.603	8167	1.544	20.833	0.20597	0.572
40 - 50	45	90	17.857	34.921	803.6	14.603	3808	1.653	29.522	0.09683	0.167
50 - 60	55	105	20.833	55.754	1145.8	4.603	441	1.740	36.258	0.00968	0.002
60 - 70	65	88	17.460	73.214	1134.9	-5.397	509	1.813	31.654	-0.06287	0.069
70 - 80	75	59	11.706	84.921	878.0	-15.397	2775	1.875	21.950	-0.12502	0.183
80 - 90	85	34	6.746	91.667	573.4	-25.397	4351	1.929	13.016	-0.17938	0.217
90 - 100	95	19	3.770	95.437	358.1	-35.397	4723	1.978	7.456	-0.22768	0.195
100 - 110	105	13	2.579	98.016	270.8	-45.397	5316	2.021	5.213	-0.27115	0.190
110 - 120	115	7	1.389	99.405	159.7	-55.397	4262	2.061	2.862	-0.31066	0.134
120 - 130	125	3	0.595	100.000	74.4	-65.397	2546	2.097	1.248	-0.34687	0.072
> 130	130	0	0.000	100.000	0.0	-70.397	0	2.114	0.000	-0.36390	0.000
	Total	504	100.000		5960.3		41175		175.004		2.244

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 59.603 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 20.394

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 56.239 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.414



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.146	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

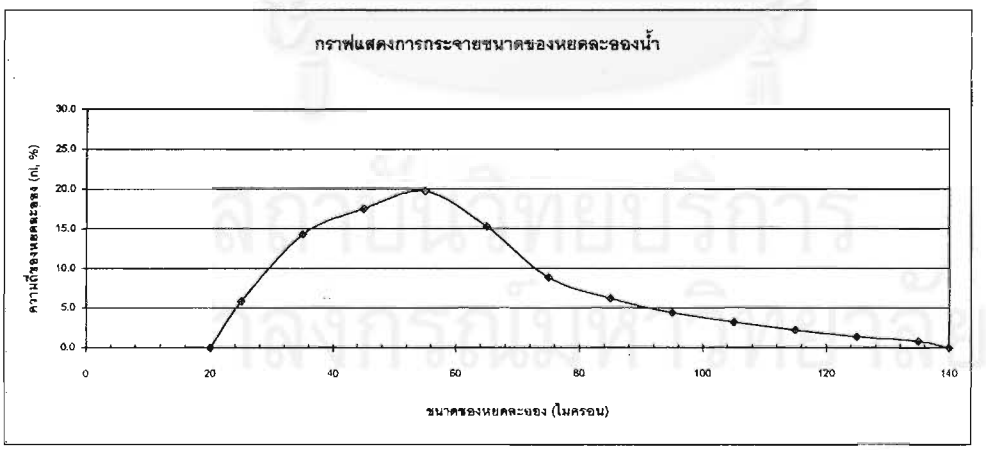
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	40.161	0	1.301	0.000	0.44568	0.000
20 - 30	25	29	5.847	5.847	146.2	35.161	7228	1.398	8.173	0.34877	0.711
30 - 40	35	71	14.315	20.161	501.0	25.161	9062	1.544	22.103	0.20264	0.588
40 -50	45	87	17.540	37.702	789.3	15.161	4032	1.653	28.998	0.09349	0.153
50 - 60	55	98	19.758	57.460	1086.7	5.161	526	1.740	34.386	0.00634	0.001
60 - 70	65	76	15.323	72.782	996.0	-4.839	359	1.813	27.779	-0.06621	0.067
70 - 80	75	44	8.871	81.653	665.3	-14.839	1953	1.875	16.634	-0.12835	0.146
80 - 90	85	31	6.250	87.903	531.3	-24.839	3856	1.929	12.059	-0.18271	0.209
90 - 100	95	22	4.435	92.339	421.4	-34.839	5384	1.978	8.772	-0.23102	0.237
100 - 110	105	16	3.226	95.565	338.7	-44.839	6486	2.021	6.520	-0.27448	0.243
110 - 120	115	11	2.218	97.782	255.0	-54.839	6669	2.061	4.570	-0.31399	0.219
120 - 130	125	7	1.411	99.194	176.4	-64.839	5933	2.097	2.959	-0.35020	0.173
130 - 140	135	4	0.806	100.000	108.9	-74.839	4517	2.130	1.718	-0.38363	0.119
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-79.839	0	2.146	0.000	-0.39942	0.000
	Total	496	100.000		6016.1		56005		174.671		2.865

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 60.161 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 23.785

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 55.809 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.480



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.146 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

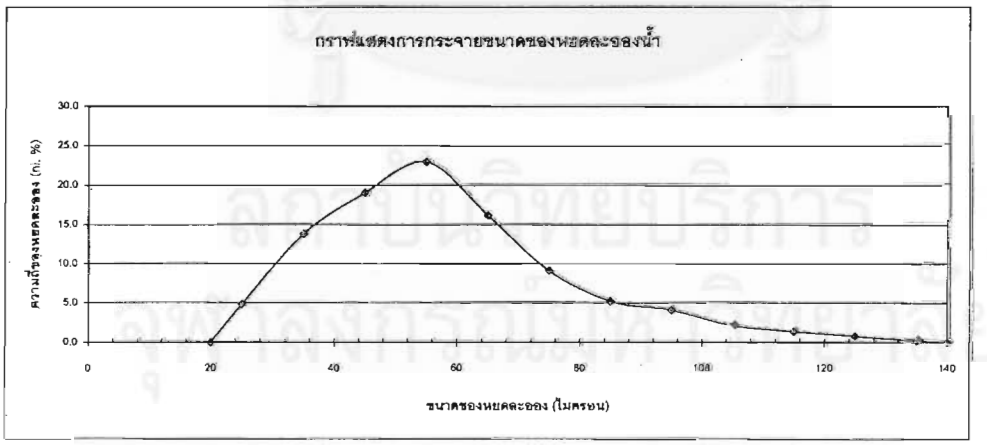
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	38.119	0	1.301	0.000	0.43651	0.000
20 - 30	25	25	4.873	4.873	121.8	33.119	5345	1.398	6.813	0.33960	0.562
30 - 40	35	71	13.840	18.713	484.4	23.119	7397	1.544	21.370	0.19347	0.518
40 - 50	45	98	19.103	37.817	859.6	13.119	3288	1.653	31.582	0.08433	0.136
50 - 60	55	118	23.002	60.819	1265.1	3.119	224	1.740	40.032	-0.00282	0.000
60 - 70	65	83	16.179	76.998	1051.7	-6.881	766	1.813	29.332	-0.07538	0.092
70 - 80	75	47	9.162	86.160	687.1	-16.881	2611	1.875	17.179	-0.13752	0.173
80 - 90	85	27	5.263	91.423	447.4	-26.881	3803	1.929	10.155	-0.19188	0.194
90 - 100	95	21	4.094	95.517	388.9	-36.881	5568	1.978	8.096	-0.24019	0.236
100 - 110	105	11	2.144	97.661	225.1	-46.881	4713	2.021	4.334	-0.28365	0.173
110 - 120	115	7	1.365	99.025	156.9	-56.881	4415	2.061	2.812	-0.32316	0.143
120 - 130	125	4	0.780	99.805	97.5	-66.881	3488	2.097	1.635	-0.35937	0.101
130 - 140	135	1	0.195	100.000	26.3	-76.881	1152	2.130	0.415	-0.39280	0.030
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-81.881	0	2.146	0.000	-0.40859	0.000
	Total	513	100.000		5811.9		42770		173.754		2.357

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 58.119 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 20.785

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 54.643 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}$ = 1.427



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.146	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

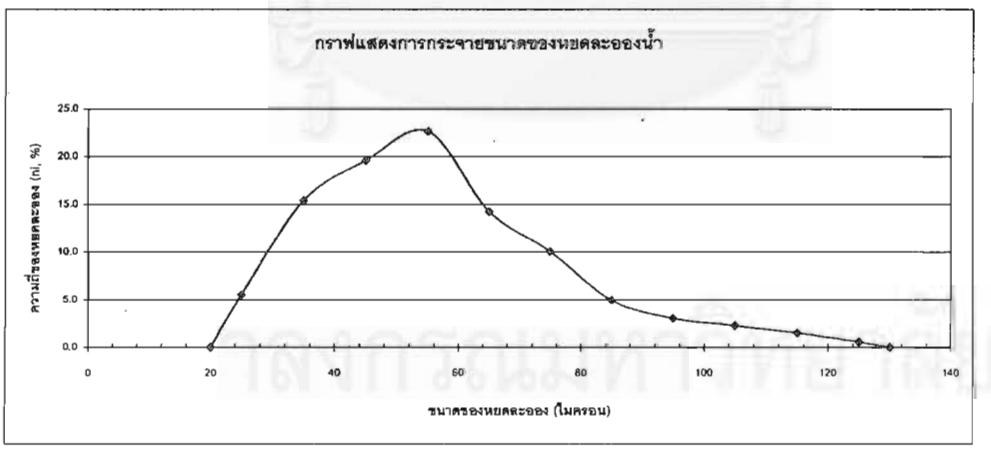
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	36.905	0	1.301	0.000	0.42693	0.000
20 - 30	25	29	5.524	5.524	138.1	31.905	5623	1.398	7.722	0.33002	0.602
30 - 40	35	81	15.429	20.952	540.0	21.905	7403	1.544	23.823	0.18389	0.522
40 -50	45	103	19.619	40.571	882.9	11.905	2780	1.653	32.434	0.07475	0.110
50 - 60	55	119	22.667	63.238	1246.7	1.905	82	1.740	39.448	-0.01240	0.003
60 - 70	65	75	14.286	77.524	928.6	-8.095	936	1.813	25.899	-0.06495	0.103
70 - 80	75	53	10.095	87.619	757.1	-18.095	3306	1.875	18.929	-0.14710	0.218
80 - 90	85	26	4.952	92.571	421.0	-28.095	3909	1.929	9.555	-0.20146	0.201
90 - 100	95	16	3.048	95.619	289.5	-38.095	4423	1.978	6.027	-0.24976	0.190
100 - 110	105	12	2.286	97.905	240.0	-48.095	5287	2.021	4.620	-0.29323	0.197
110 - 120	115	8	1.524	99.429	175.2	-58.095	5143	2.061	3.140	-0.33274	0.169
120 - 130	125	3	0.571	100.000	71.4	-68.095	2650	2.097	1.198	-0.36895	0.078
> 130	130	0	0.000	100.000	0.0	-73.095	0	2.114	0.000	-0.38598	0.000
	Total	525	100.000		5690.5		41542		172.796		2.392

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 56.905 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 20.485

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 53.452 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.430



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.250	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

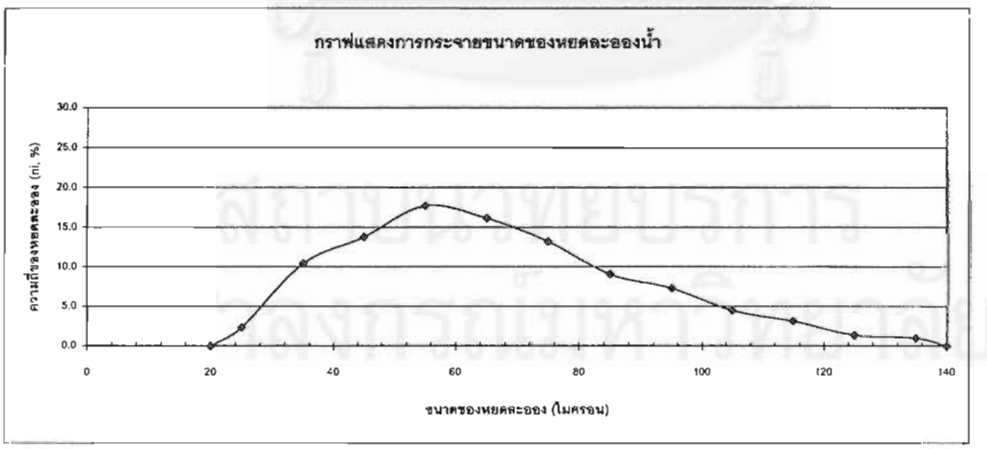
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	46.614	0	1.301	0.000	0.49419	0.000
20 - 30	25	12	2.362	2.362	59.1	41.614	4091	1.398	3.302	0.39728	0.373
30 - 40	35	53	10.433	12.795	365.2	31.614	10427	1.544	16.109	0.25116	0.658
40 -50	45	70	13.780	26.575	620.1	21.614	6437	1.653	22.780	0.14201	0.278
50 - 60	55	90	17.717	44.291	974.4	11.614	2390	1.740	30.833	0.05486	0.053
60 - 70	65	82	16.142	60.433	1049.2	1.614	42	1.813	29.264	-0.01769	0.005
70 - 80	75	67	13.189	73.622	989.2	-8.386	927	1.875	24.730	-0.07984	0.084
80 - 90	85	46	9.055	82.677	769.7	-18.386	3061	1.929	17.471	-0.13419	0.163
90 - 100	95	37	7.283	89.961	691.9	-28.386	5869	1.978	14.405	-0.18250	0.243
100 - 110	105	23	4.528	94.488	475.4	-38.386	6671	2.021	9.151	-0.22596	0.231
110 - 120	115	16	3.150	97.638	362.2	-48.386	7374	2.061	6.490	-0.26547	0.222
120 - 130	125	7	1.378	99.016	172.2	-58.386	4697	2.097	2.889	-0.30169	0.125
130 - 140	135	5	0.984	100.000	132.9	-68.386	4603	2.130	2.097	-0.33511	0.111
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-73.386	0	2.146	0.000	-0.35090	0.000
	Total	508	100.000		6661.4		56590		179.522		2.546

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 66.614 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 23.908

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 62.406 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.447



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.250	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

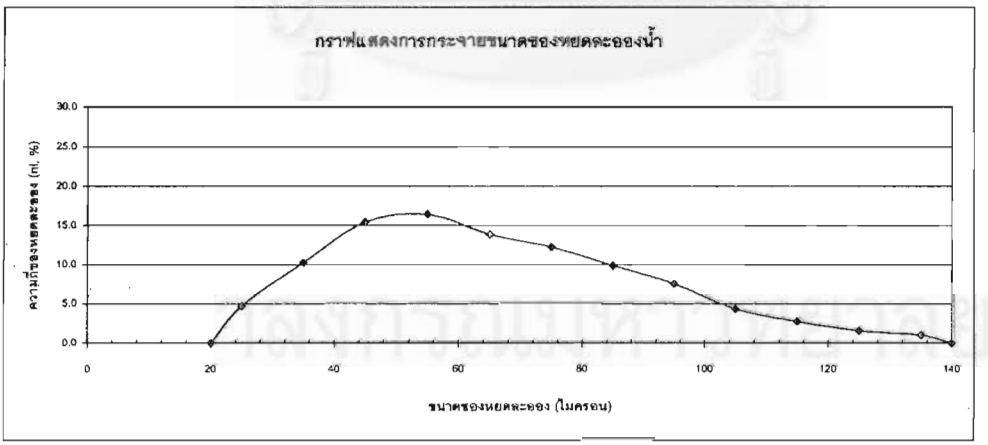
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	45.514	0	1.301	0.000	0.48310	0.000
20 - 30	25	24	4.743	4.743	118.6	40.514	7785	1.398	6.631	0.38619	0.707
30 - 40	35	52	10.277	15.020	359.7	30.514	9569	1.544	15.868	0.24006	0.592
40 -50	45	78	15.415	30.435	693.7	20.514	6487	1.653	25.484	0.13091	0.264
50 - 60	55	83	16.403	46.838	902.2	10.514	1813	1.740	28.547	0.04376	0.031
60 - 70	65	70	13.834	60.672	899.2	0.514	4	1.813	25.080	-0.02879	0.011
70 - 80	75	62	12.253	72.925	919.0	-9.486	1103	1.875	22.975	-0.09094	0.101
80 - 90	85	50	9.881	82.806	839.9	-19.486	3752	1.929	19.065	-0.14529	0.209
90 - 100	95	38	7.510	90.316	713.4	-29.486	6529	1.978	14.852	-0.19360	0.281
100 - 110	105	22	4.348	94.664	456.5	-39.486	6779	2.021	8.788	-0.23706	0.244
110 - 120	115	14	2.767	97.431	318.2	-49.486	6776	2.061	5.702	-0.27657	0.212
120 - 130	125	8	1.581	99.012	197.6	-59.486	5595	2.097	3.315	-0.31278	0.155
130 - 140	135	5	0.988	100.000	133.4	-69.486	4771	2.130	2.105	-0.34621	0.118
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-74.486	0	2.146	0.000	-0.36200	0.000
	Total	506	100.000		6551.4		60962		178.413		2.927

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 65.514 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 24.815

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 60.631 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.486



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.250	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

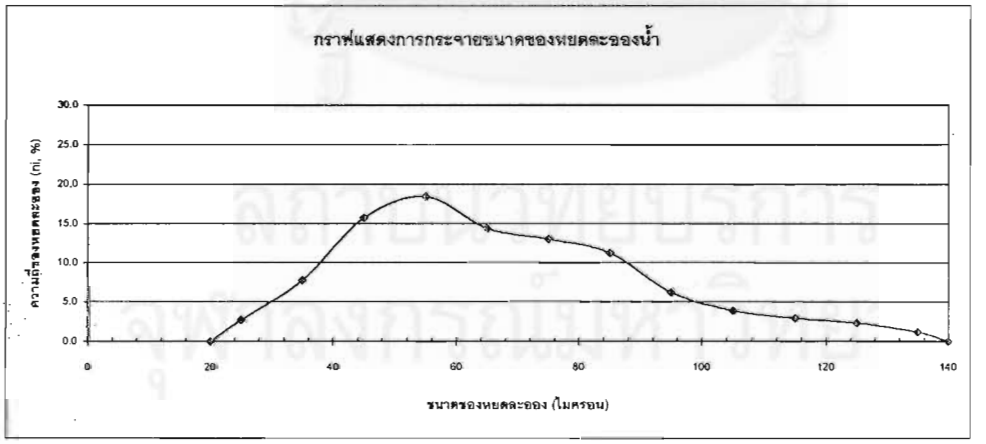
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	47.237	0	1.30[illegible]	0.000	0.49826	0.000
20 - 30	25	14	2.724	2.724	68.1	42.237	4859	1.398	3.808	0.40135	0.439
30 - 40	35	40	7.782	10.506	272.4	32.237	8088	1.544	12.016	0.25522	0.507
40 -50	45	81	15.759	26.265	709.1	22.237	7793	1.653	26.053	0.14608	0.336
50 - 60	55	95	18.482	44.747	1016.5	12.237	2768	1.740	32.166	0.05893	0.064
60 - 70	65	74	14.397	59.144	935.8	2.237	72	1.813	26.100	-0.01362	0.003
70 - 80	75	67	13.035	72.179	977.6	-7.763	785	1.875	24.441	-0.07577	0.075
80 - 90	85	58	11.284	83.463	959.1	-17.763	3560	1.929	21.772	-0.13013	0.191
90 - 100	95	32	6.226	89.689	591.4	-27.763	4799	1.978	12.313	-0.17843	0.198
100 - 110	105	20	3.891	93.580	408.6	-37.763	5549	2.021	7.865	-0.22190	0.192
110 - 120	115	15	2.918	96.498	335.6	-47.763	6657	2.061	6.014	-0.26141	0.199
120 - 130	125	12	2.335	98.833	291.8	-57.763	7790	2.097	4.896	-0.29762	0.207
130 - 140	135	6	1.167	100.000	157.6	67.763	5360	2.130	2.487	-0.33104	0.128
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-72.763	0	2.146	0.000	-0.34684	0.000
	Total	514	100.000		6723.7		58079		179.929		2.539

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 67.237 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 24.221

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 62.993 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.446



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.250	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	4	

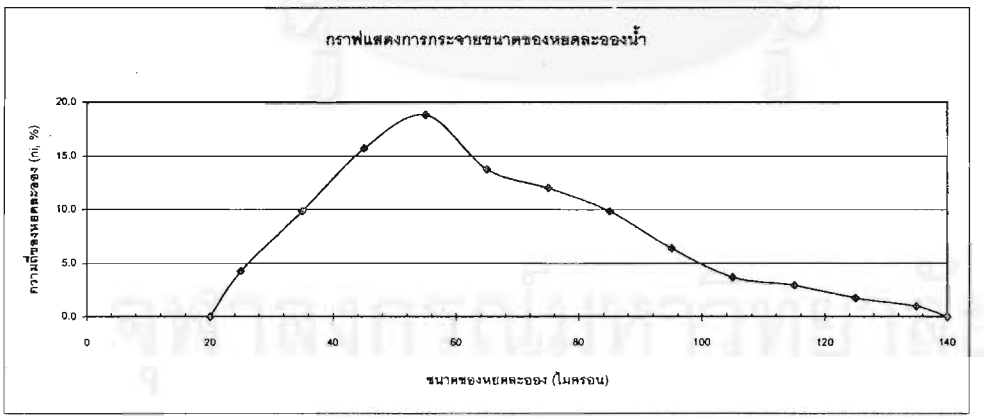
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	45.058	0	1.301	0.000	0.48134	0.000
20 - 30	25	22	4.264	4.264	106.6	40.058	6842	1.398	5.960	0.38443	0.630
30 - 40	35	51	9.884	14.147	345.9	30.058	8930	1.544	15.261	0.23830	0.561
40 -50	45	81	15.698	29.845	706.4	20.058	6316	1.653	25.952	0.12915	0.262
50 - 60	55	97	18.798	48.643	1033.9	10.058	1902	1.740	32.716	0.04200	0.033
60 - 70	65	71	13.760	62.403	894.4	0.058	0	1.813	24.945	-0.03055	0.013
70 - 80	75	62	12.016	74.419	901.2	-9.942	1188	1.875	22.530	-0.09270	0.103
80 - 90	85	51	9.884	84.302	840.1	-19.942	3931	1.929	19.070	-0.14705	0.214
90 - 100	95	33	6.395	90.698	607.6	-29.942	5734	1.978	12.648	-0.19636	0.244
100 - 110	105	19	3.682	94.380	386.6	-39.942	5874	2.021	7.442	-0.23882	0.210
110 - 120	115	15	2.907	97.287	334.3	-49.942	7251	2.061	5.990	-0.27833	0.225
120 - 130	125	9	1.744	99.031	218.0	-59.942	6267	2.097	3.657	-0.31454	0.173
130 - 140	135	5	0.969	100.000	130.8	-69.942	4740	2.130	2.064	-0.34797	0.117
> 140	140	0	0.000	100.000	0.0	-74.942	0	2.146	0.000	-0.36376	0.000
	Total	516	100.000		6505.8		58973		178.237		2.785

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 65.058 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 24.407

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 60.585 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.471



อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

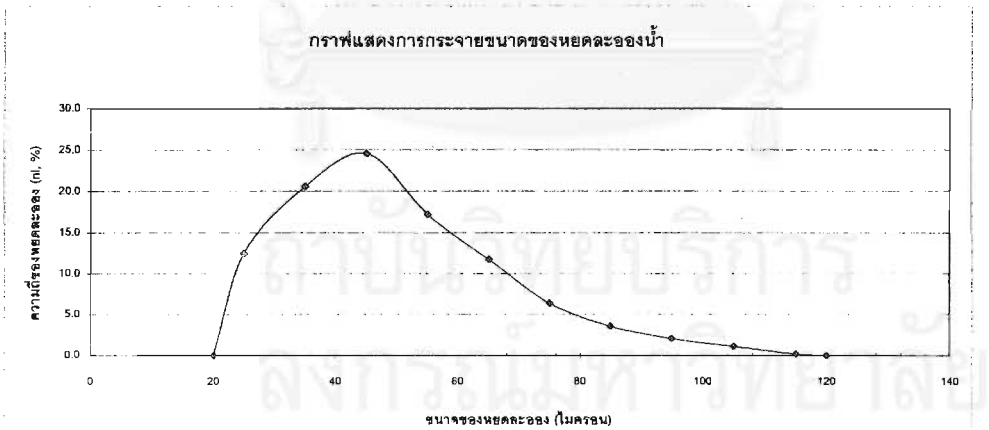
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	29.726	0	1.301	0.000	0.36742	0.000
20 - 30	25	66	12.476	12.476	311.9	24.726	7628	1.398	17.441	0.27051	0.913
30 - 40	35	109	20.605	33.081	721.2	14.726	4468	1.544	31.815	0.12439	0.319
40 -50	45	130	24.575	57.656	1105.9	4.726	549	1.653	40.627	0.01524	0.006
50 - 60	55	91	17.202	74.858	946.1	-5.274	479	1.740	29.938	-0.07191	0.089
60 - 70	65	62	11.720	86.578	761.8	-15.274	2734	1.813	21.248	-0.14446	0.245
70 - 80	75	34	6.427	93.006	482.0	-25.274	4106	1.875	12.051	-0.20661	0.274
80 - 90	85	19	3.592	96.597	305.3	-35.274	4469	1.929	6.930	-0.26096	0.245
90 - 100	95	11	2.079	98.677	197.5	-45.274	4262	1.978	4.112	-0.30927	0.199
100 - 110	105	6	1.134	99.811	119.1	-55.274	3465	2.021	2.292	-0.35273	0.141
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-65.274	805	2.061	0.390	-0.39224	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-70.274	0	2.079	0.000	-0.41073	0.000
	Total	529	100.000		4972.6		32965		166.845		2.459

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 49.726 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 18.248

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 46.607 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.437



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

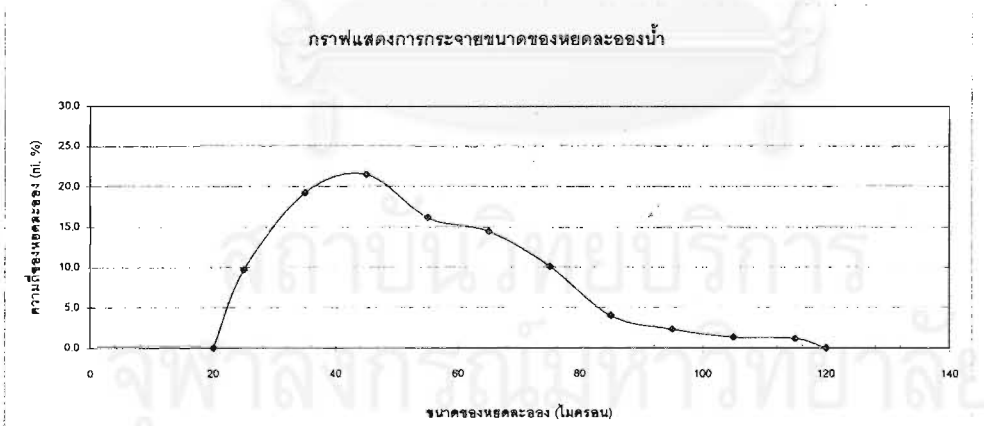
Inter a.,µm	Midpoint d_i	จำนวน n_i	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.019	0	1.301	0.000	0.39404	0.000
20 - 30	25	51	9.714	9.714	242.9	28.019	7626	1.398	13.580	0.29713	0.858
30 - 40	35	101	19.238	28.952	673.3	18.019	6246	1.544	29.705	0.15100	0.439
40 -50	45	113	21.524	50.476	968.6	8.019	1384	1.653	35.583	0.04186	0.038
50 - 60	55	85	16.190	66.667	890.5	-1.981	64	1.740	28.177	-0.04529	0.033
60 - 70	65	76	14.476	81.143	941.0	-11.981	2078	1.813	26.244	-0.11784	0.201
70 - 80	75	53	10.095	91.238	757.1	-21.981	4878	1.875	18.929	-0.17999	0.327
80 - 90	85	21	4.000	95.238	340.0	-31.981	4091	1.929	7.718	-0.23435	0.220
90 - 100	95	12	2.286	97.524	217.1	-41.981	4028	1.978	4.521	-0.28265	0.183
100 - 110	105	7	1.333	98.857	140.0	-51.981	3603	2.021	2.695	-0.32612	0.142
110 - 120	115	6	1.143	100.000	131.4	-61.981	4390	2.061	2.355	-0.36563	0.153
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-66.981	0	2.079	0.000	-0.38411	0.000
	Total	525	100.000		5301.9		38389		169.507		2.592

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 53.019 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 19.692

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.553 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.451



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอิเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

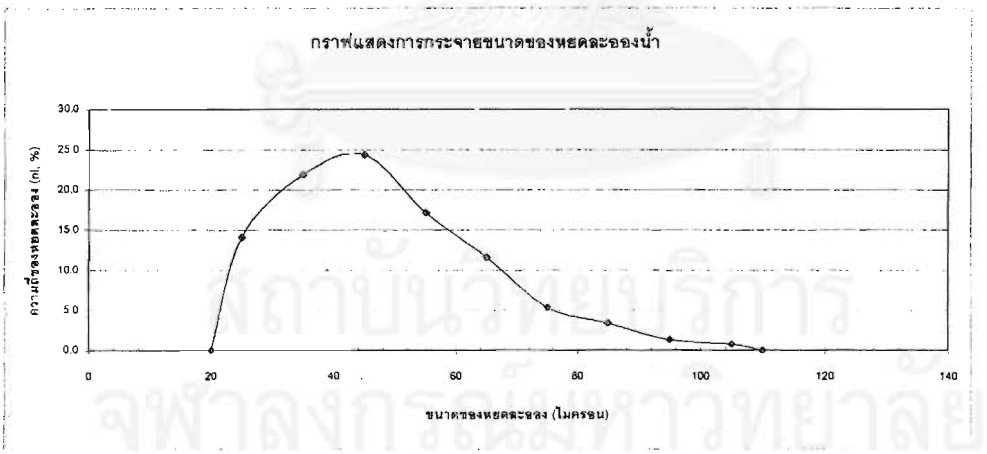
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	28.124	0	1.301	0.000	0.35422	0.000
20 - 30	25	74	14.095	14.095	352.4	23.124	7937	1.398	19.704	0.25731	0.933
30 - 40	35	115	21.905	36.000	766.7	13.124	3773	1.544	33.822	0.11118	0.271
40 -50	45	128	24.381	60.381	1097.1	3.124	238	1.653	40.307	0.00204	0.000
50 - 60	55	90	17.143	77.524	942.9	-6.876	811	1.740	29.835	-0.08511	0.124
60 - 70	65	61	11.619	89.143	755.2	-16.876	3309	1.813	21.064	-0.15766	0.289
70 - 80	75	28	5.333	94.476	400.0	-26.876	3852	1.875	10.000	-0.21981	0.258
80 - 90	85	18	3.429	97.905	291.4	-36.876	4662	1.929	6.615	-0.27417	0.258
90 - 100	95	7	1.333	99.238	126.7	-46.876	2930	1.978	2.637	-0.32247	0.139
100 - 110	105	4	0.762	100.000	80.0	-56.876	2465	2.021	1.540	-0.36594	0.102
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-61.876	0	2.041	0.000	-0.38614	0.000
	Total	525	100.000		4812.4		29577		165.525		2.373

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 48.124 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.284

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 45.212 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.428



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

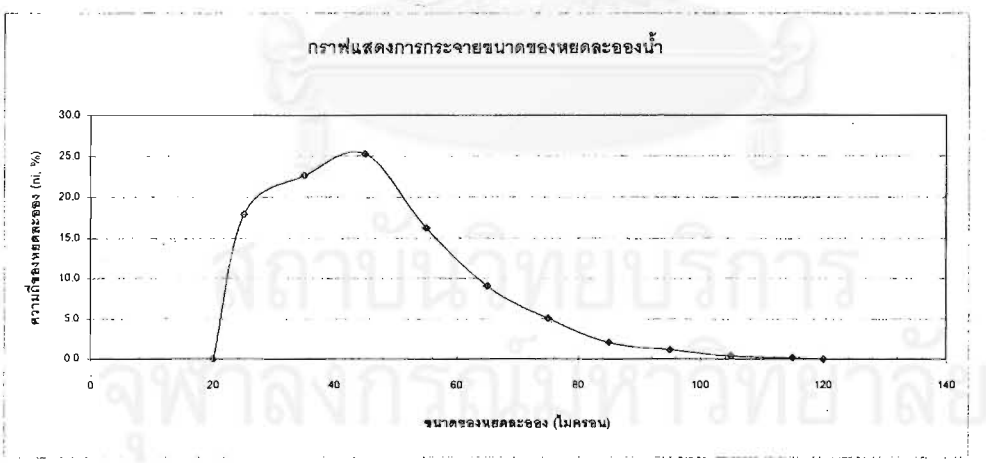
Class mark (d_i)	Midpoint d_i	n_i	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.868	0	1.301	0.000	0.33318	0.000
20 - 30	25	95	17.925	17.925	448.1	20.868	7806	1.398	25.057	0.23627	1.001
30 - 40	35	120	22.642	40.566	792.5	10.868	2674	1.544	34.960	0.09015	0.184
40 -50	45	134	25.283	65.849	1137.7	0.868	19	1.653	41.798	-0.01900	0.009
50 60	55	86	16.226	82.075	892.5	-9.132	1353	1.740	28.240	-0.10615	0.183
60 - 70	65	48	9.057	91.132	588.7	-19.132	3315	1.813	16.419	-0.17870	0.289
70 - 80	75	27	5.094	96.226	382.1	-29.132	4323	1.875	9.552	-0.24085	0.296
80 - 90	85	11	2.075	98.302	176.4	-39.132	3178	1.929	4.004	-0.29520	0.181
90 - 100	95	6	1.132	99.434	107.5	-49.132	2733	1.978	2.239	-0.34351	0.134
100 - 110	105	2	0.377	99.811	39.6	-59.132	1319	2.021	0.763	-0.38697	0.057
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.7	-69.132	902	2.061	0.389	-0.42648	0.034
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.132	0	2.079	0.000	-0.44497	0.000
	Total	530	100.000		4586.8		27623		163.421		2.367

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.868 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / \{(\Sigma n_i) - 1\})^{1/2}$ = 16.704

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.074 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.428



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

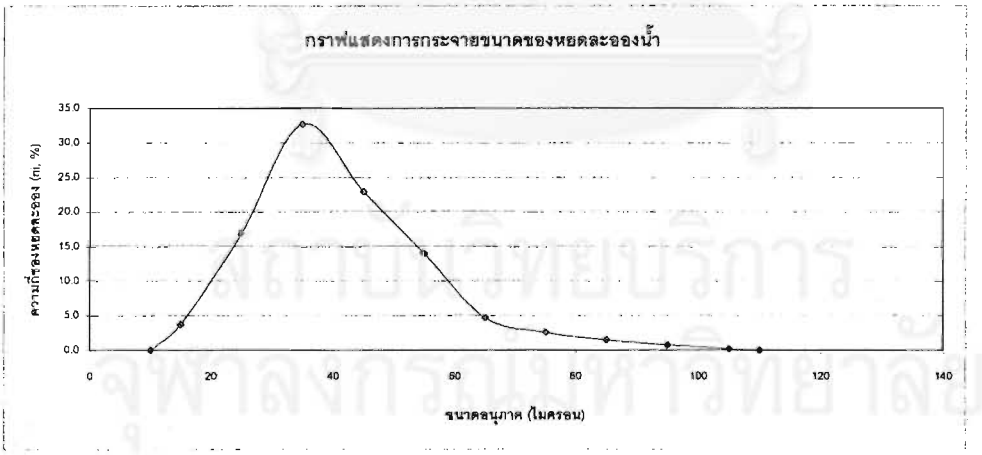
Interval, μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.449	0	1.000	0.000	0.58946	0.000
10 - 20	15	20	3.738	3.738	56.1	26.449	2615	1.176	4.397	0.41337	0.639
20 - 30	25	90	16.822	20.561	420.6	16.449	4551	1.398	23.517	0.19152	0.617
30 - 40	35	175	32.710	53.271	1144.9	6.449	1360	1.544	50.507	0.04539	0.067
40 -50	45	123	22.991	76.262	1034.6	-3.551	290	1.653	38.008	-0.06375	0.093
50 - 60	55	75	14.019	90.280	771.0	-13.551	2574	1.740	24.398	-0.15090	0.319
60 - 70	65	25	4.673	94.953	303.7	-23.551	2592	1.813	8.472	-0.22345	0.233
70 - 80	75	14	2.617	97.570	196.3	-33.551	2946	1.875	4.907	-0.28560	0.213
80 - 90	85	8	1.495	99.065	127.1	-43.551	2836	1.929	2.885	-0.33996	0.173
90 - 100	95	4	0.748	99.813	71.0	-53.551	2144	1.978	1.479	-0.38826	0.113
100 - 110	105	1	0.187	100.000	19.6	-63.551	755	2.021	0.378	-0.43173	0.035
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-68.551	0	2.041	0.000	-0.45193	0.000
	Total	535	100.000		4144.9		22664		158.946		2.503

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.449 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 15.130

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.856 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.442



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 1 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร)

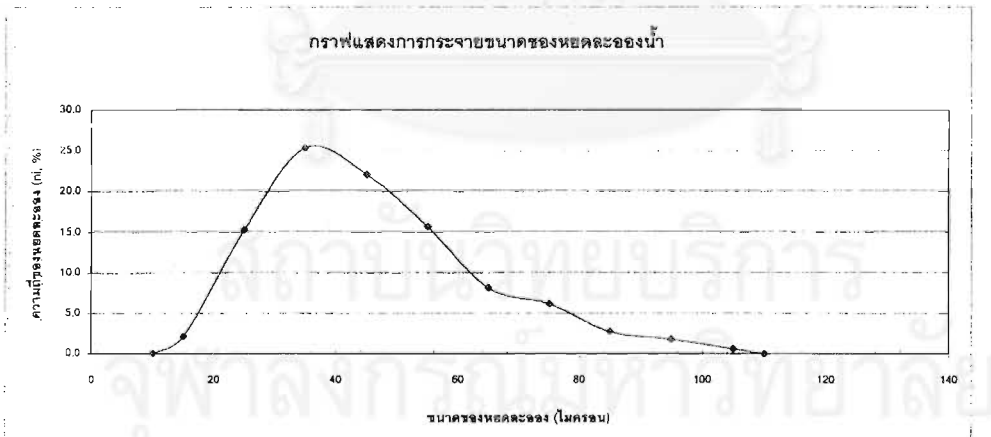
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	36.124	0	1.000	0.000	0.63198	0.000
10 - 20	15	11	2.132	2.132	32.0	31.124	2065	1.176	2.507	0.45589	0.443
20 - 30	25	79	15.310	17.442	382.8	21.124	6832	1.398	21.403	0.23404	0.839
30 - 40	35	131	25.388	42.829	888.6	11.124	3142	1.544	39.200	0.08791	0.196
40 -50	45	114	22.093	64.922	994.2	1.124	28	1.653	36.524	-0.02123	0.010
50 - 60	55	81	15.698	80.620	863.4	-8.876	1237	1.740	27.320	-0.10836	0.184
60 - 70	65	42	8.140	88.760	529.1	-18.876	2900	1.813	14.756	-0.18093	0.266
70 - 80	75	32	6.202	94.961	465.1	-28.876	5171	1.875	11.628	-0.24308	0.366
80 - 90	85	14	2.713	97.674	230.6	-38.876	4101	1.929	5.235	-0.29744	0.240
90 - 100	95	9	1.744	99.419	165.7	-48.876	4167	1.978	3.450	-0.34574	0.208
100 - 110	105	3	0.581	100.000	61.0	-58.876	2015	2.021	1.175	-0.38921	0.088
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-63.876	0	2.041	0.000	-0.40941	0.000
	Total	516	100.000		4612.4	.	31657		163.198		2.842

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.124 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 17.882

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.853 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.477



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 39.80 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

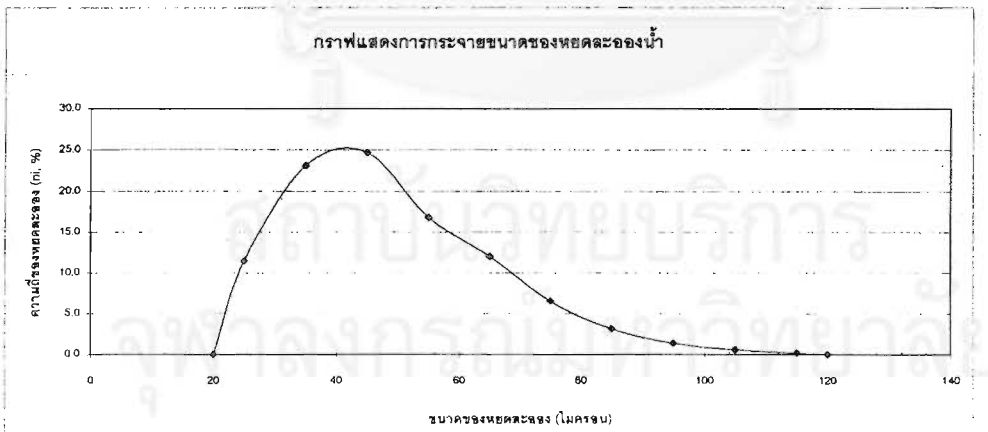
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	26.893	0	1.301	0.000	0.36226	0.000
20 - 30	25	56	11.462	11.462	286.6	23.893	6544	1.398	16.024	0.26535	0.807
30 - 40	35	117	23.123	34.585	809.3	13.893	4463	1.544	35.703	0.11922	0.329
40 -50	45	125	24.704	59.289	1111.7	3.893	374	1.653	40.840	0.01007	0.003
50 - 60	55	85	16.798	76.087	923.9	-6.107	626	1.740	29.235	-0.07708	0.100
60 - 70	65	61	12.055	88.142	783.6	-16.107	3127	1.813	21.855	-0.14963	0.270
70 - 80	75	33	6.522	94.664	489.1	-26.107	4445	1.875	12.229	-0.21178	0.292
80 - 90	85	16	3.162	97.826	268.8	-36.107	4122	1.929	6.101	-0.26613	0.224
90 - 100	95	7	1.383	99.209	131.4	-46.107	2941	1.978	2.736	-0.31444	0.137
100 - 110	105	3	0.593	99.802	62.3	-56.107	1866	2.021	1.198	-0.35790	0.076
110 - 120	115	1	0.198	100.000	22.7	-66.107	864	2.061	0.407	-0.39741	0.031
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-71.107	0	2.079	0.000	-0.41590	0.000
	Total	506	100.000		4889.3		29374		166.329		2.268

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 48.693 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.225

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 46.056 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.417



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

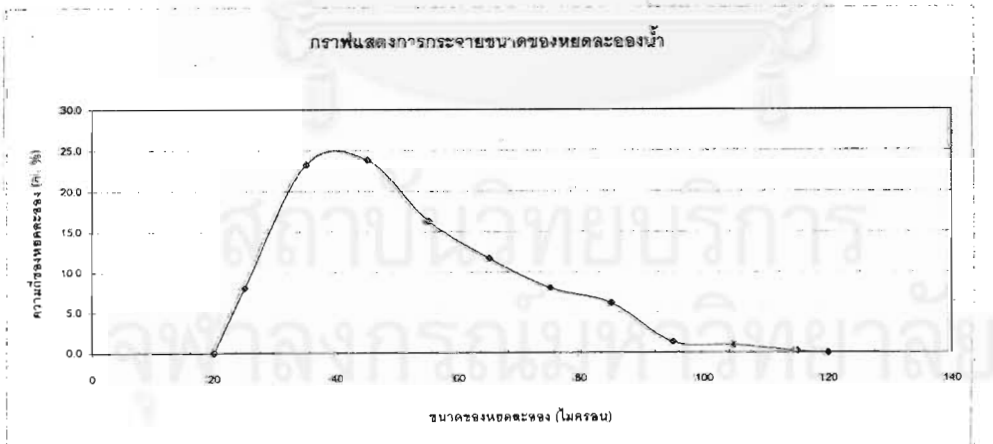
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	31.308	0	1.301	0.000	0.38275	0.000
20 - 30	25	42	8.077	8.077	201.9	26.308	5550	1.398	11.291	0.28584	0.660
30 - 40	35	121	23.269	31.346	814.4	16.308	6188	1.544	35.929	0.13972	0.454
40 -50	45	124	23.846	55.192	1073.1	6.308	949	1.653	39.423	0.03057	0.022
50 - 60	55	85	16.346	71.538	899.0	-3.692	223	1.740	28.448	-0.05658	0.052
60 - 70	65	61	11.731	83.269	762.5	-13.692	2199	1.813	21.267	-0.12913	0.196
70 - 80	75	42	8.077	91.346	605.8	-23.692	4534	1.875	15.145	-0.19128	0.296
80 - 90	85	32	6.154	97.500	523.1	-33.692	6986	1.929	11.873	-0.24564	0.371
90 - 100	95	7	1.346	98.846	127.9	-43.692	2570	1.978	2.652	-0.29394	0.116
100 - 110	105	5	0.962	99.808	101.0	-53.692	2772	2.021	1.943	-0.33741	0.109
110 - 120	115	1	0.192	100.000	22.1	-63.692	780	2.061	0.396	-0.37691	0.027
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-68.692	0	2.079	0.000	-0.39540	0.000
	Total	520	100.000		5130.8		32791		168.378		2.304

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 51.308 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 18.199

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 48.282 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.421



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

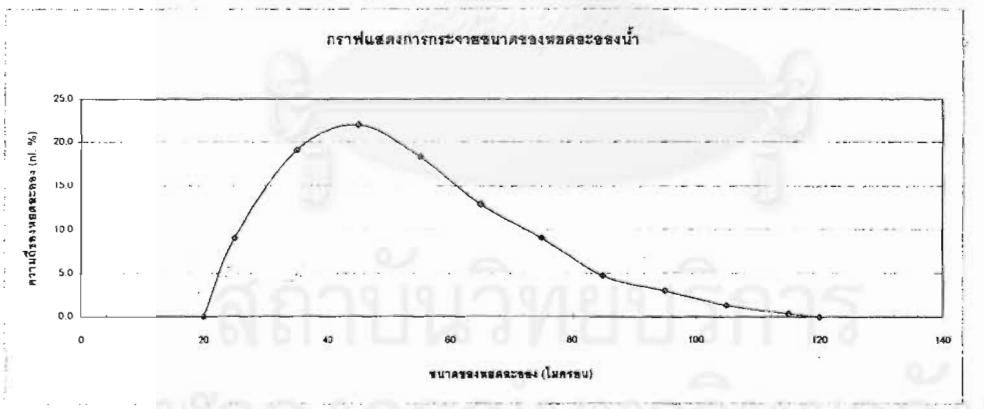
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i) \times n_i$	$\log d_i$	$n \log d_i$	$\log d_{i+1} - \log d_i$	$(\log d_{i+1} - \log d_i) \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.879	0	1.301	0.000	0.39418	0.000
20 - 30	25	48	9.091	9.091	227.3	27.879	7086	1.398	12.709	0.29727	0.803
30 - 40	35	101	19.129	28.220	669.5	17.879	6115	1.544	29.536	0.15114	0.437
40 - 50	45	116	21.970	50.189	988.6	7.879	1384	1.653	36.321	0.04200	0.039
50 - 60	55	97	18.371	68.561	1010.4	-2.121	83	1.740	31.973	-0.04516	0.037
60 - 70	65	68	12.879	81.439	837.1	-12.121	1692	1.813	23.348	-0.11771	0.178
70 - 80	75	48	9.091	90.530	681.8	-22.121	4449	1.875	17.046	-0.17985	0.294
80 - 90	85	25	4.735	95.265	402.5	-32.121	4885	1.929	9.136	-0.23421	0.260
90 - 100	95	16	3.030	98.295	287.9	-42.121	5378	1.978	5.993	-0.28252	0.242
100 - 110	105	7	1.326	99.621	139.2	-52.121	3602	2.021	2.680	-0.32598	0.141
110 - 120	115	2	0.379	100.000	43.6	-62.121	1462	2.061	0.781	-0.36549	0.051
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-67.121	0	2.079	0.000	-0.38397	0.000
	Total	528	100.000		5287.9		36292		169.521		2.482

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 52.879 ไมครอน

Standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]^{1/2}$ = 19.147

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.569 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1} [\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.440



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียงซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

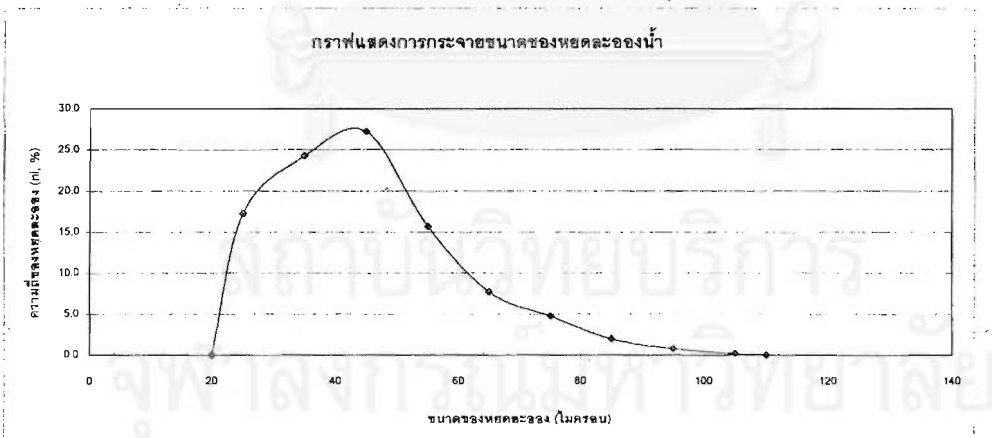
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	24.980	0	1.301	0.000	0.32702	0.000
20 - 30	25	87	17.296	17.296	432.4	19.980	6905	1.398	24.179	0.23011	0.916
30 - 40	35	122	24.254	41.551	848.9	9.980	2416	1.544	37.451	0.08398	0.171
40 -50	45	137	27.237	68.787	1225.6	-0.020	0	1.653	45.028	-0.02517	0.017
50 - 60	55	79	15.706	84.493	863.8	-10.020	1577	1.740	27.334	-0.11232	0.198
60 - 70	65	39	7.753	92.247	504.0	-20.020	3108	1.813	14.056	-0.18487	0.265
70 - 80	75	24	4.771	97.018	357.9	-30.020	4300	1.875	8.947	-0.24702	0.291
80 - 90	85	10	1.988	99.006	169.0	-40.020	3184	1.929	3.836	-0.30137	0.181
90 - 100	95	4	0.795	99.801	75.5	-50.020	1990	1.978	1.573	-0.34968	0.097
100 - 110	105	1	0.199	100.000	20.9	-60.020	716	2.021	0.402	-0.39314	0.031
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-65.020	0	2.041	0.000	-0.41335	0.000
	Total	503	100.000		4498.0		24195		162.805		2.167

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 44.980 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 15.633

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.466 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.406



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

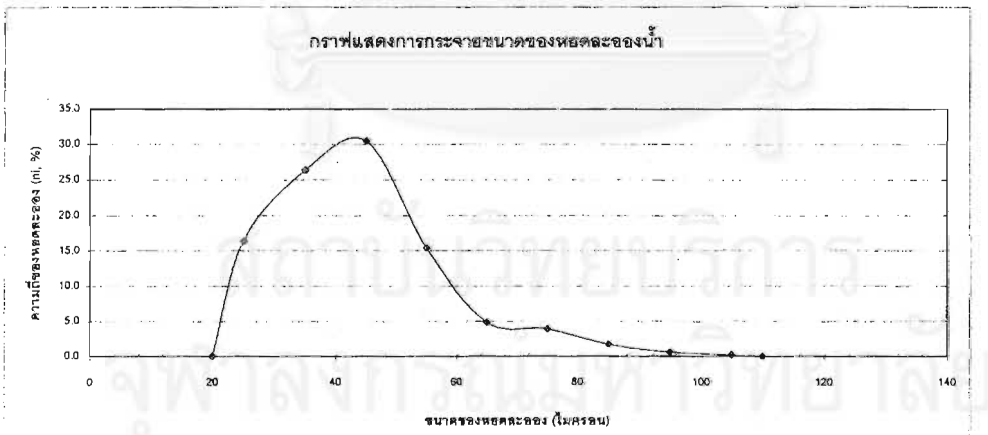
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	23.887	0	1.301	0.000	0.31891	0.000
20 - 30	25	84	16.406	16.406	410.2	18.887	5852	1.398	22.935	0.22200	0.809
30 - 40	35	135	26.367	42.773	922.9	8.887	2082	1.544	40.713	0.07587	0.152
40 -50	45	156	30.469	73.242	1371.1	-1.113	38	1.653	50.371	-0.03327	0.034
50 - 60	55	79	15.430	88.672	848.6	-11.113	1906	1.740	26.853	-0.12042	0.224
60 - 70	65	25	4.883	93.555	317.4	-21.113	2177	1.813	8.852	-0.19297	0.182
70 - 80	75	20	3.906	97.461	293.0	-31.113	3781	1.875	7.324	-0.25512	0.254
80 - 90	85	9	1.758	99.219	149.4	-41.113	2971	1.929	3.392	-0.30948	0.168
90 - 100	95	3	0.586	99.805	55.7	-51.113	1531	1.978	1.159	-0.35778	0.075
100 - 110	105	1	0.195	100.000	20.5	-61.113	729	2.021	0.396	-0.40125	0.031
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-66.113	0	2.041	0.000	-0.42145	0.000
	Total	512	100.000		4388.7		21067		161.994		1.929

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 43.887 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 14.588

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 41.681 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.379



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอิเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 3

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

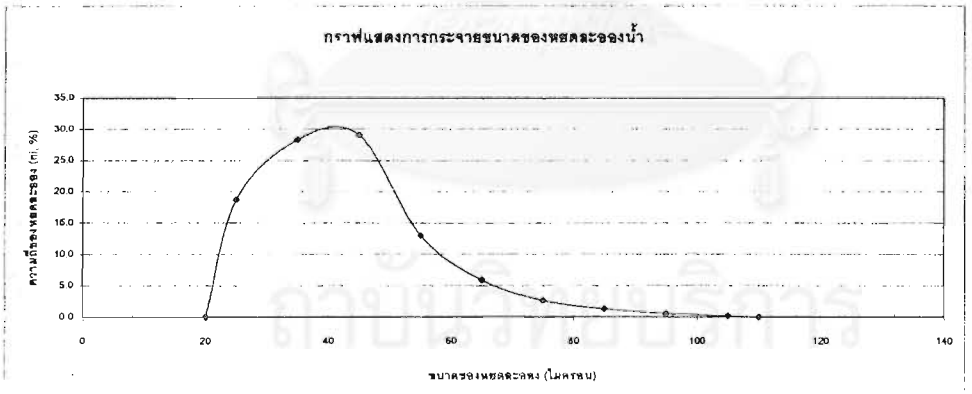
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n$	$\log d_i$	$n \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	22.644	0	1.301	0.000	0.30637	0.000
20 - 30	25	98	18.774	18.774	469.3	17.644	5844	1.398	26.245	0.20946	0.824
30 - 40	35	148	28.352	47.126	992.3	7.644	1657	1.544	43.778	0.06334	0.114
40 -50	45	152	29.119	76.245	1310.3	-2.356	162	1.653	48.140	-0.04581	0.061
50 - 60	55	68	13.027	89.272	716.5	-12.356	1989	1.740	22.671	-0.13296	0.230
60 - 70	65	31	5.939	95.211	386.0	-22.356	2968	1.813	10.766	-0.20551	0.251
70 - 80	75	14	2.682	97.893	201.1	-32.356	2808	1.875	5.029	-0.26766	0.192
80 - 90	85	7	1.341	99.234	114.0	-42.356	2406	1.929	2.587	-0.32202	0.139
90 - 100	95	3	0.575	99.808	54.6	-52.356	1575	1.978	1.137	-0.37032	0.079
100 - 110	105	1	0.192	100.000	20.1	-62.356	745	2.021	0.387	-0.41379	0.033
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.356	0	2.041	0.000	-0.43399	0.000
-	Total	522	100.000		4264.4		20154		160.740		1.922

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.644 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 14.268

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 40.495 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} \{\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.378



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

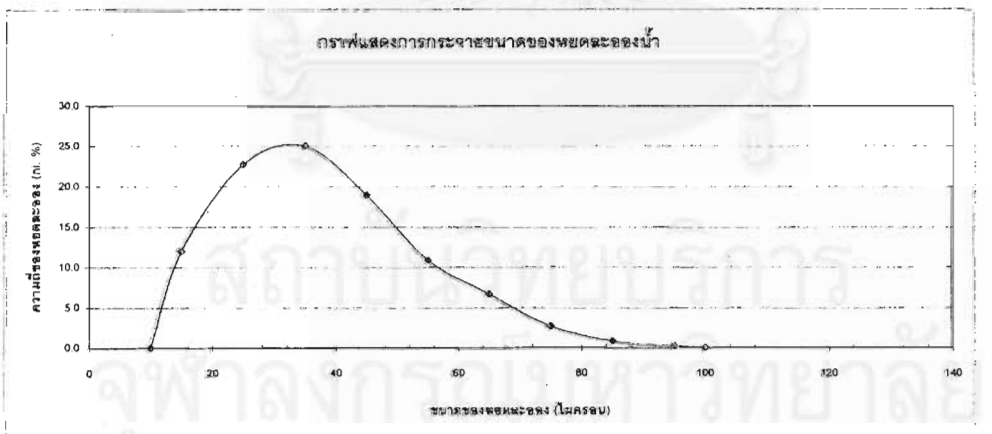
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.964	0	1.000	0.000	0.53917	0.000
10 - 20	15	63	12.046	12.046	180.7	22.964	6352	1.176	14.167	0.36308	1.588
20 - 30	25	119	22.753	34.799	568.8	12.964	3824	1.398	31.808	0.14123	0.454
30 - 40	35	131	25.048	59.847	876.7	2.964	220	1.544	38.676	-0.00489	0.001
40 - 50	45	99	18.929	78.776	851.8	-7.036	937	1.653	31.294	-0.11404	0.246
50 - 60	55	57	10.899	89.675	599.4	-17.036	3163	1.740	18.968	-0.20119	0.441
60 - 70	65	35	6.692	96.367	435.0	-27.036	4892	1.813	12.132	-0.27374	0.501
70 - 80	75	14	2.677	99.044	200.8	-37.036	3672	1.875	5.019	-0.33589	0.302
80 - 90	85	4	0.765	99.809	65.0	-47.036	1692	1.929	1.476	-0.39024	0.116
90 - 100	95	1	0.191	100.000	18.2	-57.036	622	1.978	0.378	-0.43855	0.037
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.036	0	2.000	0.000	-0.46083	0.000
	Total	523	100.000		3796.4		25374		153.917		3.686

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.964 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 16.899

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 34.608 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))$ = 1.559



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

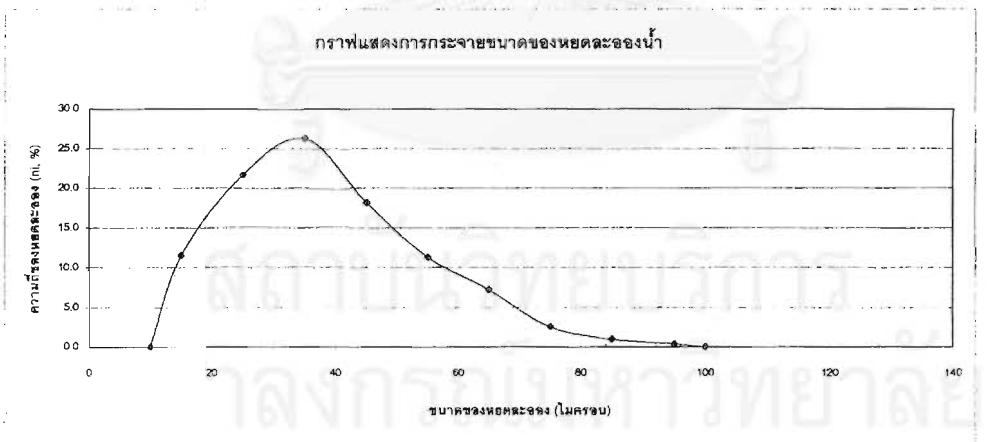
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.509	0	1.000	0.000	0.54533	0.000
10 - 20	15	59	11.501	11.501	172.5	23.509	6356	1.176	13.526	0.36924	1.568
20 - 30	25	111	21.637	33.138	540.9	13.509	3949	1.398	30.248	0.14739	0.470
30 - 40	35	135	26.316	59.454	921.1	3.509	324	1.544	40.633	0.00126	0.000
40 -50	45	93	18.129	77.583	815.8	-6.491	764	1.653	29.971	-0.10788	0.211
50 - 60	55	58	11.306	88.889	621.8	-16.491	3075	1.740	19.677	-0.19503	0.430
60 - 70	65	37	7.212	96.101	468.8	-26.491	5062	1.813	13.076	-0.26758	0.516
70 - 80	75	13	2.534	98.635	190.1	-36.491	3374	1.875	4.752	-0.32973	0.276
80 - 90	85	5	0.975	99.610	82.8	-46.491	2107	1.929	1.881	-0.38409	0.144
90 - 100	95	2	0.390	100.000	37.0	-56.491	1244	1.978	0.771	-0.43239	0.073
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.491	0	2.000	0.000	-0.45467	0.000
	Total	513	100.000		3850.9		26254		154.533		3.688

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.509 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.285

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.102 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.560



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 2 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 14 มิลลิเมตร)

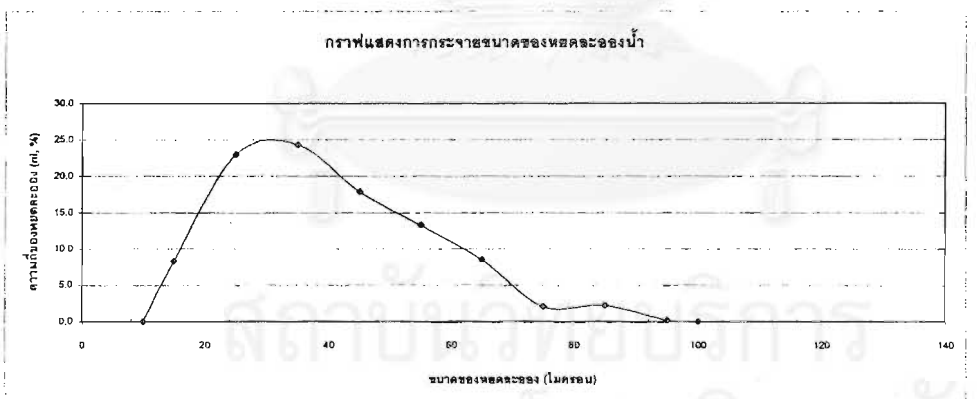
Interval,µm	Mid-point d_i	จำนวน (n)	n_i(%;	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{arithmetic\ mean} - d_i$	$(d_{arithmetic\ mean} - d_i) \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{arithmetic\ mean} - \log d_i$	$(\log d_{arithmetic\ mean} - \log d_i) \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.133	0	1.000	0.000	0.56484	0.000
10 - 20	15	44	8.365	8.365	125.5	25.133	5284	1.176	9.838	0.38875	1.264
20 - 30	25	121	23.004	31.369	575.1	15.133	5268	1.398	32.156	0.16690	0.641
30 - 40	35	128	24.335	55.703	851.7	5.133	641	1.544	37.574	0.02077	0.010
40 - 50	45	94	17.871	73.574	804.2	-4.867	423	1.653	29.544	-0.08838	0.140
50 - 60	55	70	13.308	86.882	731.9	-14.867	2941	1.740	23.159	-0.17553	0.410
60 - 70	65	45	8.555	95.437	556.1	-24.867	5290	1.813	15.510	-0.24608	0.526
70 - 80	75	11	2.091	97.529	156.8	-34.867	2542	1.875	3.921	-0.31022	0.201
80 - 90	85	12	2.281	99.810	193.9	-44.867	4592	1.929	4.402	-0.36458	0.303
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-54.867	572	1.978	0.376	-0.41289	0.032
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-59.867	0	2.000	0.000	-0.43516	0.000
	Total	526	100.000		4013.3		27555		156.484		3.528

Arithmetic mean ($d_{arithmetic\ mean}$) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 40.133 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{arithmetic\ mean} - d)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]$ = 16.683

geometric mean(d_g) = $\log^{-1} (\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 36.714 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1} (\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.544



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียวโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 39.80 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.088	0	1.301	0.000	0.37151	0.000
20 - 30	25	53	10.331	10.331	258.3	25.088	6503	1.398	14.443	0.27460	0.779
30 - 40	35	123	23.977	34.308	839.2	15.088	5458	1.544	37.022	0.12847	0.396
40 - 50	45	118	23.002	57.310	1035.1	5.088	595	1.653	38.027	0.01933	0.009
50 - 60	55	75	14.620	71.930	804.1	-4.912	353	1.740	25.444	-0.06782	0.067
60 - 70	65	68	13.255	85.185	861.6	-14.912	2948	1.813	24.031	-0.14037	0.261
70 - 80	75	46	8.967	94.152	672.5	-24.912	5565	1.875	16.813	-0.20252	0.368
80 - 90	85	15	2.924	97.076	248.5	-34.912	3564	1.929	5.642	-0.25688	0.193
90 - 100	95	10	1.949	99.025	185.2	-44.912	3932	1.978	3.855	-0.30518	0.182
100 - 110	105	4	0.780	99.805	81.9	-54.912	2351	2.021	1.576	-0.34865	0.095
110 - 120	115	1	0.195	100.000	22.4	-64.912	821	2.061	0.402	-0.38816	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.912	0	2.079	0.000	-0.40664	0.000
	Total	513	100.000		5008.8		32090		167.254		2.378

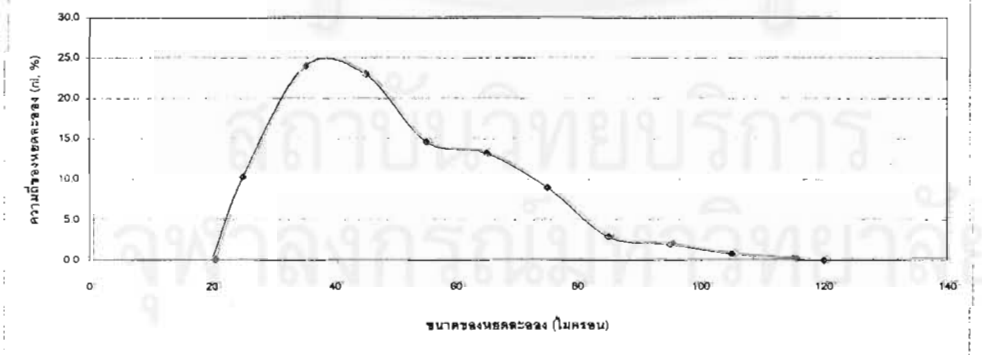
Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 50.088 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.004

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 47.049 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.429

กราฟแสดงการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำ



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียวโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

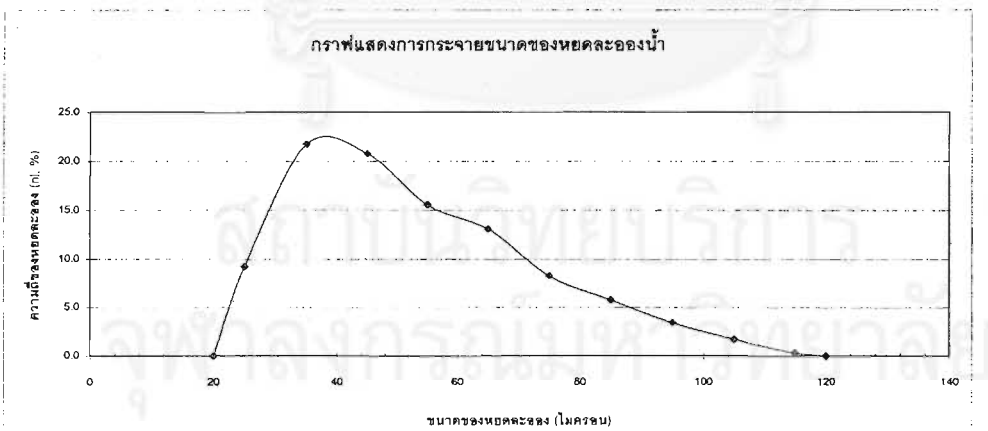
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	32.981	0	1.301	0.000	0.39281	0.000
20 - 30	25	48	9.231	9.231	230.8	27.981	7227	1.398	12.904	0.29590	0.808
30 - 40	35	113	21.731	30.962	760.6	17.981	7026	1.544	33.554	0.14977	0.487
40 -50	45	108	20.769	51.731	934.6	7.981	1323	1.653	34.336	0.04063	0.034
50 - 60	55	81	15.577	67.308	856.7	-2.019	64	1.740	27.109	-0.04652	0.034
60 - 70	65	68	13.077	80.385	850.0	-12.019	1889	1.813	23.707	-0.11907	0.185
70 - 80	75	43	8.269	88.654	620.2	-22.019	4009	1.875	15.505	-0.18122	0.272
80 - 90	85	30	5.769	94.423	490.4	-32.019	5915	1.929	11.131	-0.23558	0.320
90 - 100	95	18	3.462	97.885	328.8	-42.019	6112	1.978	6.846	-0.28388	0.279
100 - 110	105	9	1.731	99.615	181.7	-52.019	4683	2.021	3.498	-0.32735	0.185
110 - 120	115	2	0.385	100.000	44.2	-62.019	1479	2.061	0.793	-0.36686	0.052
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-67.019	0	2.079	0.000	-0.38534	0.000
	Total	520	100.000		5298.1		39727		169.384		2.657

Anthmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 52.981 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 20.032

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.413 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.458



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	39.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

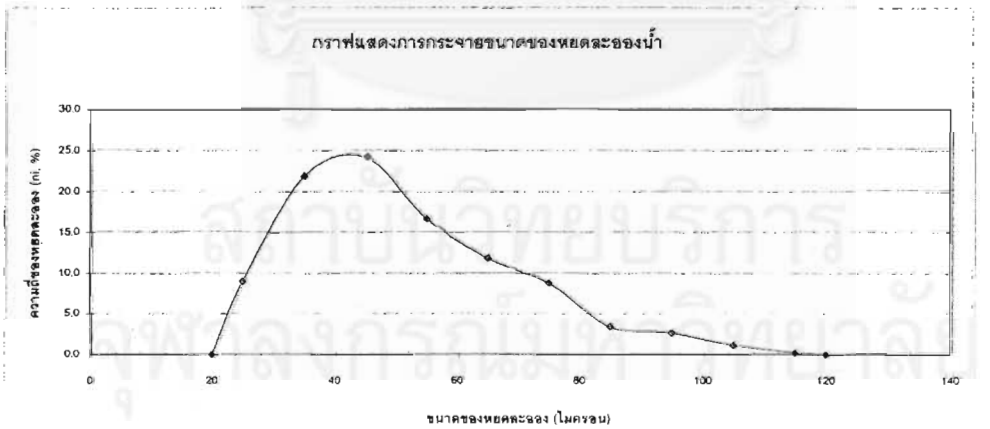
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	31.257	0	1.301	0.000	0.38170	0.000
20 - 30	25	47	9.021	9.021	225.5	26.257	6220	1.398	12.611	0.28479	0.732
30 - 40	35	114	21.881	30.902	765.8	16.257	5783	1.544	33.786	0.13866	0.421
40 -50	45	126	24.184	55.086	1088.3	6.257	947	1.653	39.982	0.02952	0.021
50 - 60	55	87	16.699	71.785	918.4	-3.743	234	1.740	29.062	-0.05763	0.055
60 - 70	65	62	11.900	83.685	773.5	-13.743	2248	1.813	21.574	-0.13018	0.202
70 - 80	75	46	8.829	92.514	662.2	-23.743	4977	1.875	16.555	-0.19233	0.327
80 - 90	85	18	3.455	95.969	293.7	-33.743	3934	1.929	6.666	-0.24669	0.210
90 - 100	95	14	2.687	98.656	255.3	-43.743	5142	1.978	5.314	-0.29499	0.234
100 - 110	105	6	1.152	99.808	120.9	-53.743	3326	2.021	2.328	-0.33846	0.132
110 - 120	115	1	0.192	100.000	22.1	-63.743	780	2.061	0.396	-0.37797	0.027
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-68.743	0	2.079	0.000	-0.39645	0.000
	Total	521	100.000		5125.7		33590		168.273		2.361

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 51.257 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.420

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 48.165 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.427



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอิเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

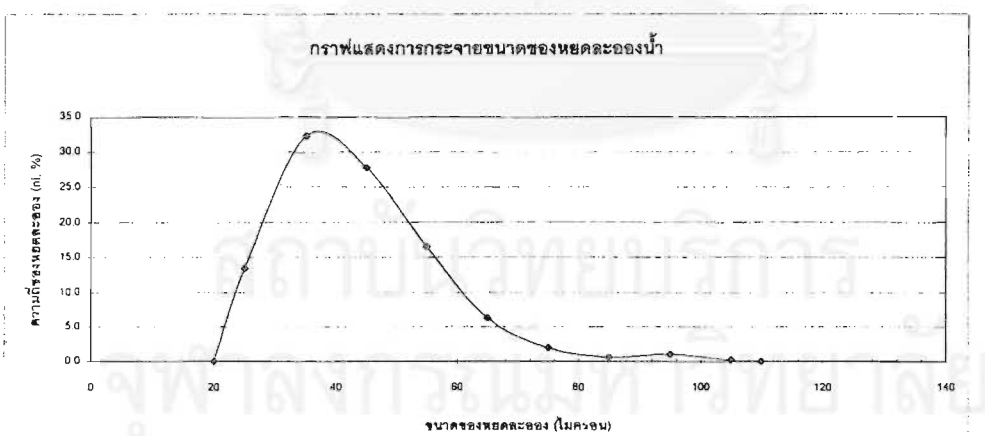
interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	23.445	0	1.301	0.000	0.31716	0.000
20 - 30	25	68	13.386	13.386	334.6	18.445	4554	1.398	18.713	0.22025	0.649
30 - 40	35	164	32.283	45.669	1129.9	8.445	2302	1.544	49.848	0.07413	0.177
40 -50	45	141	27.756	73.425	1249.0	-1.555	67	1.653	45.886	-0.03502	0.034
50 - 60	55	84	16.535	89.961	909.4	-11.555	2208	1.740	28.778	-0.12217	0.247
60 - 70	65	32	6.299	96.260	409.4	-21.555	2927	1.813	11.420	-0.19472	0.239
70 - 80	75	10	1.969	98.228	147.6	-31.555	1960	1.875	3.691	-0.25687	0.130
80 - 90	85	3	0.591	98.819	50.2	-41.555	1020	1.929	1.139	-0.31123	0.057
90 - 100	95	5	0.984	99.803	93.5	-51.555	2616	1.978	1.947	-0.35953	0.127
100 - 110	105	1	0.197	100.000	20.7	-61.555	746	2.021	0.398	-0.40300	0.032
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-66.555	0	2.041	0.000	-0.42320	0.000
	Total	508	100.000		4344.5		18400		161.819		1.593

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 43.445 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 13.633

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 41.514 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}$ = 1.351



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 47.17 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

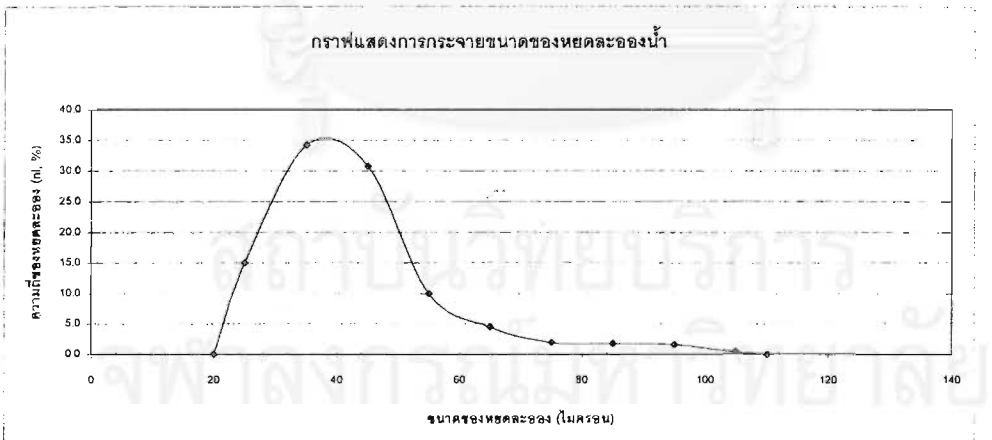
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	22.731	0	1.301	0.000	0.30776	0.000
20 - 30	25	78	15.000	15.000	375.0	17.731	4716	1.398	20.969	0.21085	0.667
30 - 40	35	178	34.231	49.231	1198.1	7.731	2046	1.544	52.855	0.06473	0.143
40 -50	45	160	30.769	80.000	1384.6	-2.269	158	1.653	50.868	-0.04442	0.061
50 - 60	55	52	10.000	90.000	550.0	-12.269	1505	1.740	17.404	-0.13157	0.173
60 - 70	65	23	4.423	94.423	287.5	-22.269	2193	1.813	8.019	-0.20412	0.184
70 - 80	75	10	1.923	96.346	144.2	-32.269	2003	1.875	3.606	-0.26627	0.136
80 - 90	85	9	1.731	98.077	147.1	-42.269	3092	1.929	3.339	-0.32062	0.178
90 - 100	95	8	1.538	99.615	146.2	-52.269	4203	1.978	3.043	-0.36893	0.209
100 - 110	105	2	0.385	100.000	40.4	-62.269	1491	2.021	0.777	-0.41240	0.065
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.269	0	2.041	0.000	-0.43260	0.000
	Total	520	100.000		4273.1		21408		160.879		1.817

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.731 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 14.705

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 40.625 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.366



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	47.17	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

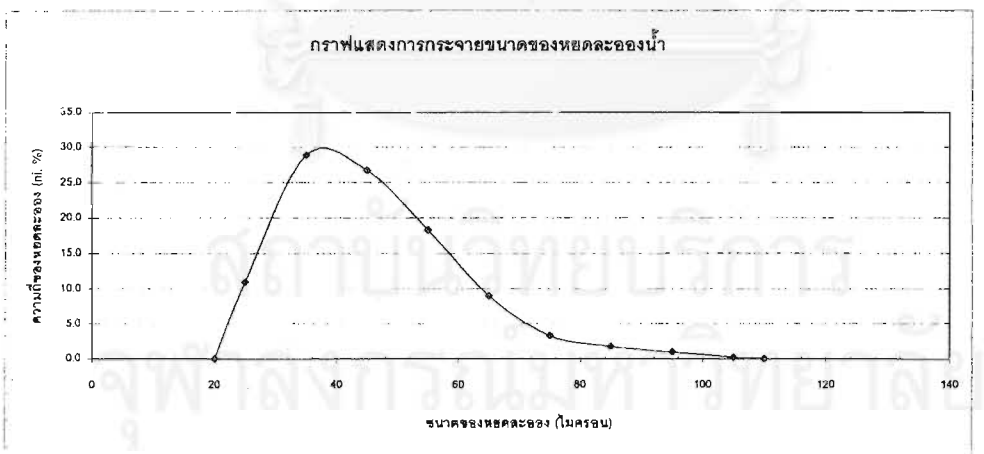
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	25.858	0	1.301	0.000	0.33920	0.000
20 - 30	25	56	10.916	10.916	272.9	20.858	4749	1.398	15.260	0.24229	0.641
30 - 40	35	148	28.850	39.766	1009.7	10.858	3401	1.544	44.546	0.09616	0.267
40 -50	45	137	26.706	66.472	1201.8	0.858	20	1.653	44.150	-0.01239	0.005
50 - 60	55	94	18.324	84.795	1007.8	-9.142	1532	1.740	31.890	-0.10014	0.184
60 - 70	65	46	8.967	93.762	582.8	-19.142	3286	1.813	16.256	-0.17269	0.267
70 - 80	75	17	3.314	97.076	248.5	-29.142	2814	1.875	6.214	-0.23484	0.183
80 - 90	85	9	1.754	98.830	149.1	-39.142	2688	1.929	3.385	-0.28919	0.147
90 - 100	95	5	0.975	99.805	92.6	-49.142	2354	1.978	1.928	-0.33750	0.111
100 - 110	105	1	0.195	100.000	20.5	-59.142	682	2.021	0.394	-0.38096	0.028
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-64.142	0	2.041	0.000	-0.40117	0.000
	Total	513	100.000		4585.8		21525		164.023		1.832

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.858 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.745

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.674 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.368



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

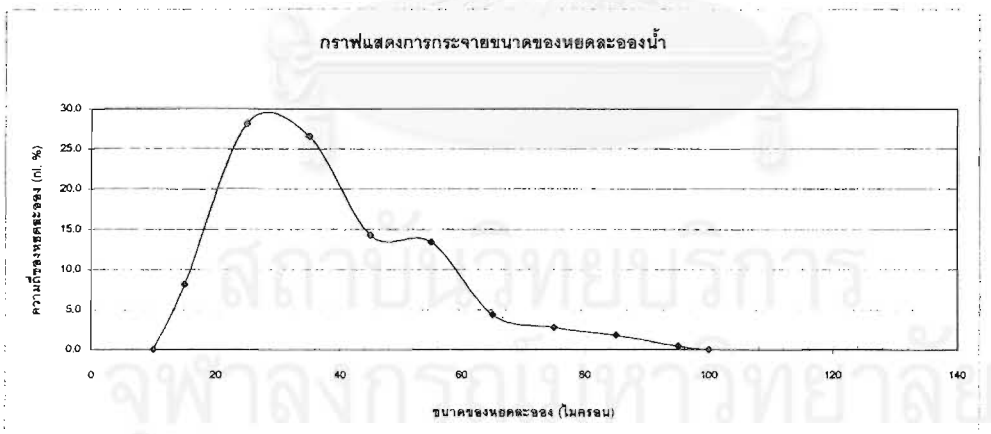
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.234	0	1.000	0.000	0.54457	0.000
10 - 20	15	41	8.135	8.135	122.0	23.234	4391	1.176	9.567	0.36848	1.105
20 - 30	25	142	28.175	36.310	704.4	13.234	4935	1.398	39.386	0.14663	0.606
30 - 40	35	134	26.587	62.897	930.6	3.234	278	1.544	41.053	0.00050	0.000
40 -50	45	72	14.286	77.183	642.9	-6.766	654	1.653	23.617	-0.10864	0.169
50 - 60	55	68	13.492	90.675	742.1	-16.766	3793	1.740	23.481	-0.19579	0.517
60 - 70	65	22	4.365	95.040	283.7	-26.766	3127	1.813	7.914	-0.26834	0.314
70 - 80	75	14	2.778	97.817	208.3	-36.766	3755	1.875	5.209	-0.33049	0.303
80 - 90	85	9	1.786	99.603	151.8	-46.766	3905	1.929	3.445	-0.38485	0.264
90 - 100	95	2	0.397	100.000	37.7	-56.766	1279	1.978	0.785	-0.43315	0.074
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.766	0	2.000	0.000	-0.45543	0.000
	Total	504	100.000		3823.4		26117		154.457		3.353

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.234 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 16.242

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.041 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.528



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

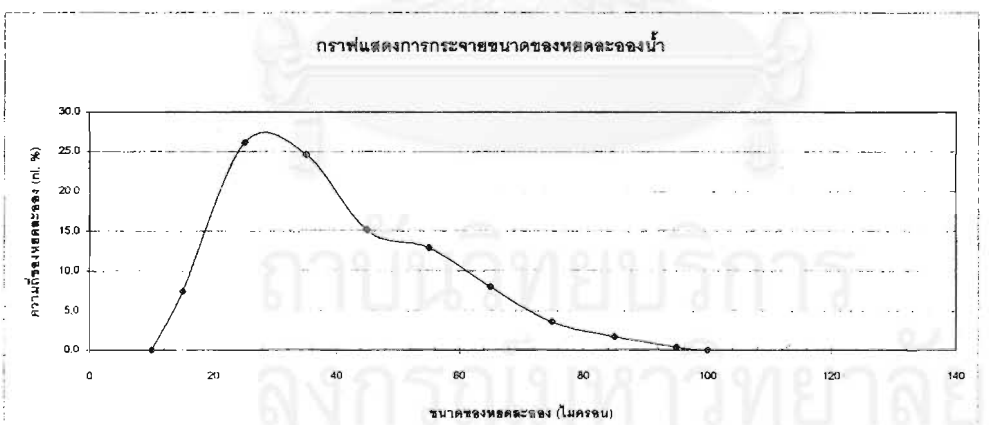
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.943	0	1.000	0.000	0.56223	0.000
10 - 20	15	39	7.443	7.443	111.6	24.943	4630	1.176	8.753	0.38614	1.110
20 - 30	25	137	26.145	33.588	653.6	14.943	5838	1.398	36.549	0.16429	0.706
30 - 40	35	129	24.618	58.206	861.6	4.943	601	1.544	38.012	0.01816	0.008
40 - 50	45	79	15.076	73.282	678.4	-5.057	386	1.653	24.924	-0.09098	0.125
50 - 60	55	68	12.977	86.260	713.7	-15.057	2942	1.740	22.585	-0.17813	0.412
60 - 70	65	42	8.015	94.275	521.0	-25.057	5033	1.813	14.531	-0.25069	0.504
70 - 80	75	19	3.626	97.901	271.9	-35.057	4456	1.875	6.799	-0.31283	0.355
80 - 90	85	9	1.718	99.618	146.0	-45.057	3487	1.929	3.314	-0.36719	0.232
90 - 100	95	2	0.382	100.000	36.3	-55.057	1157	1.978	0.755	-0.41550	0.066
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.057	0	2.000	0.000	-0.43777	0.000
	Total	524	100.000		3994.3		28530		156.223		3.516

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.943 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 16.976

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.495 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.543



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	53.08	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

ชนิดที่ 3 (เส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นผิวที่ทำให้เกิดละอองเท่ากับ 16 มิลลิเมตร)

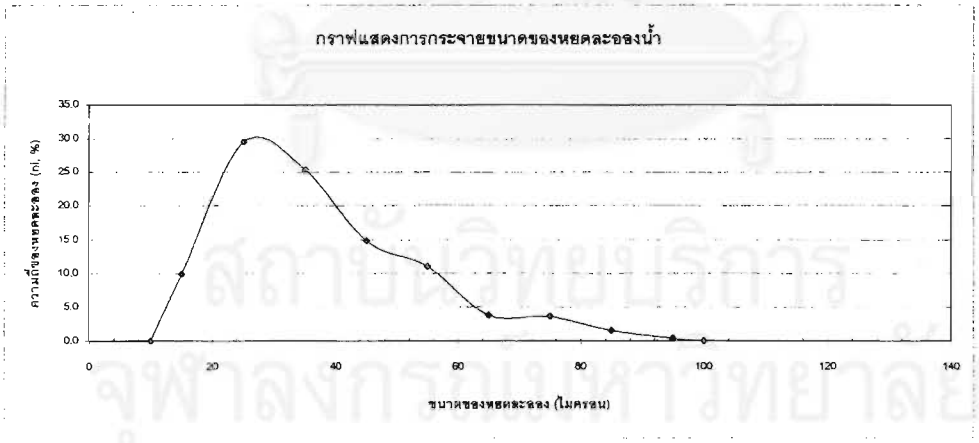
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i/%	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.343	0	1.000	0.000	0.53212	0.000
10 - 20	15	52	9.905	9.905	148.6	22.343	4944	1.176	11.649	0.35603	1.256
20 - 30	25	155	29.524	39.429	738.1	12.343	4498	1.398	41.273	0.13418	0.532
30 - 40	35	133	25.333	64.762	886.7	2.343	139	1.544	39.116	-0.01194	0.004
40 -50	45	78	14.857	79.619	668.6	-7.657	871	1.653	24.562	-0.12109	0.218
50 - 60	55	58	11.048	90.667	607.6	-17.657	3444	1.740	19.227	-0.20824	0.479
60 - 70	65	20	3.810	94.476	247.6	-27.657	2914	1.813	6.906	-0.28079	0.300
70 - 80	75	19	3.619	98.095	271.4	-37.657	5132	1.875	6.786	-0.34294	0.426
80 - 90	85	8	1.524	99.619	129.5	-47.657	3461	1.929	2.940	-0.39729	0.241
90 - 100	95	2	0.381	100.000	36.2	-57.657	1266	1.978	0.753	-0.44560	0.076
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.657	0	2.000	0.000	-0.46788	0.000
	Total	525	100.000		3734.3		26670		153.212		3.530

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.343 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.413

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 34.051 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.545



อิทธิพลของชนิดของของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

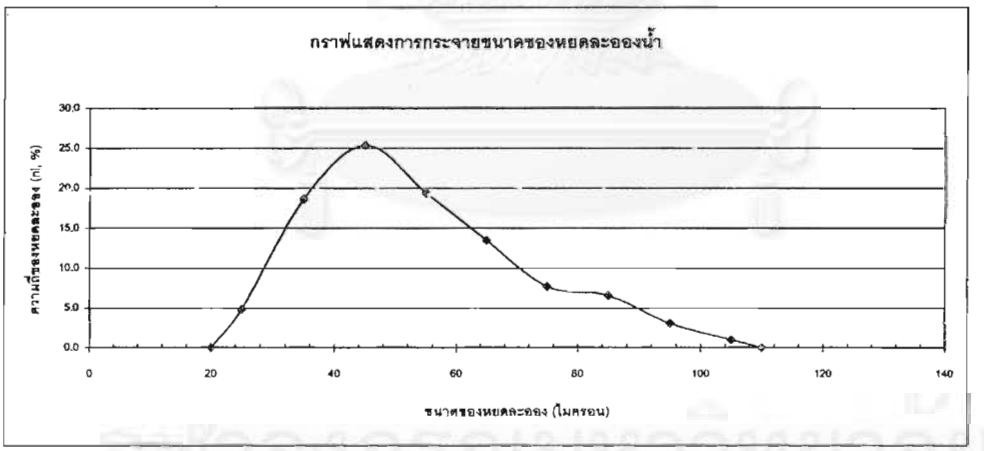
Interval, µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.846	0	1.301	0.000	0.40662	0.000
20 - 30	25	25	4.808	4.808	120.2	28.846	4000	1.398	6.721	0.30971	0.461
30 - 40	35	97	18.654	23.462	652.9	18.846	6625	1.544	28.803	0.16359	0.499
40 -50	45	132	25.385	48.846	1142.3	8.846	1986	1.653	41.966	0.05444	0.075
50 - 60	55	101	19.423	68.269	1068.3	-1.154	26	1.740	33.803	-0.03271	0.021
60 - 70	65	70	13.462	81.731	875.0	-11.154	1675	1.813	24.405	-0.10526	0.149
70 - 80	75	40	7.692	89.423	576.9	-21.154	3442	1.875	14.424	-0.16741	0.216
80 - 90	85	34	6.538	95.962	555.8	-31.154	6346	1.929	12.615	-0.22177	0.322
90 - 100	95	16	3.077	99.038	292.3	-41.154	5211	1.978	6.085	-0.27007	0.224
100 - 110	105	5	0.962	100.000	101.0	-51.154	2516	2.021	1.943	-0.31354	0.095
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-56.154	0	2.041	0.000	-0.33374	0.000
	Total	520	100.000		5384.6		31828		170.765		2.062

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 53.846 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.930

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.010 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.394



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

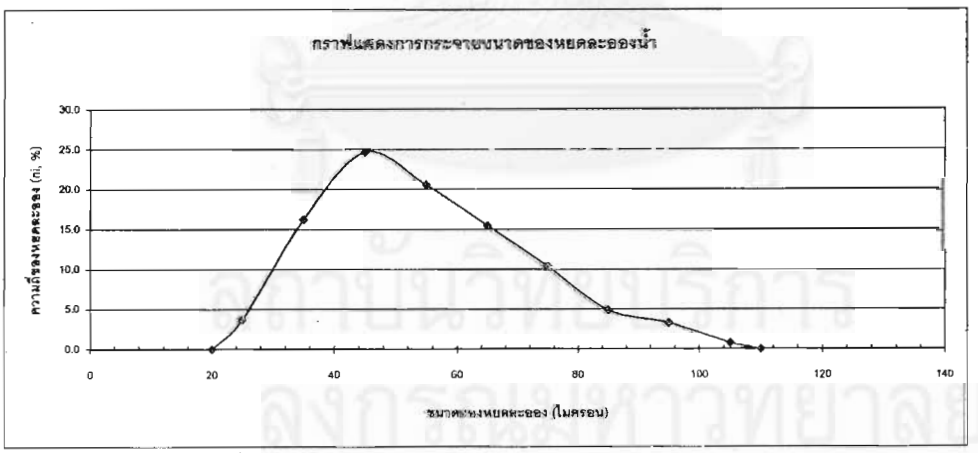
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	34.980	0	1.301	0.000	0.41776	0.000
20 - 30	25	19	3.718	3.718	93.0	29.980	3342	1.398	5.198	0.32085	0.383
30 - 40	35	83	16.243	19.961	568.5	19.980	6484	1.544	25.080	0.17472	0.496
40 -50	45	126	24.658	44.618	1109.6	9.980	2456	1.653	40.764	0.06558	0.106
50 - 60	55	105	20.548	65.166	1130.1	-0.020	0	1.740	35.761	-0.02157	0.010
60 - 70	65	79	15.460	80.626	1004.9	-10.020	1552	1.813	28.027	-0.09412	0.137
70 - 80	75	53	10.372	90.998	777.9	-20.020	4157	1.875	19.448	-0.15627	0.253
80 - 90	85	25	4.892	95.890	415.9	-30.020	4409	1.929	9.439	-0.21063	0.217
90 - 100	95	17	3.327	99.217	316.0	-40.020	5328	1.978	6.580	-0.25893	0.223
100 - 110	105	4	0.783	100.000	82.2	-50.020	1958	2.021	1.582	-0.30240	0.072
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-55.020	0	2.041	0.000	-0.32260	0.000
	Total	511	100.000		5498.0		29687		171.879		1.896

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 54.980 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 17.317

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 52.335 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.375



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 1

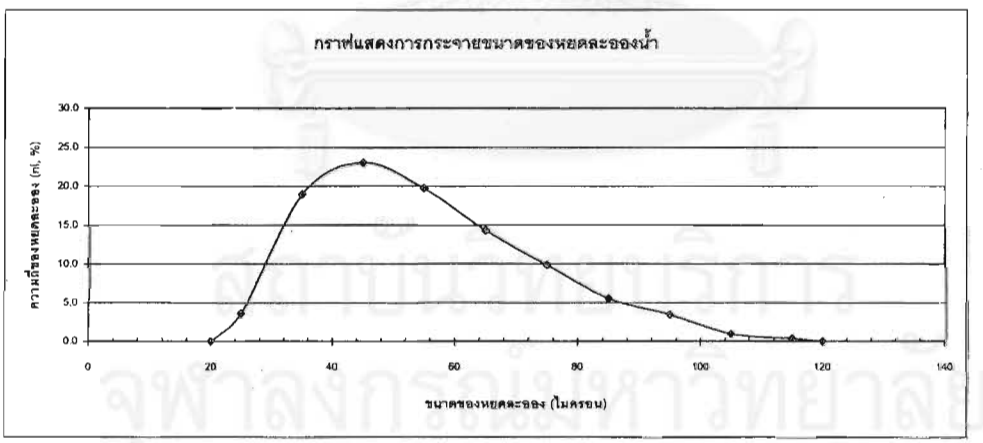
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	35.000	0	1.301	0.000	0.41598	0.000
20 - 30	25	19	3.675	3.675	91.9	30.000	3308	1.398	5.137	0.31907	0.374
30 - 40	35	98	18.956	22.631	663.4	20.000	7562	1.544	29.269	0.17294	0.567
40 -50	45	119	23.017	45.648	1035.8	10.000	2302	1.653	38.053	0.06379	0.094
50 - 60	55	102	19.729	65.377	1085.1	0.000	0	1.740	34.336	-0.02336	0.011
60 - 70	65	74	14.313	79.691	930.4	-10.000	1431	1.813	25.949	-0.09591	0.132
70 - 80	75	51	9.865	89.555	739.8	-20.000	3946	1.875	18.497	-0.15806	0.246
80 - 90	85	29	5.609	95.164	476.8	-30.000	5048	1.929	10.823	-0.21241	0.253
90 - 100	95	18	3.482	98.646	330.8	-40.000	5571	1.978	6.886	-0.26072	0.237
100 - 110	105	5	0.967	99.613	101.5	-50.000	2418	2.021	1.955	-0.30418	0.089
110 - 120	115	2	0.387	100.000	44.5	-60.000	1393	2.061	0.797	-0.34369	0.046
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-65.000	0	2.079	0.000	-0.36218	0.000
	Total	517	100.000		5500.0		32998		171.701		2.048

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 55.000 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.257

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 52.120 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_i - \log d_g)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.393



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

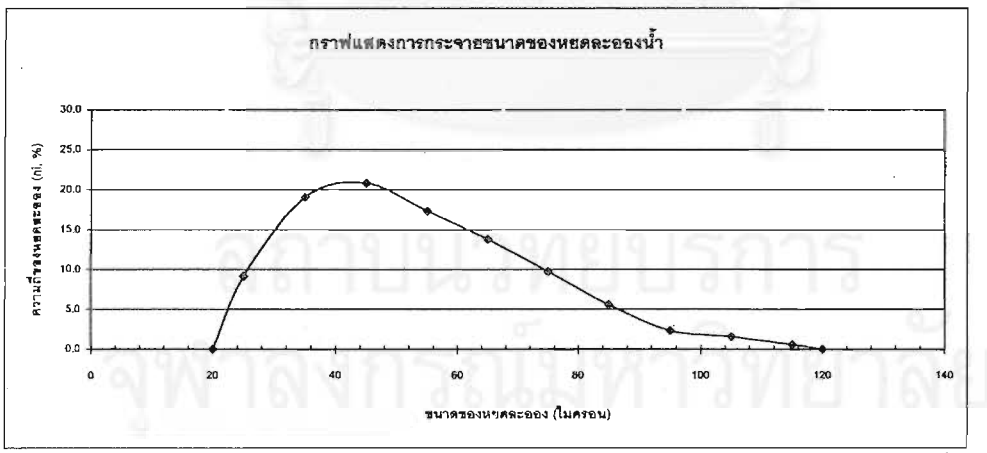
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.444	0	1.301	0.000	0.39803	0.000
20 - 30	25	47	9.144	9.144	228.6	28.444	7398	1.398	12.783	0.30112	0.829
30 - 40	35	98	19.066	28.210	667.3	18.444	6486	1.544	29.439	0.15499	0.458
40 -50	45	107	20.817	49.027	936.8	8.444	1484	1.653	34.415	0.04584	0.044
50 - 60	55	89	17.315	66.342	952.3	-1.556	42	1.740	30.135	-0.04131	0.030
60 - 70	65	71	13.813	80.156	897.9	-11.556	1845	1.813	25.042	-0.11386	0.179
70 - 80	75	50	9.728	89.883	729.6	-21.556	4520	1.875	18.240	-0.17600	0.301
80 - 90	85	29	5.642	95.525	479.6	-31.556	5618	1.929	10.886	-0.23036	0.299
90 - 100	95	12	2.335	97.860	221.8	-41.556	4032	1.978	4.617	-0.27867	0.181
100 - 110	105	8	1.556	99.416	163.4	-51.556	4137	2.021	3.146	-0.32213	0.162
110 - 120	115	3	0.584	100.000	67.1	-61.556	2212	2.061	1.203	-0.36164	0.076
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-66.556	0	2.079	0.000	-0.38012	0.000
	Total	514	100.000		5344.4		37773		169.906		2.559

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 53.444 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 19.533

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 50.010 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.448



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

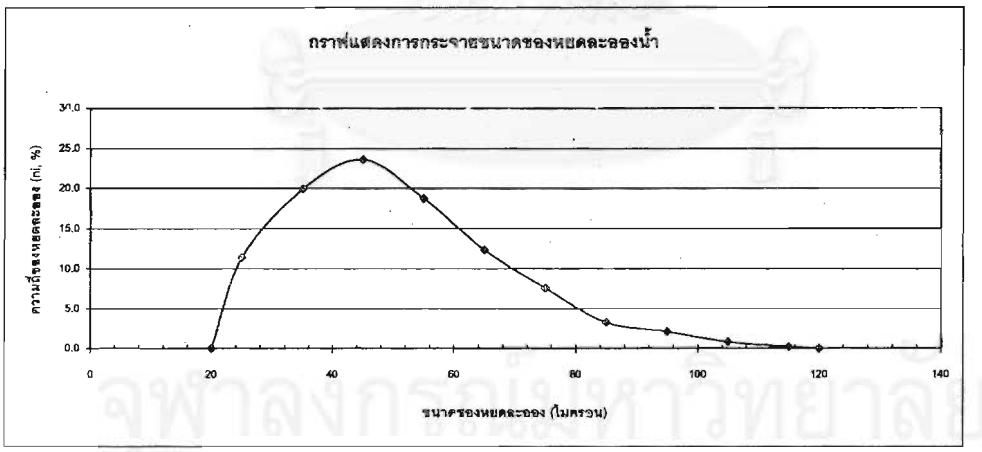
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.319	0	1.301	0.000	0.37378	0.000
20 - 30	25	59	11.412	11.412	285.3	25.319	7316	1.398	15.953	0.27687	0.875
30 - 40	35	103	19.923	31.335	697.3	15.319	4675	1.544	30.762	0.13075	0.341
40 -50	45	122	23.598	54.932	1061.9	5.319	668	1.653	39.012	0.02160	0.011
50 - 60	55	97	18.762	73.694	1031.9	-4.681	411	1.740	32.653	-0.06555	0.081
60 - 70	65	64	12.379	86.074	804.6	-14.681	2668	1.813	22.442	-0.13810	0.236
70 - 80	75	39	7.544	93.617	565.8	-24.681	4595	1.875	14.145	-0.20025	0.302
80 - 90	85	17	3.288	96.905	279.5	-34.681	3955	1.929	6.344	-0.25460	0.213
90 - 100	95	11	2.128	99.033	202.1	-44.681	4248	1.978	4.208	-0.30291	0.195
100 - 110	105	4	0.774	99.807	81.2	-54.681	2313	2.021	1.564	-0.34638	0.093
110 - 120	115	1	0.193	100.000	22.2	-64.681	809	2.061	0.399	-0.38588	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.681	0	2.079	0.000	-0.40437	0.000
	Total	517	100.000		5031.9		31658		167.481		2.347

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.319 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 17.882

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 47.295 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_{ij} - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.425



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

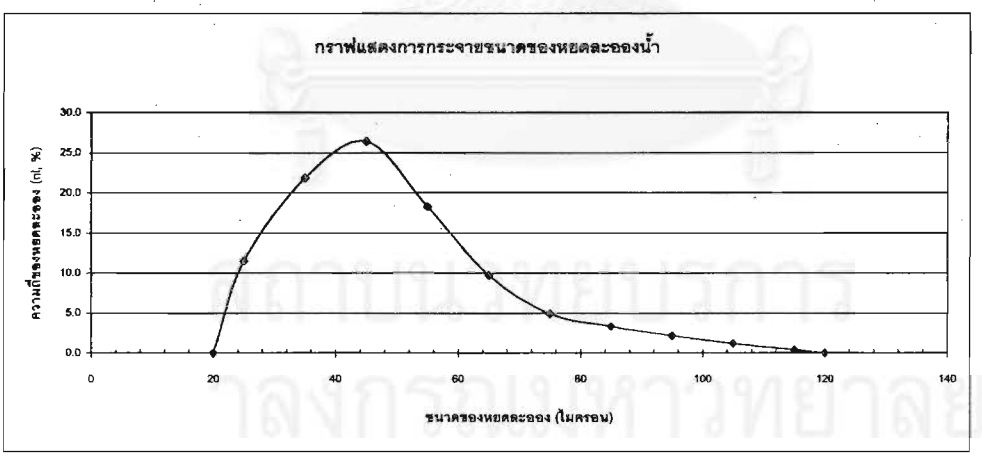
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	29.215	0	1.301	0.000	0.36384	0.000
20 - 30	25	58	11.531	11.531	288.3	24.215	6761	1.398	16.119	0.26693	0.822
30 - 40	35	110	21.869	33.400	765.4	14.215	4419	1.544	33.767	0.12081	0.319
40 -50	45	133	26.441	59.841	1189.9	4.215	470	1.653	43.713	0.01166	0.004
50 - 60	55	92	18.290	78.131	1006.0	-5.785	612	1.740	31.832	-0.07549	0.104
60 - 70	65	49	9.742	87.873	633.2	-15.785	2427	1.813	17.661	-0.14804	0.213
70 - 80	75	25	4.970	92.843	372.8	-25.785	3305	1.875	9.319	-0.21019	0.220
80 - 90	85	17	3.380	96.223	287.3	-35.785	4328	1.929	6.521	-0.26455	0.237
90 - 100	95	11	2.187	98.410	207.8	-45.785	4584	1.973	4.325	-0.31285	0.214
100 - 110	105	6	1.193	99.602	125.2	-55.785	3712	2.021	2.411	-0.35632	0.151
110 - 120	115	2	0.398	100.000	45.7	-65.785	1721	2.061	0.819	-0.39582	0.062
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-70.785	0	2.079	0.000	-0.41431	0.000
	Total	503	100.000		4921.5		32339		166.487		2.346

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 49.215 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.074

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 46.225 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.425



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

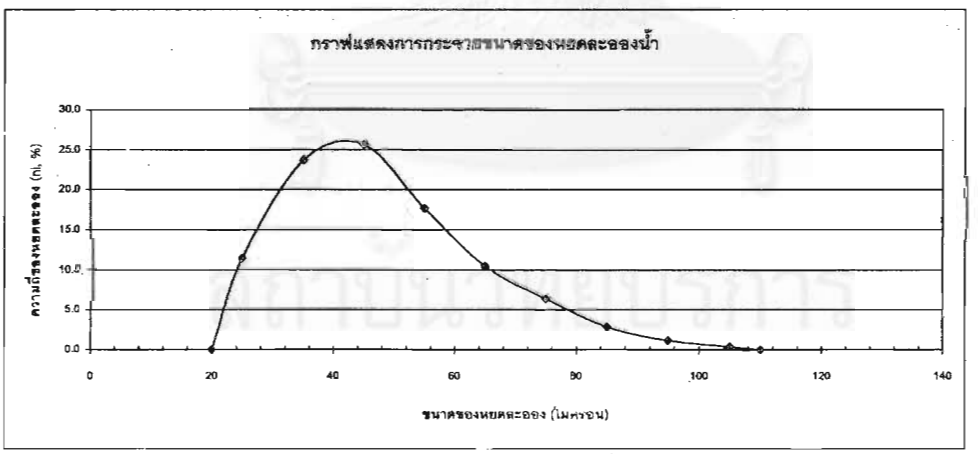
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	28.113	0	1.301	0.000	0.35671	0.000
20 - 30	25	59	11.479	11.479	287.0	23.113	6132	1.398	16.046	0.25980	0.775
30 - 40	35	122	23.735	35.214	830.7	13.113	4081	1.544	36.649	0.11367	0.307
40 -50	45	132	25.681	60.895	1155.6	3.113	249	1.653	42.456	0.00452	0.001
50 - 60	55	91	17.704	78.599	973.7	-6.887	840	1.740	30.812	-0.08263	0.121
60 - 70	65	54	10.506	89.105	682.9	-16.887	2996	1.813	19.046	-0.15518	0.253
70 - 80	75	33	6.420	95.525	481.5	-26.887	4641	1.875	12.038	-0.21733	0.303
80 - 90	85	15	2.918	98.444	248.1	-36.887	3971	1.929	5.631	-0.27168	0.215
90 - 100	95	6	1.167	99.611	110.9	-46.887	2566	1.978	2.309	-0.31999	0.120
100 - 110	105	2	0.389	100.000	40.9	-56.887	1259	2.021	0.786	-0.36345	0.051
>110	110	0	0.000	100.000	0.0	-61.887	0	2.041	0.000	-0.38366	0.000
	Total	514	100.000		4811.3		26735		165.774		2.145

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 48.113 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.433

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 45.471 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.403



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 2

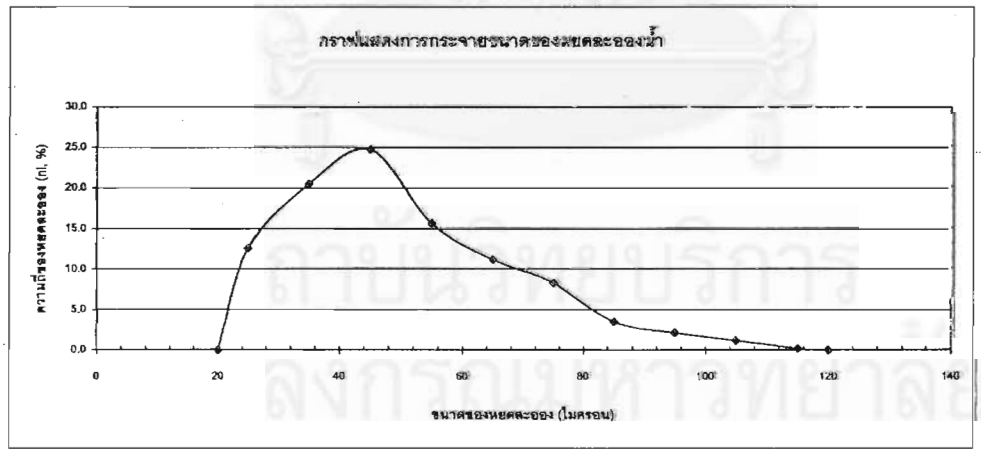
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.029	0	1.301	0.000	0.36931	0.000
20 - 30	25	65	12.573	12.573	314.3	25.029	7876	1.398	17.576	0.27240	0.933
30 - 40	35	106	20.503	33.075	717.6	15.029	4631	1.544	31.658	0.12627	0.327
40 -50	45	128	24.758	57.834	1114.1	5.029	626	1.653	40.931	0.01713	0.007
50 - 60	55	81	15.667	73.501	861.7	-4.971	387	1.740	27.267	-0.07002	0.077
60 - 70	65	58	11.219	84.720	729.2	-14.971	2514	1.813	20.338	-0.14257	0.228
70 - 80	75	43	8.317	93.037	623.8	-24.971	5186	1.875	15.595	-0.20472	0.349
80 - 90	85	18	3.482	96.518	295.9	-34.971	4258	1.929	6.718	-0.25908	0.234
90 - 100	95	11	2.128	98.646	202.1	-44.971	4303	1.978	4.208	-0.30738	0.201
100 - 110	105	6	1.161	99.807	121.9	-54.971	3507	2.021	2.346	-0.35085	0.143
110 - 120	115	1	0.193	100.000	22.2	-64.971	816	2.061	0.399	-0.39036	0.029
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.971	0	2.079	0.000	-0.40884	0.000
	Total	517	100.000		5002.9		34105		167.034		2.528

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.029 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.561

geomatric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 46.810 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.445



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 1

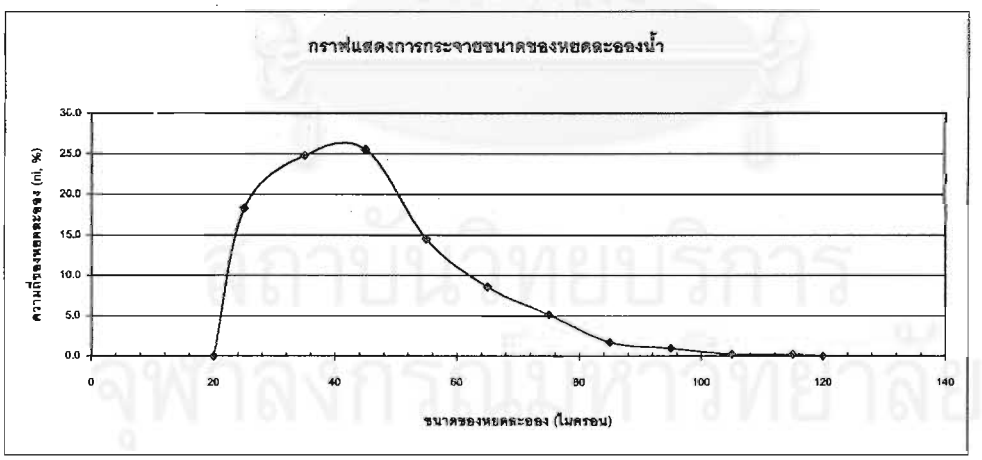
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	24.981	0	1.301	0.000	0.32544	0.000
20 - 30	25	96	18.321	18.321	458.0	19.981	7314	1.398	25.611	0.22853	0.957
30 - 40	35	130	24.809	43.130	868.3	9.981	2471	1.544	38.307	0.08241	0.168
40 -50	45	134	25.573	68.702	1150.8	-0.019	0	1.653	42.277	-0.02674	0.018
50 - 60	55	76	14.504	83.206	797.7	-10.019	1456	1.740	25.242	-0.11389	0.188
60 - 70	65	45	8.588	91.794	558.2	-20.019	3442	1.813	15.569	-0.18644	0.299
70 - 80	75	27	5.153	96.947	386.5	-30.019	4643	1.875	9.662	-0.24859	0.318
80 - 90	85	9	1.718	98.664	146.0	-40.019	2751	1.929	3.314	-0.30295	0.158
90 - 100	95	5	0.954	99.618	90.6	-50.019	2387	1.978	1.887	-0.35125	0.118
100 - 110	105	1	0.191	99.809	20.0	-60.019	687	2.021	0.386	-0.39472	0.030
110 - 120	115	1	0.191	100.000	21.9	-70.019	936	2.061	0.393	-0.43422	0.036
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-75.019	0	2.079	0.000	-0.45271	0.000
	Total	524	100.000		4498.1		26088		162.647		2.290

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 44.981 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 16.233

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.313 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.419



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

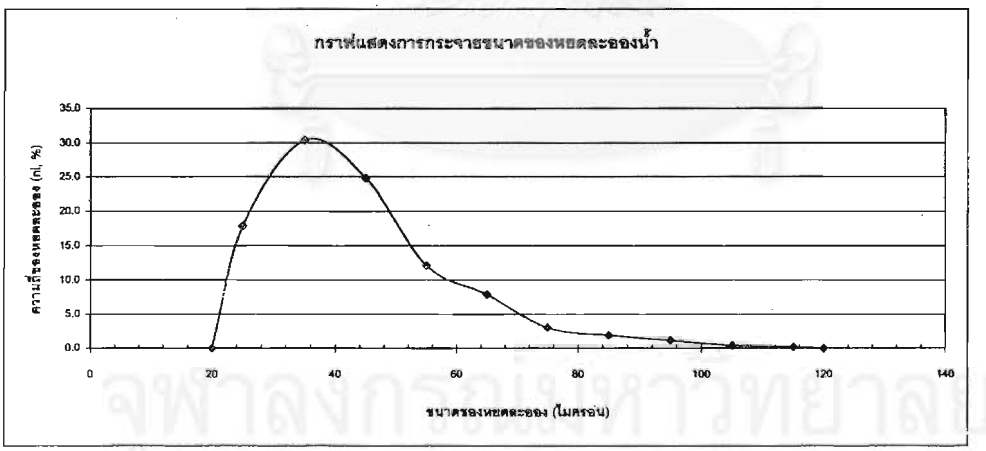
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	23.805	0	1.301	0.000	0.31452	0.000
20 - 30	25	93	17.919	17.919	448.0	18.805	6337	1.398	25.050	0.21761	0.849
30 - 40	35	158	30.443	48.362	1065.5	8.805	2360	1.544	47.006	0.07149	0.156
40 -50	45	129	24.855	73.218	1118.5	-1.195	35	1.653	41.091	-0.03766	0.035
50 - 60	55	63	12.139	85.356	667.6	-11.195	1521	1.740	21.126	-0.12481	0.189
60 - 70	65	41	7.900	93.256	513.5	-21.195	3549	1.813	14.322	-0.19736	0.308
70 - 80	75	16	3.083	96.339	231.2	-31.195	3000	1.875	5.781	-0.25951	0.208
80 - 90	85	10	1.927	98.266	163.8	-41.195	3270	1.929	3.718	-0.31387	0.190
90 - 100	95	6	1.156	99.422	109.8	-51.195	3030	1.978	2.286	-0.36217	0.152
100 - 110	105	2	0.385	99.807	40.5	-61.195	1443	2.021	0.779	-0.40564	0.063
110 - 120	115	1	0.193	100.000	22.2	-71.195	977	2.061	0.397	-0.44514	0.038
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-76.195	0	2.079	0.000	-0.46363	0.000
	Total	519	100.000		4380.5		25522		161.555		2.187

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 43.805 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 16.056

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 41.262 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.408



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $1.01*10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 1

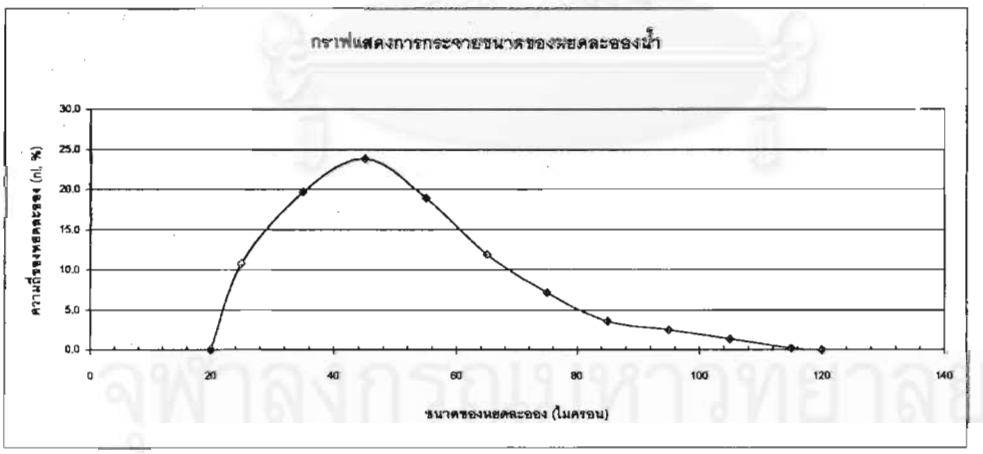
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	30.909	0	1.301	0.000	0.37823	0.000
20 - 30	25	57	10.795	10.795	269.9	25.909	7247	1.398	15.091	0.28132	0.854
30 - 40	35	104	19.697	30.492	689.4	15.909	4985	1.544	30.413	0.13520	0.360
40 -50	45	126	23.864	54.356	1073.9	5.909	833	1.653	39.452	0.02605	0.016
50 - 60	55	100	18.939	73.295	1041.7	-4.091	317	1.740	32.961	-0.06110	0.071
60 - 70	65	63	11.932	85.227	775.6	-14.091	2369	1.813	21.631	-0.13365	0.213
70 - 80	75	38	7.197	92.424	539.8	-24.091	4177	1.875	13.495	-0.19580	0.276
80 - 90	85	19	3.598	96.023	305.9	-34.091	4182	1.929	6.943	-0.25016	0.225
90 - 100	95	13	2.462	98.485	233.9	-44.091	4786	1.978	4.869	-0.29846	0.219
100 - 110	105	7	1.326	99.811	139.2	-54.091	3879	2.021	2.680	-0.34193	0.155
110 - 120	115	1	0.189	100.000	21.8	-64.091	776	2.061	0.390	-0.38143	0.028
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-69.091	0	2.079	0.000	-0.39992	0.000
	Total	528	100.000		5090.9		33554		167.926		2.390

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.909 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]^{1/2}$ = 18.410

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 47.782 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.430



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $1.01*10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

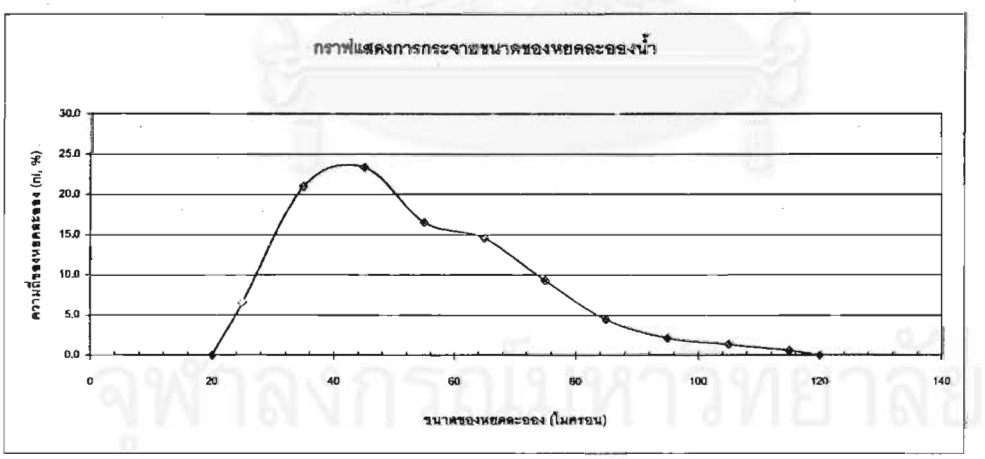
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	33.035	0	1.301	0.000	0.39749	0.000
20 - 30	25	34	6.615	6.615	165.4	28.035	5199	1.398	9.247	0.30058	0.598
30 - 40	35	108	21.012	27.626	735.4	18.035	6834	1.544	32.443	0.15445	0.501
40 -50	45	120	23.346	50.973	1050.6	8.035	1507	1.653	38.596	0.04531	0.048
50 - 60	55	85	16.537	67.510	909.5	-1.965	64	1.740	28.780	-0.04184	0.029
60 - 70	65	75	14.591	82.101	948.4	-11.965	2089	1.813	26.453	-0.11439	0.191
70 - 80	75	48	9.339	91.440	700.4	-21.965	4505	1.875	17.510	-0.17654	0.291
80 - 90	85	23	4.475	95.914	380.4	-31.965	4572	1.929	8.634	-0.23090	0.239
90 - 100	95	11	2.140	98.054	203.3	-41.965	3769	1.978	4.232	-0.27920	0.167
100 - 110	105	7	1.362	99.416	143.0	-51.965	3678	2.021	2.753	-0.32267	0.142
110 - 120	115	3	0.584	100.000	67.1	-61.965	2241	2.061	1.203	-0.36218	0.077
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-66.965	0	2.079	0.000	-0.38066	0.000
	Total	514	100.000		5303.5		34458		169.852		2.281

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 53.035 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 18.656

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 49.948 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.418



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $3.2*10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 1

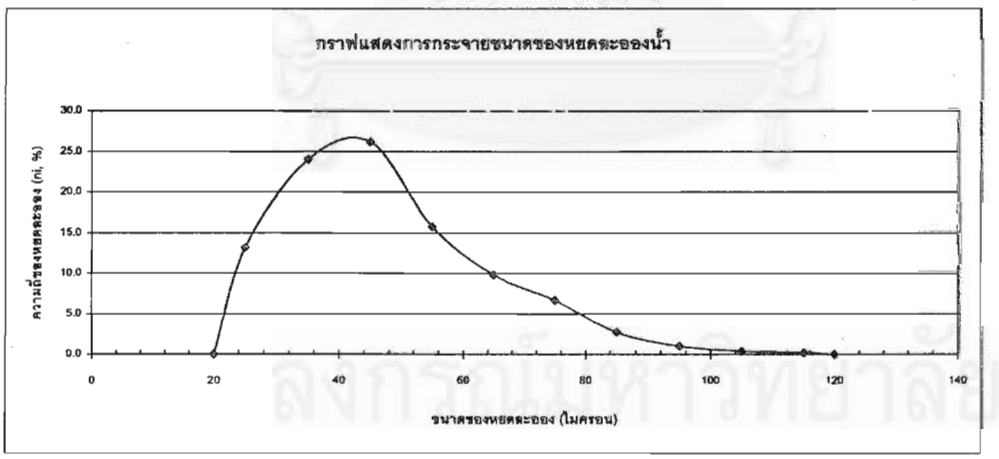
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<20	20	0	0.000	0.000	0.0	27.480	0	1.301	0.000	0.34965	0.000
20 - 30	25	67	13.189	13.189	329.7	22.480	6665	1.398	18.437	0.25274	0.842
30 - 40	35	122	24.016	37.205	840.6	12.480	3741	1.544	37.082	0.10661	0.273
40 -50	45	133	26.181	63.386	1178.1	2.480	161	1.653	43.283	-0.00253	0.000
50 - 60	55	80	15.748	79.134	866.1	-7.520	890	1.740	27.407	-0.08968	0.127
60 - 70	65	50	9.843	88.976	639.8	-17.520	3021	1.813	17.844	-0.16223	0.259
70 - 80	75	34	6.693	95.669	502.0	-27.520	5069	1.875	12.550	-0.22438	0.337
80 - 90	85	14	2.756	98.425	234.3	-37.520	3880	1.929	5.317	-0.27874	0.214
90 - 100	95	5	0.984	99.409	93.5	-47.520	2223	1.978	1.947	-0.32704	0.105
100 - 110	105	2	0.394	99.803	41.3	-57.520	1303	2.021	0.796	-0.37051	0.054
110 - 120	115	1	0.197	100.000	22.6	-67.520	897	2.061	0.406	-0.41002	0.033
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-72.520	0	2.079	0.000	-0.42850	0.000
	Total	508	100.000		4748.0		27849		165.068		2.212

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 47.480 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.772

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 44.738 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.411



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด : 34.53 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

กำลังไฟฟ้า : 4.12 วัตต์

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $3.2*10^{-4}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ครั้งที่ทำการวัด : 2

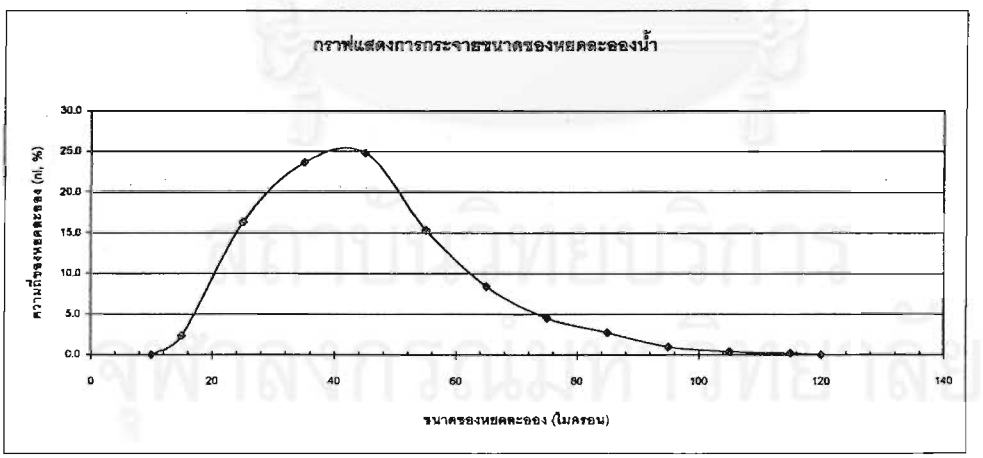
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	35.217	0	1.000	0.000	0.62440	0.000
10 -20	15	12	2.367	2.367	35.5	30.217	2161	1.176	2.784	0.44830	0.476
20 - 30	25	83	16.371	18.738	409.3	20.217	6691	1.398	22.885	0.22646	0.840
30 - 40	35	120	23.669	42.406	828.4	10.217	2471	1.544	36.546	0.08033	0.153
40 -50	45	126	24.852	67.258	1118.3	0.217	1	1.653	41.086	-0.02882	0.021
50 - 60	55	78	15.385	82.643	846.2	-9.783	1472	1.740	26.775	-0.11597	0.207
60 - 70	65	43	8.481	91.124	551.3	-19.783	3319	1.813	15.376	-0.18852	0.301
70 - 80	75	23	4.536	95.661	340.2	-29.783	4024	1.875	8.506	-0.25067	0.285
80 - 90	85	14	2.761	98.422	234.7	-39.783	4370	1.929	5.328	-0.30502	0.257
90 - 100	95	5	0.986	99.408	93.7	-49.783	2444	1.978	1.950	-0.35333	0.123
100 - 110	105	2	0.394	99.803	41.4	-59.783	1410	2.021	0.797	-0.39679	0.062
110 - 120	115	1	0.197	100.000	22.7	-69.783	960	2.061	0.406	-0.43630	0.038
>120	120	0	0.000	100.000	0.0	-74.783	0	2.079	0.000	-0.45479	0.000
	Total	507	100.000		4521.7		29325		162.440		2.762

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.217 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 17.211

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.111 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.469



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $1.28*10^{-3}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

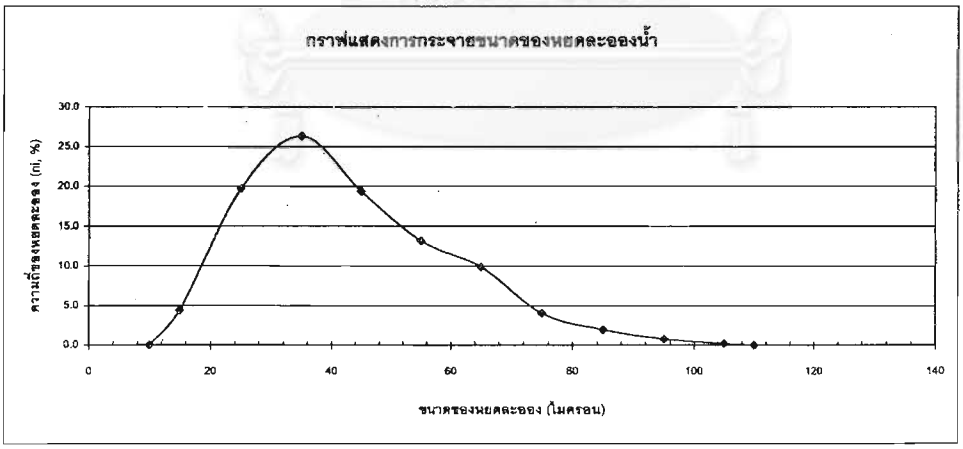
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.868	0	1.000	0.000	0.59760	0.000
10 - 20	15	23	4.457	4.457	66.9	27.868	3462	1.176	5.242	0.42151	0.792
20 - 30	25	102	19.767	24.225	494.2	17.868	6311	1.398	27.634	0.19966	0.788
30 - 40	35	136	26.357	50.581	922.5	7.868	1632	1.544	40.696	0.05353	0.076
40 -50	45	100	19.380	69.961	872.1	-2.132	88	1.653	32.039	-0.05562	0.060
50 - 60	55	68	13.178	83.140	724.8	-12.132	1940	1.740	22.935	-0.14277	0.269
60 - 70	65	51	9.884	93.023	642.4	-22.132	4841	1.813	17.918	-0.21532	0.458
70 - 80	75	21	4.070	97.093	305.2	-32.132	4202	1.875	7.631	-0.27746	0.313
80 - 90	85	10	1.938	99.031	164.7	-42.132	3440	1.929	3.739	-0.33182	0.213
90 - 100	95	4	0.775	99.806	73.6	-52.132	2107	1.978	1.533	-0.38013	0.112
100 - 110	105	1	0.194	100.000	20.3	-62.132	748	2.021	0.392	-0.42359	0.035
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-67.132	0	2.041	0.000	-0.44380	0.000
	Total	516	100.000		4286.8		28770		159.760		3.116

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 42.868 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 17.047

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 39.591 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.505



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิคเป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ความถี่ของหัวฉีด	:	34.53	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	0.022	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
กำลังไฟฟ้า	:	4.12	วัตต์
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ + สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้น $1.28*10^{-3}$ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

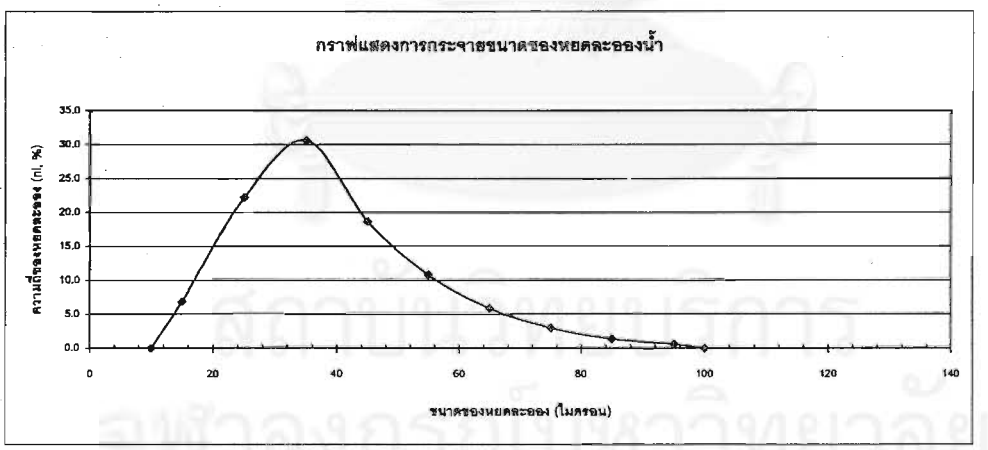
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.420	0	1.000	0.000	0.56136	0.000
10 - 20	15	35	6.876	6.876	103.1	24.420	4101	1.176	8.087	0.38527	1.021
20 - 30	25	113	22.200	29.077	555.0	14.420	4617	1.398	31.035	0.16342	0.593
30 - 40	35	156	30.648	59.725	1072.7	4.420	599	1.544	47.323	0.01729	0.009
40 -50	45	95	18.664	78.389	839.9	-5.580	581	1.653	30.856	-0.09185	0.157
50 - 60	55	55	10.806	89.194	594.3	-15.580	2623	1.740	18.805	-0.17900	0.346
60 - 70	65	30	5.894	95.088	383.1	-25.580	3856	1.813	10.685	-0.25155	0.373
70 - 80	75	15	2.947	98.035	221.0	-35.580	3731	1.875	5.526	-0.31370	0.290
80 - 90	85	7	1.375	99.411	116.9	-45.580	2857	1.929	2.653	-0.36806	0.186
90 - 100	95	3	0.589	100.000	56.0	-55.580	1821	1.978	1.166	-0.41636	0.102
>100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.580	0	2.000	0.000	-0.43864	0.000
	Total	509	100.000		3942.0		24785		156.136		3.078

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.420 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.822

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.422 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.501



ผลการวัดการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิทธิพลของเรโซเนเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

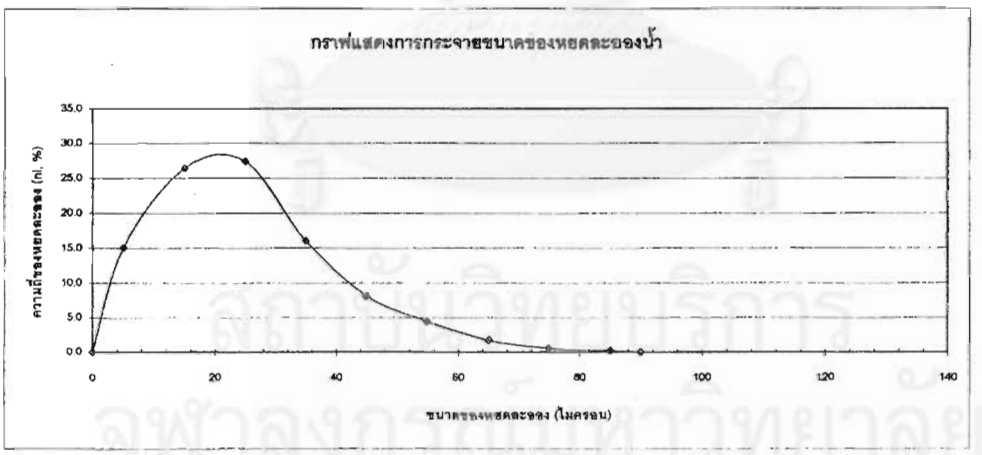
Interval,µm	Mid-point d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.000	0	0.000	0.000	1.30433	0.000
0 - 10	5	78	15.058	15.058	75.3	20.000	6023	0.699	10.525	0.60536	5.518
10 - 20	15	137	26.448	41.506	396.7	10.000	2645	1.176	31.105	0.12824	0.435
20 - 30	25	142	27.413	68.919	685.3	0.000	0	1.398	38.322	-0.09361	0.240
30 - 40	35	83	16.023	84.942	560.8	-10.000	1602	1.544	24.741	-0.23974	0.921
40 -50	45	42	8.108	93.050	364.9	-20.000	3243	1.653	13.404	-0.34888	0.987
50 - 60	55	23	4.440	97.490	244.2	-30.000	3996	1.740	7.727	-0.43603	0.844
60 - 70	65	9	1.737	99.228	112.9	-40.000	2780	1.813	3.150	-0.50858	0.449
70 - 80	75	3	0.579	99.807	43.4	-50.000	1448	1.875	1.086	-0.57073	0.189
80 - 90	85	1	0.193	100.000	16.4	-60.000	695	1.929	0.372	-0.62509	0.075
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.000	0	1.954	0.000	-0.64991	0.000
	Total	518	100.000		2500.0		22432		130.433		9.659

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.000 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 15.053

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.153 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 2.053



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	ไม่มีเรโซเนเตอร์	
ความถี่ของหัวฉีด	:	ไม่มีค่าความถี่	
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

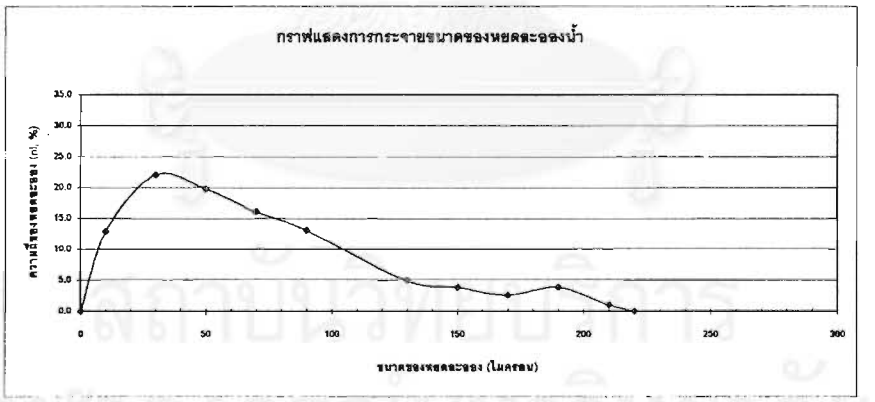
min	max	Interval,µm	Midpoint d	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i) \times n_i$	log d_i	n log d_i	$\log d_{i+1} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i) \times n_i$
0	0	< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	66.904	0	0.000	0.000	1.69887	0.000
0	20	0 - 10	10	63	12.831	12.831	128.3	56.904	41548	1.000	12.831	0.69887	6.267
20	40	10 - 20	30	108	21.996	34.827	659.9	36.904	29957	1.477	32.491	0.22175	1.082
40	60	20 - 30	50	97	19.756	54.582	987.8	16.904	5645	1.699	33.564	-0.00010	0.000
60	80	30 - 40	70	79	16.090	70.672	1126.3	-3.096	154	1.845	29.687	-0.14622	0.344
80	100	40 -50	90	64	13.035	83.707	1173.1	-23.096	6953	1.954	25.473	-0.25537	0.850
120	140	50 - 60	130	24	4.886	88.595	635.4	-63.096	19459	2.114	10.333	-0.41507	0.842
140	160	60 - 70	150	19	3.870	92.464	580.4	-83.096	26720	2.176	8.421	-0.47722	0.881
160	180	70 - 80	170	13	2.648	95.112	450.1	-103.096	28141	2.230	5.905	-0.53158	0.748
180	200	80 - 90	190	19	3.870	98.982	735.2	-123.096	58635	2.279	8.818	-0.57988	1.301
200	220	90 - 100	210	5	1.018	100.000	213.8	-143.096	20852	2.322	2.365	-0.62335	0.396
220	220	100 - 110	220	0	0.000	100.000	0.0	-153.096	0	2.342	0.000	-0.64355	0.000
			Total	491	100.000		6690.4		238064		169.887		12.711

Arithmetic mean ($d_{n,m}$) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 66.904 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 49.038

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 49.989 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.282



อิทธิพลของความดัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

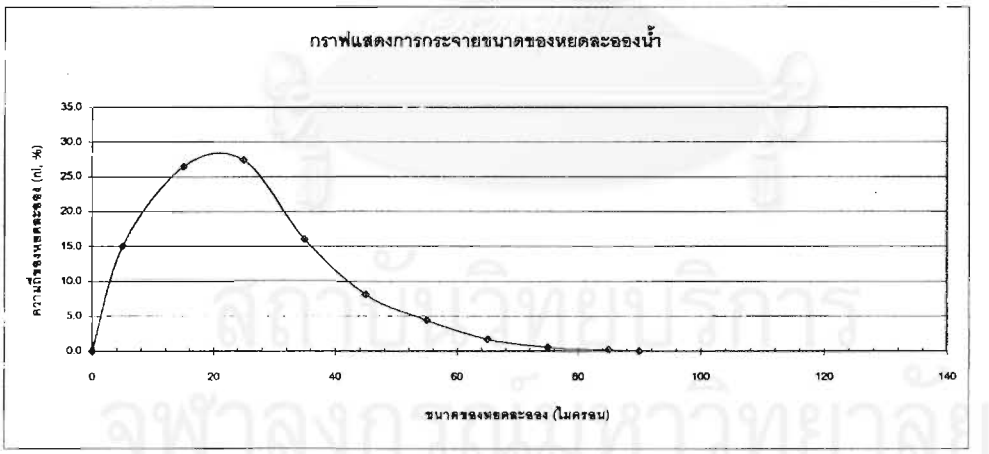
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.000	0	0.000	0.000	1.30433	0.000
0 - 10	5	78	15.058	15.058	75.3	20.000	6023	0.699	10.525	0.60536	5.518
10 - 20	15	137	26.448	41.506	396.7	10.000	2645	1.176	31.105	0.12824	0.435
20 - 30	25	142	27.413	68.919	685.3	0.000	0	1.398	38.322	-0.09361	0.240
30 - 40	35	83	16.023	84.942	560.8	-10.000	1602	1.544	24.741	-0.23974	0.921
40 -50	45	42	8.108	93.050	364.9	-20.000	3243	1.653	13.404	-0.34888	0.967
50 - 60	55	23	4.440	97.490	244.2	-30.000	3996	1.740	7.727	-0.43603	0.844
60 - 70	65	9	1.737	99.228	112.9	-40.000	2780	1.813	3.150	-0.50858	0.449
70 - 80	75	3	0.579	99.807	43.4	-50.000	1448	1.875	1.086	-0.57073	0.189
80 - 90	85	1	0.193	100.000	16.4	-60.000	695	1.929	0.372	-0.62509	0.075
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.000	0	1.954	0.000	-0.64991	0.000
	Total	518	100.000		2500.0		22432		130.433		9.659

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.000 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.053

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.153 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.053



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

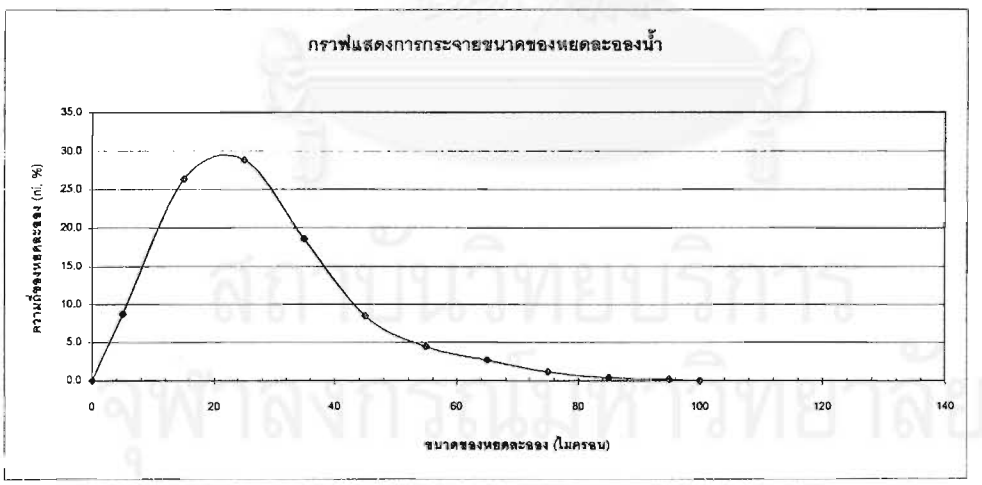
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	27.558	0	0.000	0.000	1.36272	0.000
0 - 10	5	45	8.721	8.721	43.6	22.558	4438	0.699	6.096	0.66375	3.842
10 - 20	15	136	26.357	35.078	395.3	12.558	4157	1.176	30.998	0.18663	0.918
20 - 30	25	149	28.876	63.953	721.9	2.558	189	1.398	40.367	-0.03522	0.036
30 - 40	35	96	18.605	82.558	651.2	-7.442	1030	1.544	28.727	-0.18135	0.612
40 -50	45	44	8.527	91.085	383.7	-17.442	2594	1.653	14.097	-0.29049	0.720
50 - 60	55	23	4.457	95.543	245.2	-27.442	3357	1.740	7.757	-0.37764	0.636
60 - 70	65	14	2.713	98.256	176.4	-37.442	3804	1.813	4.919	-0.45019	0.550
70 - 80	75	6	1.163	99.419	87.2	-47.442	2617	1.875	2.180	-0.51234	0.305
80 - 90	85	2	0.388	99.806	32.9	-57.442	1279	1.929	0.748	-0.56670	0.124
90 - 100	95	1	0.194	100.000	18.4	-67.442	881	1.978	0.383	-0.61500	0.073
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-72.442	0	2.000	0.000	-0.63728	0.000
	Total	516	100.000		2755.8		24346		136.272		7.816

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 27.558 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.682

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 23.053 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.910



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

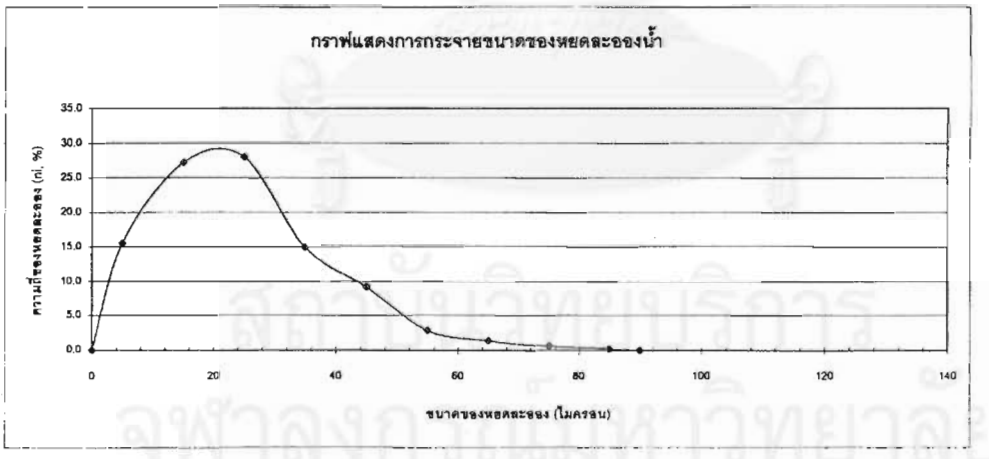
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.309	0	0.000	0.000	1.29340	0.000
0 - 10	5	81	15.547	15.547	77.7	19.309	5797	0.699	10.867	0.59443	5.494
10 - 20	15	142	27.255	42.802	408.8	9.309	2362	1.176	32.055	0.11731	0.375
20 - 30	25	146	28.023	70.825	700.6	-0.691	13	1.398	39.175	-0.10454	0.306
30 - 40	35	78	14.971	85.797	524.0	-10.691	1711	1.544	23.117	-0.25067	0.941
40 -50	45	48	9.213	95.010	414.6	-20.691	3944	1.653	15.231	-0.35981	1.193
50 - 60	55	15	2.879	97.889	158.3	-30.691	2712	1.740	5.011	-0.44696	0.575
60 - 70	65	7	1.344	99.232	87.3	-40.691	2225	1.813	2.436	-0.51951	0.363
70 - 80	75	3	0.576	99.808	43.2	-50.691	1480	1.875	1.080	-0.58166	0.195
80 - 90	85	1	0.192	100.000	16.3	-60.691	707	1.929	0.370	-0.63602	0.078
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.691	0	1.954	0.000	-0.66084	0.000
	Total	521	100.000		2430.9		20950		129.340		9.519

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.309 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.547

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 19.652 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.042



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

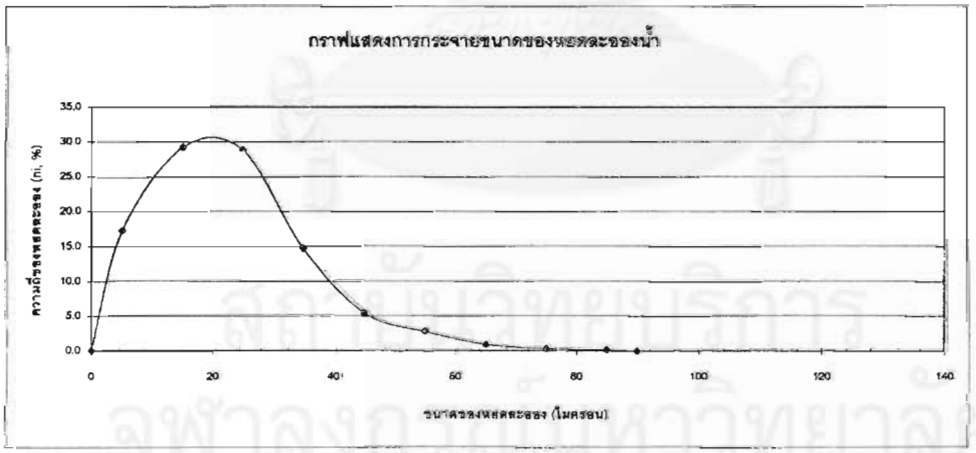
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	22.742	0	0.000	0.000	1.26459	0.000
0 - 10	5	91	17.268	17.268	86.3	17.742	5435	0.699	12.070	0.56562	5.524
10 - 20	15	154	29.222	46.490	438.3	7.742	1751	1.176	34.368	0.08850	0.229
20 - 30	25	152	28.843	75.332	721.1	-2.258	147	1.398	40.320	-0.13335	0.513
30 - 40	35	78	14.801	90.133	518.0	-12.258	2224	1.544	22.853	-0.27947	1.156
40 -50	45	29	5.503	95.636	247.6	-22.258	2726	1.653	9.097	-0.38862	0.831
50 - 60	55	15	2.846	98.482	156.5	-32.258	2962	1.740	4.954	-0.47577	0.644
60 - 70	65	5	0.949	99.431	61.7	-42.258	1694	1.813	1.720	-0.54832	0.285
70 - 80	75	2	0.380	99.810	28.5	-52.258	1036	1.875	0.712	-0.61047	0.141
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.1	-62.258	735	1.929	0.366	-0.66482	0.084
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-67.258	0	1.954	0.000	-0.68965	0.000
	Total	527	100.000		2274.2		18712		126.459		9.408

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 22.742 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 13.748

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 18.391 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.034



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

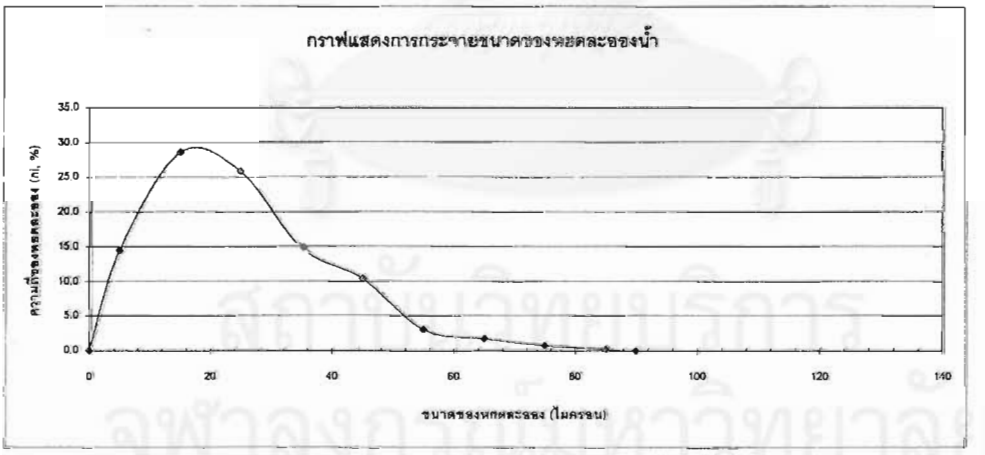
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.924	0	0.000	0.000	1.30402	0.000
0 - 10	5	76	14.476	14.476	72.4	19.924	5746	0.699	10.118	0.60505	5.300
10 - 20	15	150	28.571	43.048	428.6	9.924	281-	1.176	33.603	0.12793	0.468
20 - 30	25	136	25.905	68.952	647.6	-0.076	0	1.398	36.213	-0.09392	0.229
30 - 40	35	78	14.857	83.810	520.0	-10.076	1508	1.544	22.940	-0.24005	0.856
40 -50	45	55	10.476	94.286	471.4	-20.076	4222	1.653	17.319	-0.34919	1.277
50 - 60	55	16	3.048	97.333	167.6	-30.076	2757	1.740	5.304	-0.43634	0.580
60 - 70	65	9	1.714	99.048	111.4	-40.076	2753	1.813	3.108	-0.50889	0.444
70 - 80	75	4	0.762	99.810	57.1	-50.076	1911	1.875	1.429	-0.57104	0.248
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.2	-60.076	687	1.929	0.368	-0.62540	0.074
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.076	0	1.954	0.000	-0.65022	0.000
	Total	525	100.000		2492.4		22399		130.402		9.476

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.924 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.042

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.138 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 2.039



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

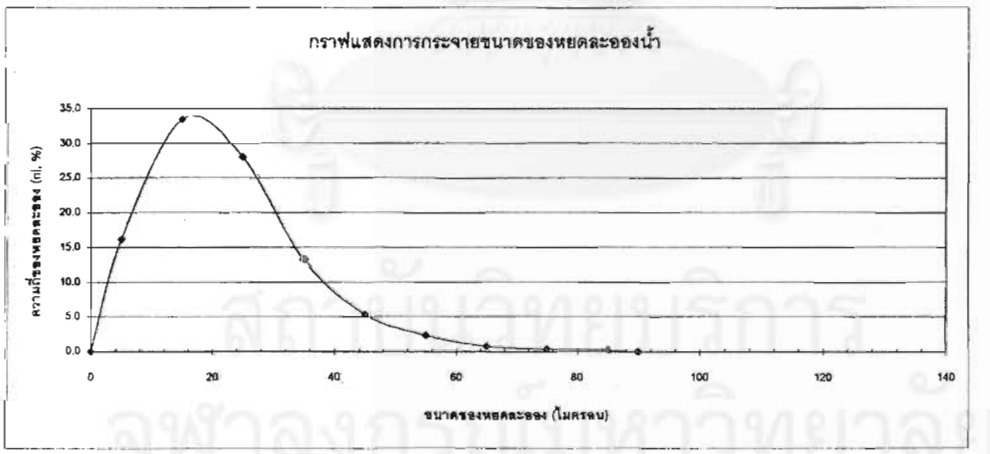
interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	22.135	0	0.000	0.000	1.25788	0.000
0 - 10	5	84	16.154	16.154	80.8	17.135	4743	0.699	11.291	0.55891	5.046
10 - 20	15	174	33.462	49.615	501.9	7.135	1703	1.176	39.354	0.08179	0.224
20 - 30	25	146	28.077	77.692	701.9	-2.865	231	1.398	39.250	-0.14006	0.551
30 - 40	35	69	13.269	90.962	464.4	-12.865	2196	1.544	20.489	-0.28619	1.087
40 -50	45	28	5.385	96.346	242.3	-22.865	2815	1.653	8.902	-0.39533	0.842
50 - 60	55	12	2.308	98.654	126.9	-32.865	2493	1.740	4.016	-0.48248	0.537
60 - 70	65	4	0.769	99.423	50.0	-42.865	1413	1.813	1.395	-0.55503	0.237
70 80	75	2	0.385	99.808	28.8	-52.865	1075	1.875	0.721	-0.61718	0.147
80 - 90	85	1	0.192	100.000	16.3	-62.865	760	1.929	0.371	-0.67154	0.087
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-67.865	0	1.954	0.000	-0.69636	0.000
	Total	520	100.000		2213.5		17429		125.788		8.757

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 22.135 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.268

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 18.108 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.983



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

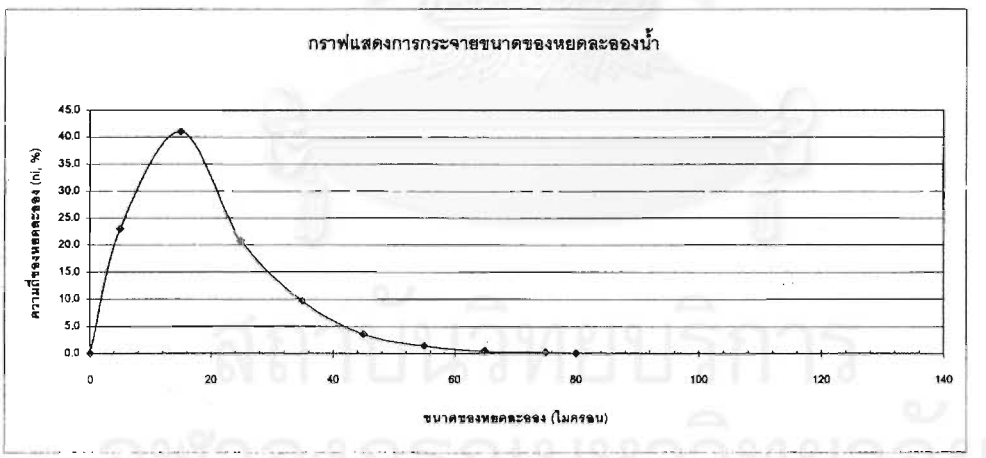
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	18.635	0	0.000	0.000	1.17655	0.000
0 - 10	5	117	22.986	22.986	114.9	13.635	4273	0.699	16.067	0.47758	5.243
10 - 20	15	209	41.061	64.047	615.9	3.635	542	1.176	48.291	0.00046	0.000
20 - 30	25	106	20.825	84.872	520.6	-6.365	844	1.398	29.112	-0.22139	1.021
30 - 40	35	49	9.627	94.499	336.9	-16.365	2578	1.544	14.864	-0.36752	1.300
40 -50	45	18	3.536	98.035	159.1	-26.365	2458	1.653	5.846	-0.47666	0.803
50 - 60	55	7	1.375	99.411	75.6	-36.365	1819	1.740	2.393	-0.56381	0.437
60 - 70	65	2	0.393	99.804	25.5	-46.365	845	1.813	0.712	-0.63636	0.159
70 - 80	75	1	0.196	100.000	14.7	-56.365	624	1.875	0.368	-0.69851	0.096
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-61.365	0	1.903	0.000	-0.72654	0.000
	Total	509	100.000		1863.5		13984		117.655		9.059

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 18.635 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 11.885

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 15.016 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.007



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

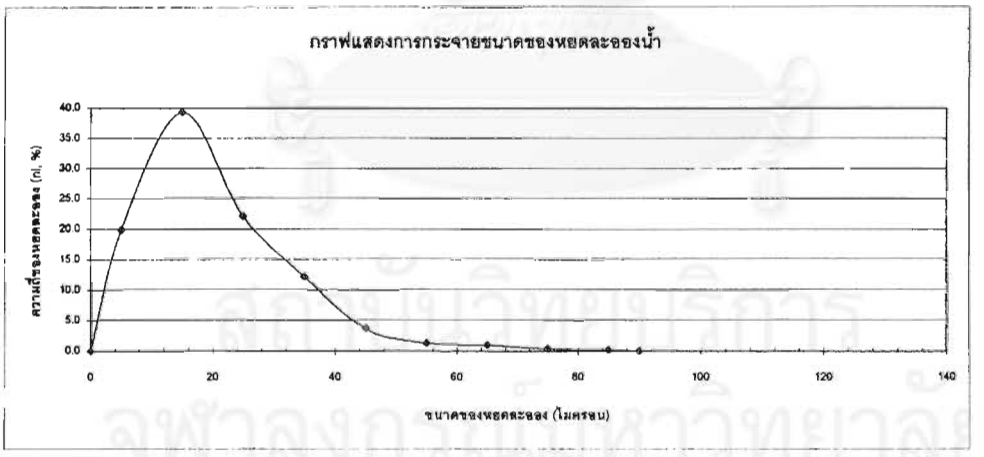
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	20.134	0	0.000	0.000	1.21047	0.000
0 - 10	5	104	19.847	19.847	99.2	15.134	4546	0.699	13.873	0.51150	5.193
10 - 20	15	206	39.313	59.160	589.7	5.134	1036	1.176	46.236	0.03438	0.046
20 - 30	25	116	22.137	81.298	553.4	-4.866	524	1.398	30.947	-0.18747	0.778
30 - 40	35	64	12.214	93.511	427.5	-14.866	2699	1.544	18.859	-0.33360	1.359
40 -50	45	19	3.626	97.137	163.2	-24.866	2242	1.653	5.994	-0.44274	0.711
50 - 60	55	7	1.336	98.473	73.5	-34.866	1624	1.740	2.325	-0.52989	0.375
60 - 70	65	5	0.954	99.427	62.0	-44.866	1921	1.813	1.730	-0.60244	0.346
70 - 80	75	2	0.382	99.809	28.6	-54.866	1149	1.875	0.716	-0.66459	0.169
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.2	-64.866	803	1.929	0.368	-0.71895	0.099
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-69.866	0	1.954	0.000	-0.74377	0.000
	Total	524	100.000		2013.4		16544		121.047		9.076

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 20.134 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 12.927

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 16.236 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.008



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เวโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

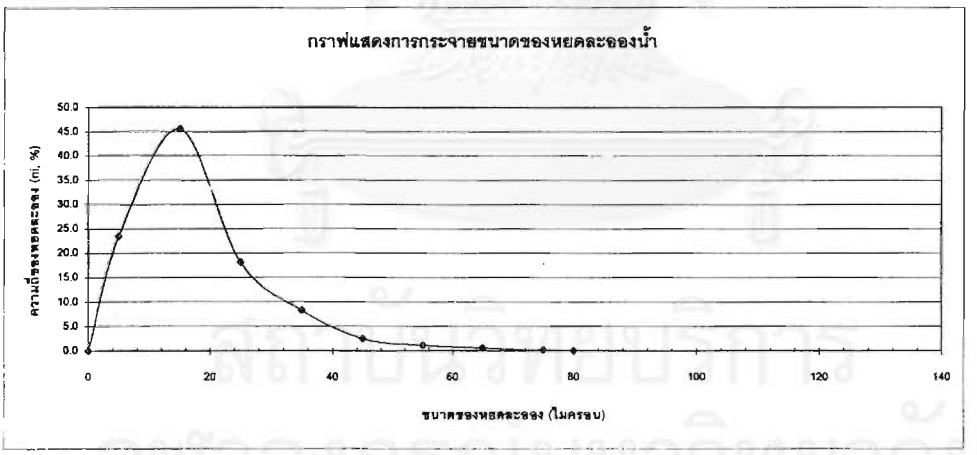
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	17.748	0	0.000	0.000	1.15849	0.000
0 - 10	5	123	23.473	23.473	117.4	12.748	3815	0.699	16.407	0.45952	4.957
10 - 20	15	239	45.611	69.084	684.2	2.748	344	1.176	53.642	-0.01760	0.014
20 - 30	25	95	18.130	87.214	453.2	-7.252	953	1.398	25.344	-0.23945	1.039
30 - 40	35	44	8.397	95.611	293.9	-17.252	2499	1.544	12.965	-0.38558	1.248
40 -50	45	13	2.481	98.092	111.6	-27.252	1842	1.653	4.101	-0.49472	0.607
50 - 60	55	6	1.145	99.237	63.0	-37.252	1589	1.740	1.993	-0.58187	0.388
60 - 70	65	3	0.573	99.809	37.2	-47.252	1278	1.813	1.038	-0.65442	0.245
70 - 80	75	1	0.191	100.000	14.3	-57.252	626	1.875	0.358	-0.71657	0.098
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-62.252	0	1.903	0.000	-0.74460	0.000
	Total	524	100.000		1774.8		12947		115.849		8.597

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 17.748 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 11.436

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 14.404 ไมครอน

gemstric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.971



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

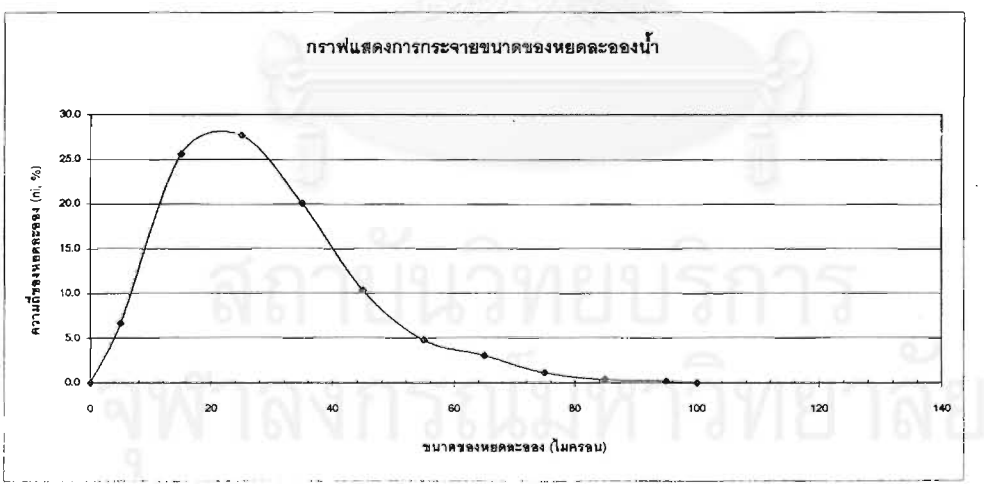
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	28.767	0	0.000	0.000	1.38770	0.000
0 - 10	5	35	6.692	6.692	33.5	23.767	3780	0.699	4.678	0.68873	3.174
10 - 20	15	134	25.621	32.314	384.3	13.767	4856	1.176	30.133	0.21160	1.147
20 - 30	25	145	27.725	60.038	693.1	3.767	393	1.398	38.757	-0.01024	0.003
30 - 40	35	105	20.076	80.115	702.7	-6.233	780	1.544	30.999	-0.15637	0.491
40 -50	45	54	10.325	90.440	464.6	-16.233	2721	1.653	17.069	-0.26552	0.728
50 - 60	55	25	4.780	95.220	262.9	-26.233	3290	1.740	8.319	-0.35267	0.595
60 - 70	65	16	3.059	98.279	198.9	-36.233	4016	1.813	5.546	-0.42522	0.553
70 - 80	75	6	1.147	99.426	86.0	-46.233	2452	1.875	2.151	-0.48737	0.272
80 - 90	85	2	0.382	99.809	32.5	-56.233	1209	1.929	0.738	-0.54172	0.112
90 - 100	95	1	0.191	100.000	18.2	-66.233	839	1.978	0.378	-0.59003	0.067
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-71.233	0	2.000	0.000	-0.61230	0.000
	Total	523	100.000		2876.7		24336		138.770		7.142

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 28.767 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.679

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.417 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.856



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

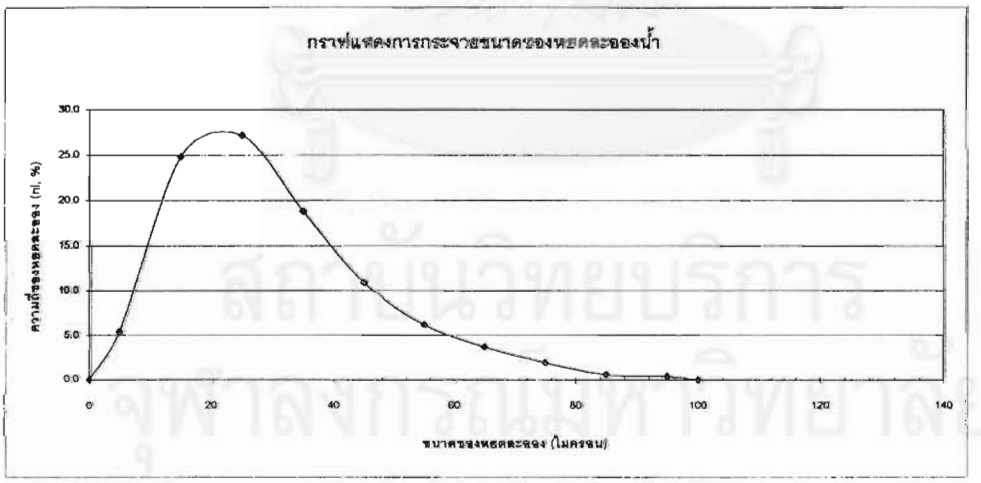
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.417	0	0.000	0.000	1.41128	0.000
0 - 10	5	28	5.437	5.437	27.2	25.417	3512	0.699	3.800	0.71231	2.759
10 - 20	15	128	24.854	30.291	372.8	15.417	5908	1.176	29.231	0.23519	1.375
20 - 30	25	140	27.184	57.476	679.6	5.417	798	1.398	38.002	0.01334	0.005
30 - 40	35	97	18.835	76.311	659.2	-4.583	396	1.544	29.082	-0.13279	0.332
40 -50	45	56	10.874	87.184	489.3	-14.583	2312	1.653	17.977	-0.24193	0.636
50 - 60	55	32	6.214	93.398	341.7	-24.583	3755	1.740	10.814	-0.32908	0.673
60 - 70	65	19	3.689	97.087	239.8	-34.583	4412	1.813	6.688	-0.40164	0.595
70 - 80	75	10	1.942	99.029	145.6	-44.583	3859	1.875	3.641	-0.46378	0.418
80 - 90	85	3	0.583	99.612	49.5	-54.583	1735	1.929	1.124	-0.51814	0.156
90 - 100	95	2	0.388	100.000	36.9	-64.583	1620	1.978	0.768	-0.56645	0.125
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-69.583	0	2.000	0.000	-0.58872	0.000
	Total	515	100.000		3041.7		28308		141.128		7.073

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.417 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 16.910

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.780 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.851



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 2

ความถี่ของหัวฉีด : 26.50 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 3

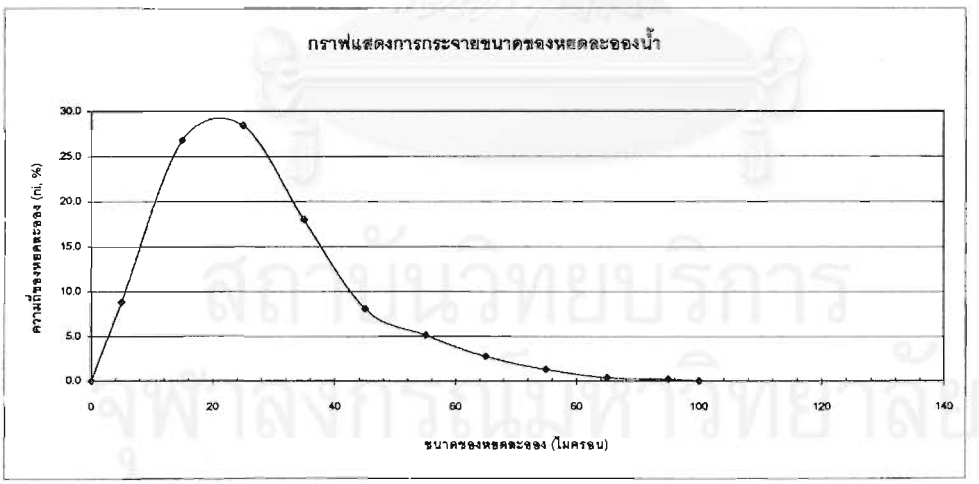
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	27.610	0	0.000	0.000	1.36192	0.000
0 - 10	5	48	8.824	8.824	44.1	22.610	4511	0.699	6.167	0.66295	3.878
10 - 20	15	146	26.838	35.662	402.6	12.610	4268	1.176	31.564	0.18583	0.927
20 - 30	25	155	28.493	64.154	712.3	2.610	194	1.398	39.831	-0.03602	0.037
30 - 40	35	98	18.015	82.169	630.5	-7.390	984	1.544	27.816	-0.18214	0.598
40 -50	45	44	8.088	90.257	364.0	-17.390	2446	1.653	13.372	-0.29129	0.686
50 - 60	55	28	5.147	95.404	283.1	-27.390	3861	1.740	8.958	-0.37844	0.737
60 - 70	65	15	2.757	98.162	179.2	-37.390	3855	1.813	4.999	-0.45099	0.561
70 - 80	75	7	1.287	99.449	96.5	-47.390	2890	1.875	2.413	-0.51314	0.339
80 - 90	85	2	0.368	99.816	31.3	-57.390	1211	1.929	0.709	-0.56750	0.118
90 - 100	95	1	0.184	100.000	17.5	-67.390	835	1.978	0.364	-0.61580	0.070
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-72.390	0	2.000	0.000	-0.63808	0.000
	Total	544	100.000		2761.0		25054		136.192		7.951

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 27.610 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 15.908

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 23.010 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.920



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

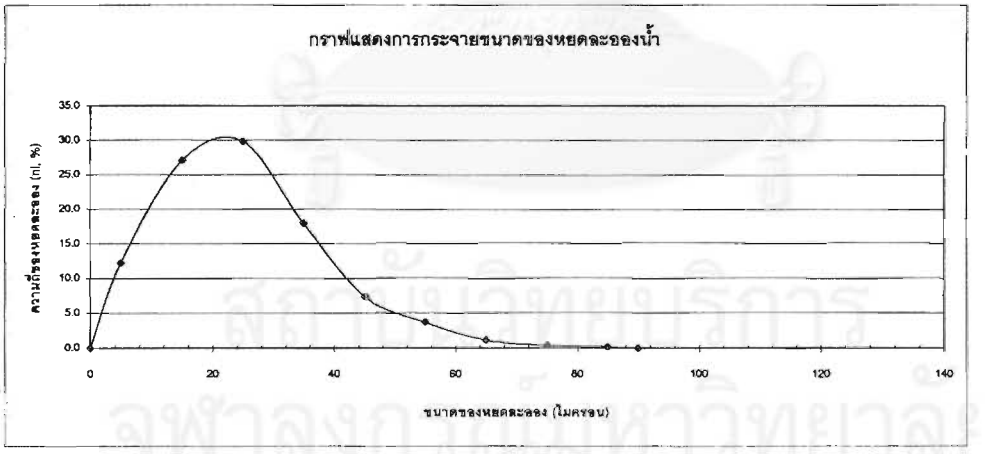
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.000	0	0.000	0.000	1.31754	0.000
0 - 10	5	63	12.281	12.281	61.4	20.000	4912	0.699	8.584	0.61857	4.699
10 - 20	15	139	27.096	39.376	406.4	10.000	2710	1.176	31.867	0.14145	0.542
20 - 30	25	153	29.825	69.201	745.6	0.000	0	1.398	41.693	-0.08040	0.193
30 - 40	35	92	17.934	87.135	627.7	-10.000	1793	1.544	27.691	-0.22653	0.920
40 -50	45	38	7.407	94.542	333.3	-20.000	2963	1.653	12.246	-0.33567	0.835
50 - 60	55	19	3.704	98.246	203.7	-30.000	3333	1.740	6.446	-0.42282	0.662
60 - 70	65	6	1.170	99.415	76.0	-40.000	1871	1.813	2.120	-0.49538	0.287
70 - 80	75	2	0.390	99.805	29.2	-50.000	975	1.875	0.731	-0.55752	0.121
80 - 90	85	1	0.195	100.000	16.6	-60.000	702	1.929	0.376	-0.61188	0.073
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.000	0	1.954	0.000	-0.63670	0.000
	Total	513	100.000		2500.0		19259		131.754		8.332

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.000 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.948

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.775 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.950



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

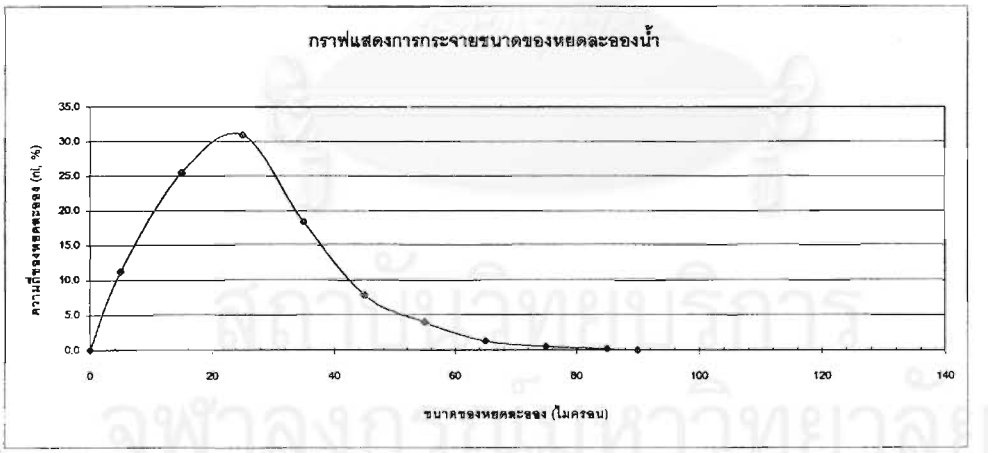
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_\mu)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.713	0	0.000	0.000	1.33226	0.000
0 - 10	5	60	11.257	11.257	56.3	20.713	4830	0.699	7.868	0.63329	4.515
10 - 20	15	136	25.516	36.773	382.7	10.713	2928	1.176	30.009	0.15617	0.622
20 - 30	25	165	30.957	67.730	773.9	0.713	16	1.398	43.276	-0.06568	0.134
30 - 40	35	98	18.386	86.116	643.5	-9.287	1586	1.544	28.390	-0.21181	0.825
40 -50	45	42	7.880	93.996	354.6	-19.287	2931	1.653	13.027	-0.32096	0.812
50 - 60	55	21	3.940	97.936	216.7	-29.287	3379	1.740	6.857	-0.40811	0.656
60 - 70	65	7	1.313	99.250	85.4	-39.287	2027	1.813	2.381	-0.48066	0.303
70 - 80	75	3	0.563	99.812	42.2	-49.287	1367	1.875	1.055	-0.54280	0.166
80 - 90	85	1	0.188	100.000	15.9	-59.287	659	1.929	0.362	-0.59716	0.067
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-64.287	0	1.954	0.000	-0.62199	0.000
	Total	533	100.000		2571.3		19724		133.226		8.099

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.713 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 14.115

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 21.491 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.932



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

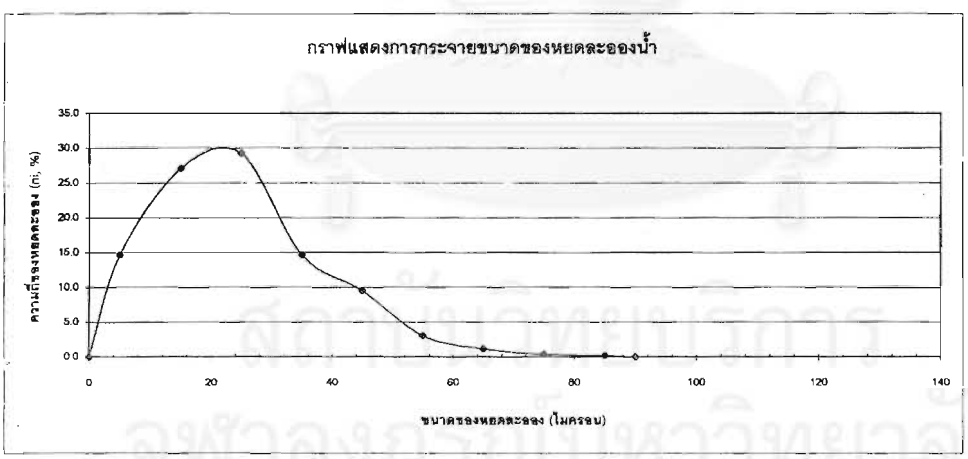
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.408	0	0.000	0.000	1.29898	0.000
0 - 10	5	77	14.695	14.695	73.5	19.408	5535	0.699	10.271	0.60001	5.290
10 - 20	15	142	27.099	41.794	406.5	9.408	2399	1.176	31.871	0.12289	0.409
20 - 30	25	153	29.198	70.992	730.0	-0.592	10	1.398	40.818	-0.09896	0.286
30 - 40	35	77	14.695	85.687	514.3	-10.592	1648	1.544	22.690	-0.24508	0.883
40 -50	45	50	9.542	95.229	429.4	-20.592	4046	1.653	15.775	-0.35423	1.197
50 - 60	55	16	3.053	98.282	167.9	-30.592	2858	1.740	5.314	-0.44138	0.595
60 - 70	65	6	1.145	99.427	74.4	-40.592	1887	1.813	2.076	-0.51393	0.302
70 - 80	75	2	0.382	99.809	28.6	-50.592	977	1.875	0.716	-0.57608	0.127
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.2	-60.592	701	1.929	0.368	-0.63044	0.076
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.592	0	1.954	0.000	-0.65526	0.000
	Total	524	100.000		2440.8		20060		129.898		9.165

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 24.408 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.235

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 19.906 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.015



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

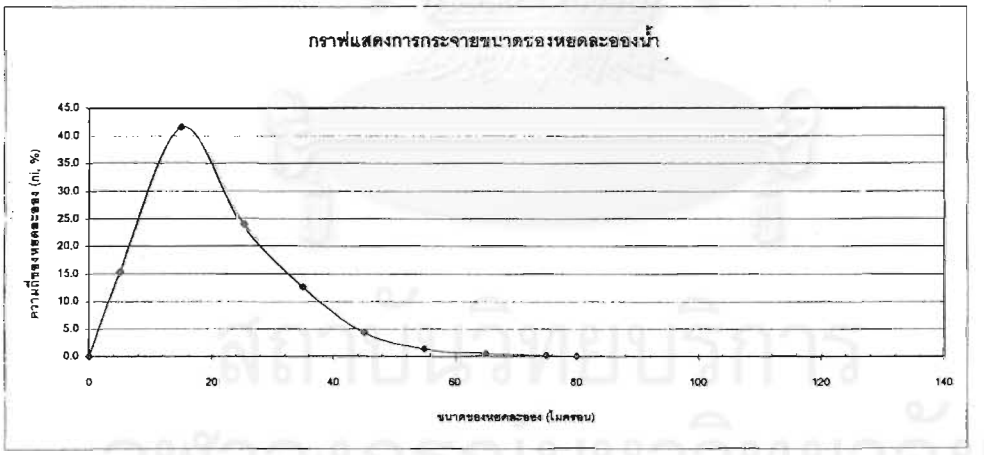
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	20.651	0	0.000	0.000	1.23621	0.000
0 10	5	80	15.326	15.326	76.6	15.651	3754	0.699	10.712	0.53724	4.423
10 - 20	15	217	41.571	56.897	623.6	5.651	1328	1.176	48.891	0.06012	0.150
20 - 30	25	125	23.946	80.843	598.7	-4.349	453	1.398	33.476	-0.16173	0.626
30 - 40	35	66	12.644	93.487	442.5	-14.349	2603	1.544	19.523	-0.30786	1.198
40 -50	45	23	4.406	97.893	198.3	-24.349	2612	1.653	7.284	-0.41700	0.766
50 - 60	55	7	1.341	99.234	73.8	-34.349	1582	1.740	2.334	-0.50415	0.341
60 - 70	65	3	0.575	99.808	37.4	-44.349	1130	1.813	1.042	-0.57671	0.191
70 - 80	75	1	0.192	100.000	14.4	-54.349	566	1.875	0.359	-0.63885	0.078
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-59.349	0	1.903	0.000	-0.66688	0.000
	Total	522	100.000		2065.1		14028		123.621		7.775

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 20.651 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 11.904

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 17.227 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.906



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

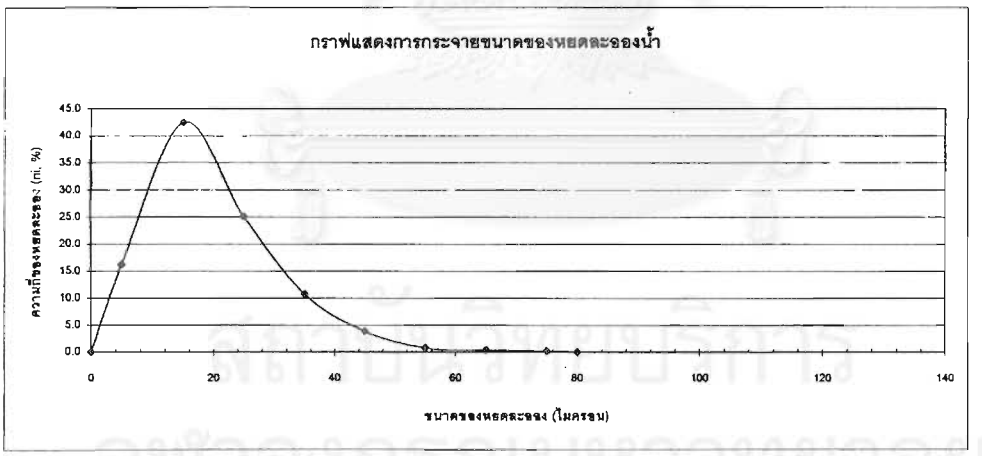
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	19.839	0	0.000	0.000	1.22089	0.000
0 - 10	5	86	16.257	16.257	81.3	14.839	3580	0.699	11.363	0.52192	4.428
10 - 20	15	225	42.533	58.790	638.0	4.839	996	1.176	50.023	0.04480	0.085
20 - 30	25	133	25.142	83.932	628.5	-5.161	670	1.398	35.147	-0.17705	0.788
30 - 40	35	57	10.775	94.707	377.1	-15.161	2477	1.544	16.637	-0.32318	1.125
40 -50	45	21	3.970	98.677	178.6	-25.161	2513	1.653	6.563	-0.43232	0.742
50 - 60	55	4	0.756	99.433	41.6	-35.161	935	1.740	1.316	-0.51947	0.204
60 - 70	65	2	0.378	99.811	24.6	-45.161	771	1.813	0.685	-0.59203	0.133
70 - 80	75	1	0.189	100.000	14.2	-55.161	575	1.875	0.354	-0.65417	0.081
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-60.161	0	1.903	0.000	-0.68220	0.000
	Total	529	100.000		1983.9		12516		122.089		7.587

Anthmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 19.839 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 11.244

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 16.630 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.892



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 2

ความถี่ของหัวฉีด : 26.50 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ความดันของอากาศ : 3.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 3

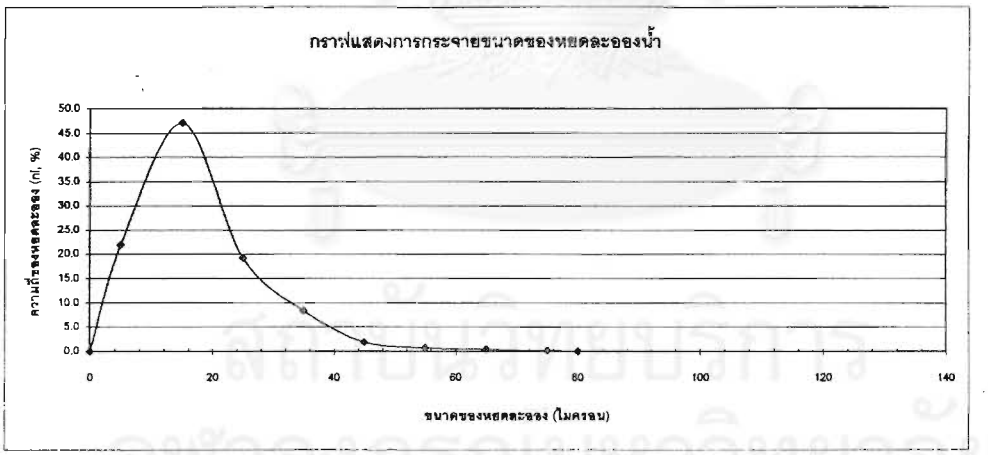
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	17.615	0	0.000	0.000	1.16260	0.000
0 - 10	5	114	21.923	21.923	109.6	12.615	3489	0.699	15.324	0.46363	4.712
10 - 20	15	245	47.115	69.038	706.7	2.615	322	1.176	55.412	-0.01349	0.009
20 - 30	25	100	19.231	88.269	480.8	-7.385	1049	1.398	26.883	-0.23534	1.065
30 - 40	35	44	8.462	96.731	296.2	-17.385	2557	1.544	13.065	-0.38147	1.231
40 -50	45	10	1.923	98.654	86.5	-27.385	1442	1.653	3.179	-0.49061	0.463
50 - 60	55	4	0.769	99.423	42.3	-37.385	1075	1.740	1.339	-0.57776	0.257
60 - 70	65	2	0.385	99.808	25.0	-47.385	864	1.813	0.697	-0.65031	0.163
70 - 80	75	1	0.192	100.000	14.4	-57.385	633	1.875	0.361	-0.71246	0.098
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-62.385	0	1.903	0.000	-0.74049	0.000
	Total	520	100.000		1761.5		11431		116.260		7.997

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 17.615 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 10.746

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 14.541 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_{gi} - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.924



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

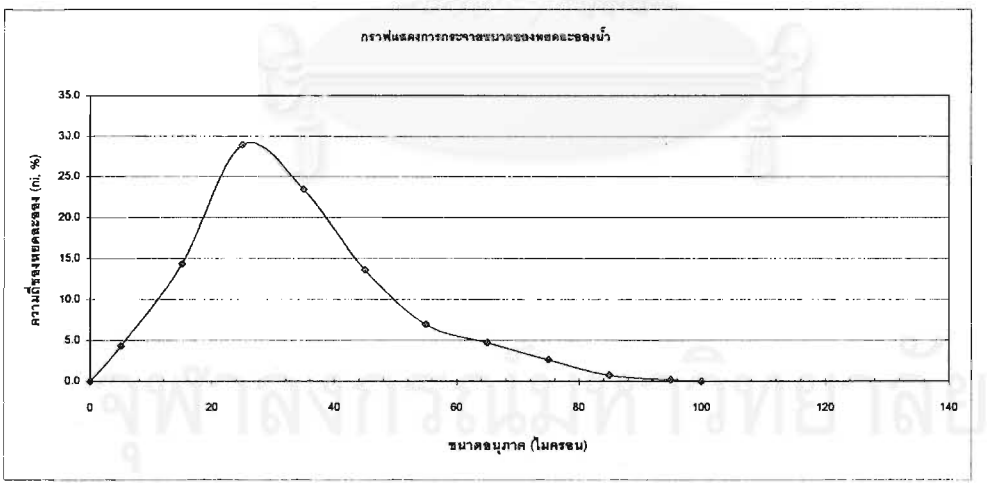
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	33.658	0	0.000	0.000	1.46598	0.000
0 - 10	5	23	4.348	4.348	21.7	28.658	3571	0.699	3.039	0.76701	2.558
10 - 20	15	76	14.367	18.715	215.5	18.658	5001	1.176	16.897	0.28989	1.207
20 - 30	25	153	28.922	47.637	723.1	8.658	2168	1.398	40.432	0.06804	0.134
30 - 40	35	124	23.440	71.078	820.4	-1.342	42	1.544	36.194	-0.07809	0.143
40 -50	45	72	13.611	84.688	612.5	-11.342	1751	1.653	22.501	-0.18723	0.477
50 - 60	55	37	6.994	91.682	384.7	-21.342	3186	1.740	12.173	-0.27438	0.527
60 - 70	65	25	4.726	96.408	307.2	-31.342	4642	1.813	8.568	-0.34694	0.569
70 - 80	75	14	2.647	99.055	198.5	-41.342	4523	1.875	4.962	-0.40908	0.443
80 - 90	85	4	0.756	99.811	64.3	-51.342	1993	1.929	1.459	-0.46344	0.162
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-61.342	711	1.978	0.374	-0.51175	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-66.342	0	2.000	0.000	-0.53402	0.000
	Total	529	100.000		3365.8		27589		146.598		6.269

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.658 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 16.694

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.240 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.785



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

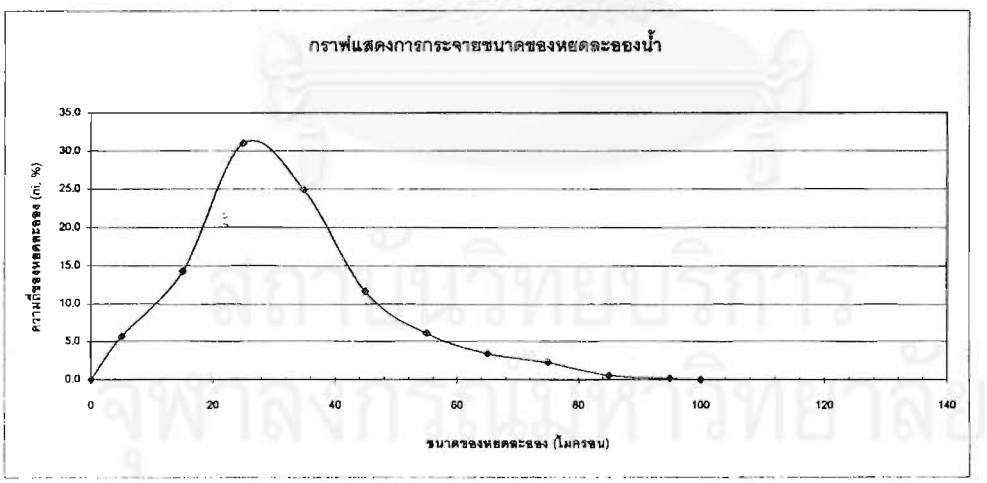
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.053	0	0.000	0.000	1.44249	0.000
0 - 10	5	30	5.703	5.703	28.5	27.053	4174	0.699	3.987	0.74352	3.153
10 - 20	15	75	14.259	19.962	213.9	17.053	4147	1.176	16.769	0.26640	1.012
20 - 30	25	163	30.989	50.951	774.7	7.053	1542	1.398	43.320	0.04455	0.062
30 - 40	35	131	24.905	75.856	871.7	-2.947	216	1.544	38.455	-0.10158	0.257
40 -50	45	61	11.597	87.452	521.9	-12.947	1944	1.653	19.172	-0.21072	0.515
50 - 60	55	32	6.084	93.536	334.6	-22.947	3203	1.740	10.588	-0.29787	0.540
60 - 70	65	18	3.422	96.958	222.4	-32.947	3715	1.813	6.204	-0.37042	0.470
70 - 80	75	12	2.281	99.240	171.1	-42.947	4208	1.875	4.278	-0.43257	0.427
80 - 90	85	3	0.570	99.810	48.5	-52.947	1599	1.929	1.100	-0.48693	0.135
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-62.947	753	1.978	0.376	-0.53523	0.054
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-67.947	0	2.000	0.000	-0.55751	0.000
	Total	526	100.000		3205.3		25500		144.249		6.624

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.053 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 16.049

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.701 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.814



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

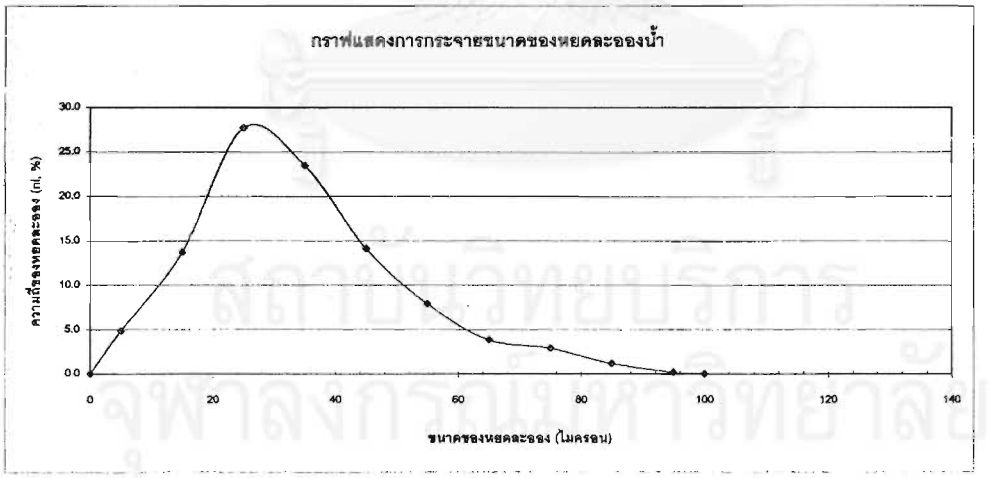
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.050	0	0.000	0.000	1.46840	0.000
0 - 10	5	25	4.845	4.845	24.2	29.050	4089	0.699	3.386	0.76943	2.868
10 - 20	15	71	13.760	18.605	206.4	19.050	4994	1.176	16.183	0.29230	1.176
20 - 30	25	143	27.713	46.318	692.8	9.050	2270	1.398	38.741	0.07046	0.138
30 - 40	35	121	23.450	69.767	820.7	-0.950	21	1.544	36.208	-0.07567	0.134
40 -50	45	73	14.147	83.915	636.6	-10.950	1696	1.653	23.388	-0.18482	0.483
50 - 60	55	41	7.946	91.860	437.0	-20.950	3487	1.740	13.828	-0.27197	0.588
60 - 70	65	20	3.876	95.736	251.9	-30.950	3713	1.813	7.027	-0.34452	0.460
70 - 80	75	15	2.907	98.643	218.0	-40.950	4875	1.875	5.451	-0.40667	0.481
80 - 90	85	6	1.163	99.806	98.8	-50.950	3018	1.929	2.244	-0.46102	0.247
90 - 100	95	1	0.194	100.000	18.4	-60.950	720	1.978	0.383	-0.50933	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.950	0	2.000	0.000	-0.53160	0.000
	Total	516	100.000		3405.0		28883		146.840		6.625

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 34.050 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.081

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 29.403 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n - 1)\}$ = 1.314



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

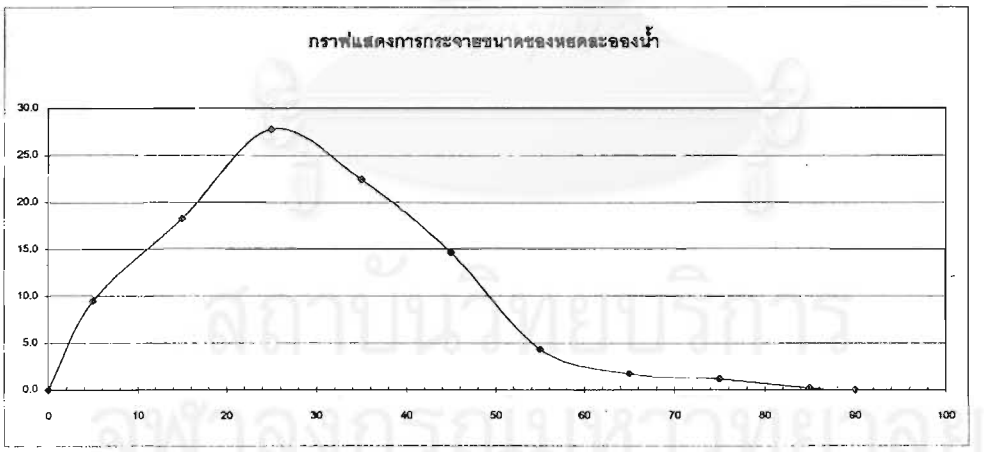
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	29.125	0	0.000	0.000	1.38968	0.000
0 - 10	5	50	9.506	9.506	47.5	24.125	5533	0.699	6.644	0.69071	4.535
10 - 20	15	96	18.251	27.757	273.8	14.125	3642	1.176	21.465	0.21359	0.833
20 - 30	25	146	27.757	55.513	693.9	4.125	472	1.398	38.802	-0.00826	0.002
30 - 40	35	118	22.433	77.947	785.2	-5.875	774	1.544	34.639	-0.15438	0.535
40 - 50	45	77	14.639	92.586	658.7	-15.875	3689	1.653	24.201	-0.26353	1.017
50 - 60	55	23	4.373	96.958	240.5	-25.875	2927	1.740	7.610	-0.35068	0.538
60 - 70	65	9	1.711	98.669	111.2	-35.875	2202	1.813	3.102	-0.42323	0.306
70 - 80	75	6	1.141	99.810	85.6	-45.875	2401	1.875	2.139	-0.48538	0.269
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.2	-55.875	594	1.929	0.367	-0.53973	0.055
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-60.875	0	1.954	0.000	-0.56456	0.000
	Total	526	100.000		2912.5		22233		138.968		8.089

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 29.125 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 14.986

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.529 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.931



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

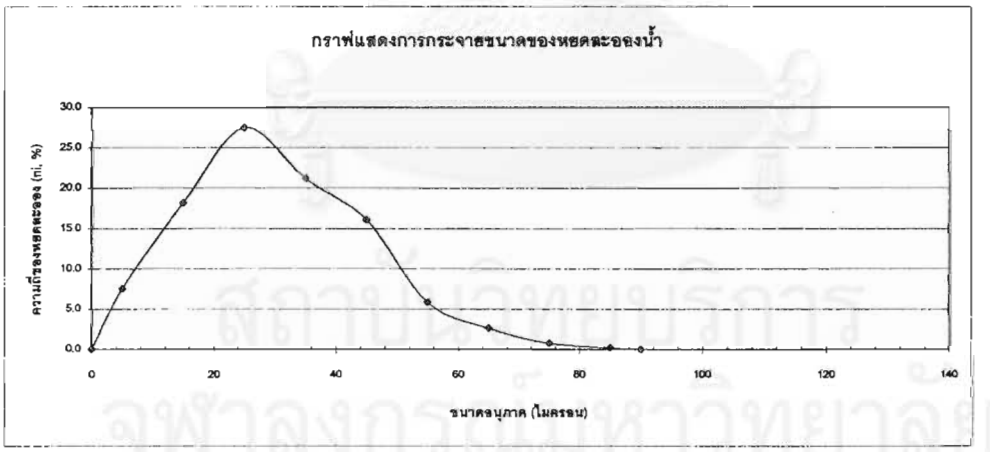
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.322	0	0.000	0.000	1.41247	0.000
0 - 10	5	40	7.576	7.576	37.9	25.322	4858	0.699	5.295	0.71350	3.857
10 - 20	15	96	18.182	25.758	272.7	15.322	4268	1.176	21.383	0.23638	1.016
20 - 30	25	145	27.462	53.220	686.6	5.322	778	1.398	38.390	0.01453	0.006
30 - 40	35	112	21.212	74.432	742.4	-4.678	464	1.544	32.753	-0.13160	0.367
40 -50	45	85	16.098	90.530	724.4	-14.678	3468	1.653	26.614	-0.24074	0.933
50 - 60	55	31	5.871	96.402	322.9	-24.678	3576	1.740	10.218	-0.32789	0.631
60 - 70	65	14	2.652	99.053	172.3	-34.678	3189	1.813	4.807	-0.40044	0.425
70 - 80	75	4	0.758	99.811	56.8	-44.678	1512	1.875	1.421	-0.46259	0.162
80 - 90	85	1	0.189	100.000	16.1	-54.678	566	1.929	0.365	-0.51695	0.051
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.678	0	1.954	0.000	-0.54177	0.000
	Total	528	100.000		3032.2		22679		141.247		7.448

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.322 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]^{1/2}$ = 15.135

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.851 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.881



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

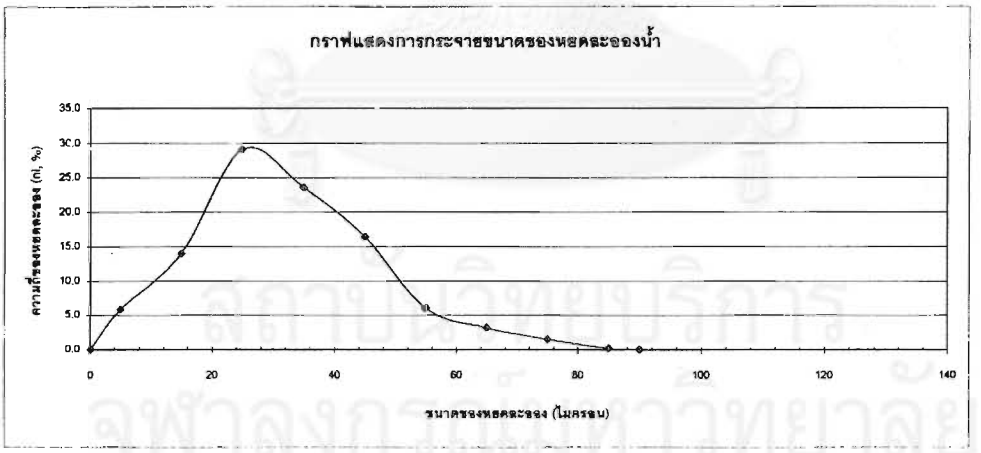
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.051	0	0.000	0.000	1.44473	0.000
0 - 10	5	31	5.860	5.860	29.3	27.051	4288	0.699	4.096	0.74576	3.259
10 - 20	15	74	13.989	19.849	209.8	17.051	4067	1.176	16.452	0.26864	1.009
20 - 30	25	154	29.112	48.960	727.8	7.051	1447	1.398	40.696	0.04679	0.064
30 - 40	35	125	23.629	72.590	827.0	-2.949	205	1.544	36.486	-0.09934	0.233
40 -50	45	87	16.446	89.036	740.1	-12.949	2758	1.653	27.189	-0.20849	0.715
50 - 60	55	32	6.049	95.085	332.7	-22.949	3186	1.740	10.528	-0.29564	0.529
60 - 70	65	17	3.214	98.299	208.9	-32.949	3489	1.813	5.826	-0.36819	0.436
70 - 80	75	8	1.512	99.811	113.4	-42.949	2790	1.875	2.836	-0.43033	0.280
80 - 90	85	1	0.189	100.000	16.1	-52.949	530	1.929	0.365	-0.48469	0.044
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-57.949	0	1.954	0.000	-0.50952	0.000
	Total	529	100.000		3205.1		22760		144.473		6.569

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.051 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 15.162

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.844 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.810



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

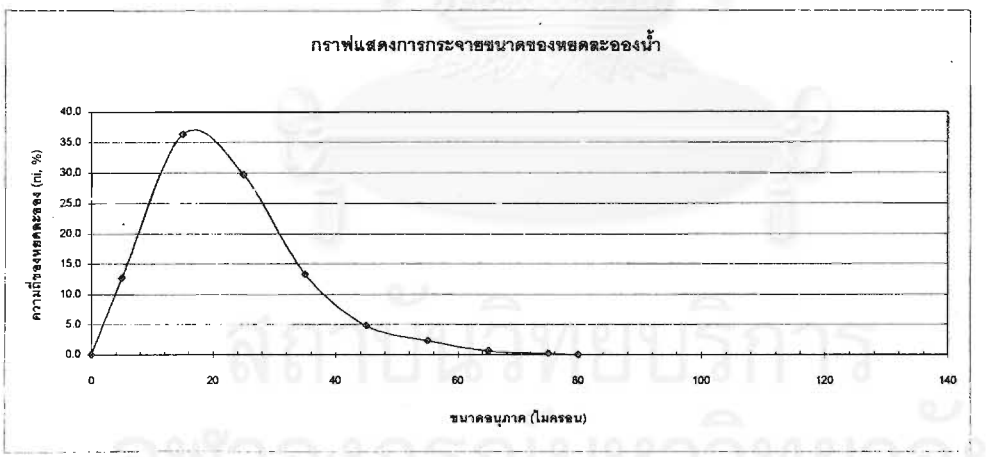
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	22.143	0	0.000	0.000	1.27141	0.000
0 - 10	5	66	12.741	12.741	63.7	17.143	3744	0.699	8.906	0.57244	4.175
10 - 20	15	188	36.293	49.035	544.4	7.143	1852	1.176	42.684	0.09532	0.330
20 - 30	25	154	29.730	78.764	743.2	-2.857	243	1.398	41.560	-0.12653	0.476
30 - 40	35	69	13.320	92.085	466.2	-12.857	2202	1.544	20.568	-0.27266	0.990
40 -50	45	25	4.826	96.911	217.2	-22.857	2521	1.653	7.975	-0.38180	0.704
50 - 60	55	12	2.317	99.228	127.4	-32.857	2501	1.740	4.032	-0.46896	0.509
60 - 70	65	3	0.579	99.807	37.6	-42.857	1064	1.813	1.050	-0.54151	0.170
70 - 80	75	1	0.193	100.000	14.5	-52.857	539	1.875	0.362	-0.60365	0.070
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-57.857	0	1.903	0.000	-0.63168	0.000
	Total	518	100.000		2214.3		14666		127.141		7.424

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 22.143 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 12.171

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 18.681 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.879



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

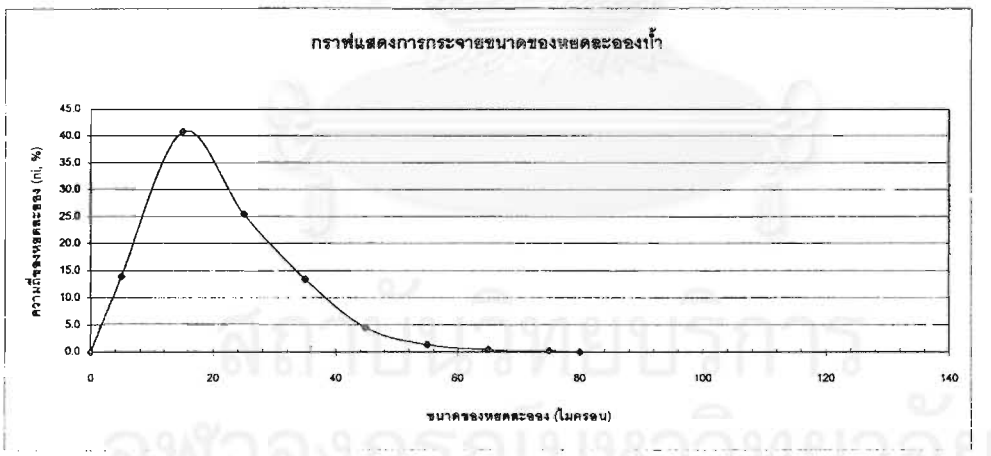
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	21.019	0	0.000	0.000	1.24793	0.000
0 - 10	5	72	13.981	13.981	69.9	16.019	3588	0.699	9.772	0.54896	4.213
10 - 20	15	210	40.777	54.757	611.7	6.019	1477	1.176	47.957	0.07184	0.210
20 - 30	25	131	25.437	80.194	635.9	-3.981	403	1.398	35.559	-0.15001	0.572
30 - 40	35	69	13.398	93.592	468.9	-13.981	2619	1.544	20.688	-0.29614	1.175
40 -50	45	23	4.466	98.058	201.0	-23.981	2568	1.653	7.383	-0.40528	0.734
50 - 60	55	7	1.359	99.417	74.8	-33.981	1569	1.740	2.366	-0.49243	0.330
60 - 70	65	2	0.388	99.806	25.2	-43.981	751	1.813	0.704	-0.56498	0.124
70 - 80	75	1	0.194	100.000	14.6	-53.981	566	1.875	0.364	-0.62713	0.076
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-58.981	0	1.903	0.000	-0.65516	0.000
	Total	515	100.000		2101.9		13542		124.793		7.434

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 21.019 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 11.696

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 17.698 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.879



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

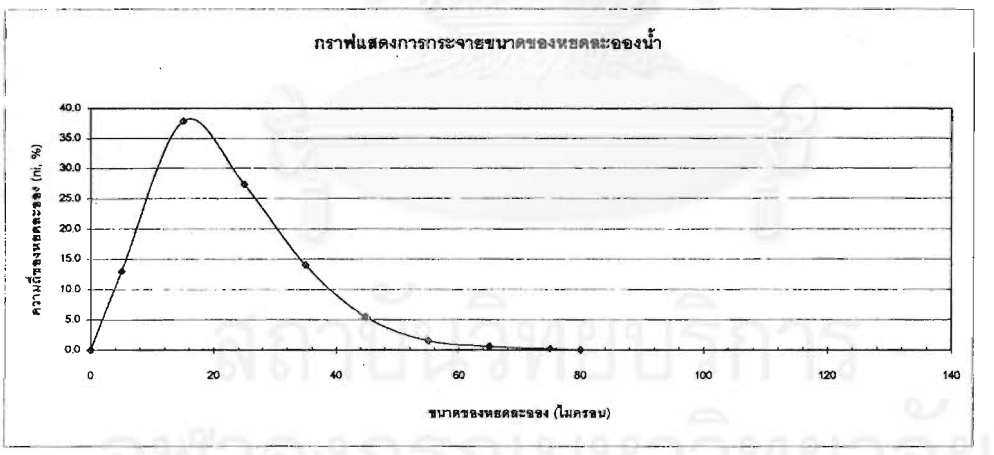
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	21.893	0	0.000	0.000	1.26598	0.000
0 - 10	5	67	13.010	13.010	65.0	16.893	3713	0.699	9.093	0.56701	4.183
10 - 20	15	195	37.864	50.874	568.0	6.893	1799	1.176	44.532	0.08989	0.306
20 - 30	25	141	27.379	78.252	684.5	-3.107	264	1.398	38.274	-0.13196	0.477
30 - 40	35	72	13.981	92.233	489.3	-13.107	2402	1.544	21.587	-0.27809	1.081
40 -50	45	28	5.437	97.670	244.7	-23.107	2903	1.653	8.988	-0.38724	0.815
50 - 60	55	8	1.553	99.223	85.4	-33.107	1703	1.740	2.703	-0.47439	0.350
60 - 70	65	3	0.583	99.806	37.9	-43.107	1082	1.813	1.056	-0.54694	0.174
70 - 80	75	1	0.194	100.000	14.6	-53.107	548	1.875	0.364	-0.60908	0.072
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-58.107	0	1.903	0.000	-0.63711	0.000
	Total	515	100.000		2189.3		14413		126.598		7.458

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 21.893 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 12.066

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 18.449 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.881



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

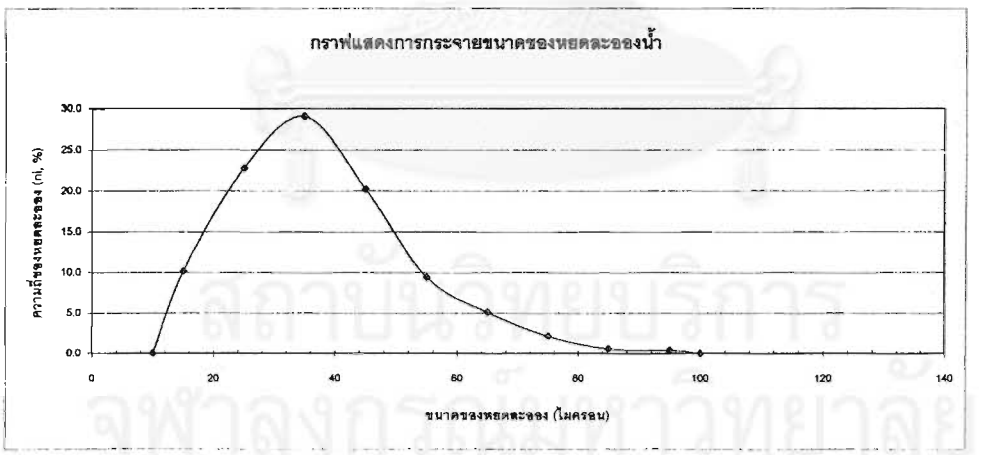
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.515	0	1.000	0.000	0.53863	0.000
10 - 20	15	52	10.216	10.216	153.2	22.515	5179	1.176	12.015	0.36254	1.343
20 - 30	25	116	22.790	33.006	569.7	12.515	3569	1.398	31.859	0.14069	0.451
30 - 40	35	148	29.077	62.083	1017.7	2.515	184	1.544	44.896	-0.00544	0.001
40 -50	45	103	20.236	82.318	910.6	-7.485	1134	1.653	33.454	-0.11458	0.266
50 - 60	55	48	9.430	91.749	518.7	-17.485	2883	1.740	16.412	-0.20173	0.384
60 - 70	65	26	5.108	96.857	332.0	-27.485	3859	1.813	9.260	-0.27428	0.384
70 - 80	75	11	2.161	99.018	162.1	-37.485	3037	1.875	4.052	-0.33643	0.245
80 - 90	85	3	0.589	99.607	50.1	-47.485	1329	1.929	1.137	-0.39079	0.090
90 - 100	95	2	0.393	100.000	37.3	-57.485	1298	1.978	0.777	-0.43909	0.076
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.485	0	2.000	0.000	-0.46137	0.000
	Total	509	100.000		3751.5		22472		153.863		3.239

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 37.515 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.066

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 34.565 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.517



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

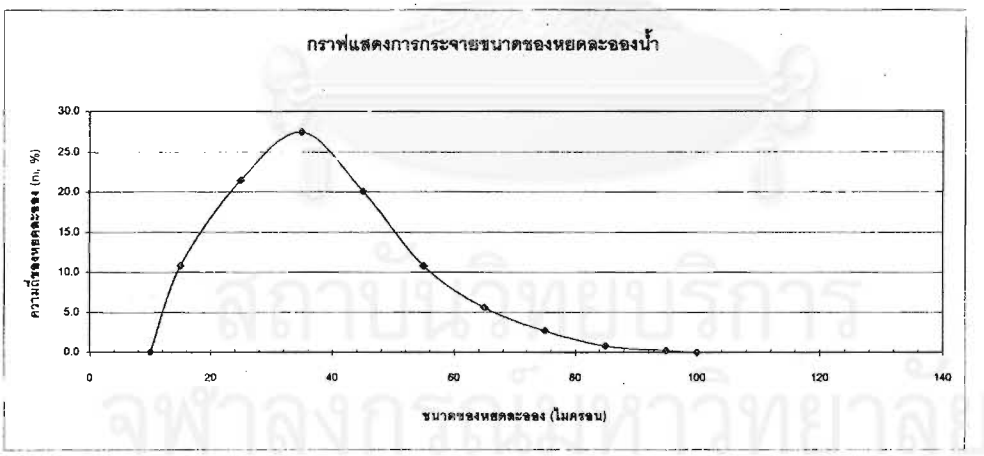
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.133	0	1.000	0.000	0.54392	0.000
10 - 20	15	56	10.832	10.832	162.5	23.133	5797	1.176	12.739	0.36783	1.465
20 - 30	25	111	21.470	32.302	536.8	13.133	3703	1.398	30.014	0.14598	0.458
30 - 40	35	142	27.466	59.768	961.3	3.133	270	1.544	42.410	-0.00015	0.000
40 -50	45	104	20.116	79.884	905.2	-6.867	948	1.653	33.256	-0.10930	0.240
50 - 60	55	56	10.832	90.716	595.7	-16.867	3081	1.740	18.851	-0.19645	0.418
60 - 70	65	29	5.609	96.325	364.6	-26.867	4049	1.813	10.169	-0.26900	0.406
70 - 80	75	14	2.708	99.033	203.1	-36.867	3680	1.875	5.078	-0.33114	0.297
80 - 90	85	4	0.774	99.807	65.8	-46.867	1699	1.929	1.493	-0.38550	0.115
90 - 100	95	1	0.193	100.000	18.4	-56.867	625	1.978	0.383	-0.43381	0.036
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.867	0	2.000	0.000	-0.45608	0.000
	Total	517	100.000		3813.3		23854		154.392		3.436

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 38.133 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 15.522

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 34.988 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.536



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

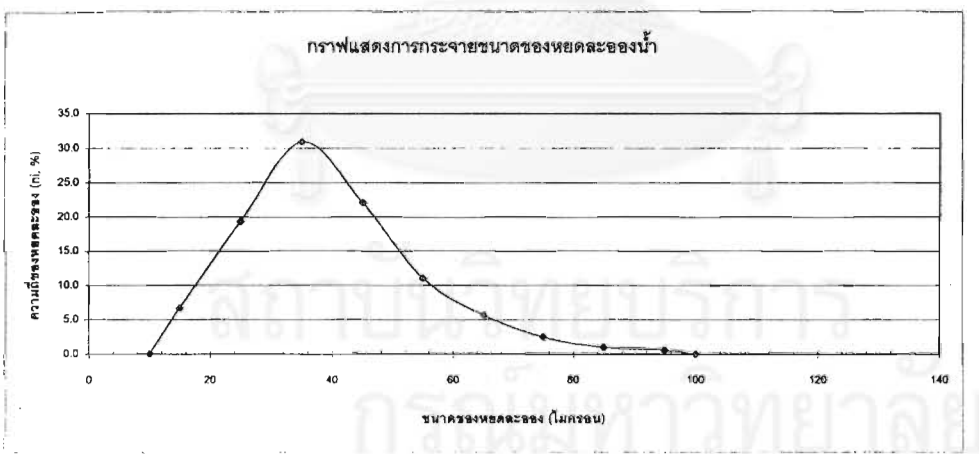
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.734	0	1.000	0.000	0.56717	0.000
10 - 20	15	34	6.706	6.706	100.6	24.734	4103	1.176	7.887	0.39108	1.026
20 - 30	25	98	19.329	26.036	483.2	14.734	4196	1.398	27.021	0.16923	0.554
30 - 40	35	157	30.966	57.002	1083.8	4.734	694	1.544	47.814	0.02310	0.017
40 -50	45	112	22.091	79.093	994.1	-5.266	613	1.653	36.521	-0.08604	0.164
50 - 60	55	56	11.045	90.138	607.5	-15.266	2574	1.740	19.223	-0.17319	0.331
60 - 70	65	29	5.720	95.858	371.8	-25.266	3652	1.813	10.370	-0.24574	0.345
70 - 80	75	13	2.564	98.422	192.3	-35.266	3189	1.875	4.808	-0.30789	0.243
80 - 90	85	5	0.986	99.408	83.8	-45.266	2021	1.929	1.903	-0.36225	0.129
90 - 100	95	3	0.592	100.000	56.2	-55.266	1807	1.978	1.170	-0.41055	0.100
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.266	0	2.000	0.000	-0.43283	0.000
	Total	507	100.000		3973.4		22848		156.717		2.908

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 39.734 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.192

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.912 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.484



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

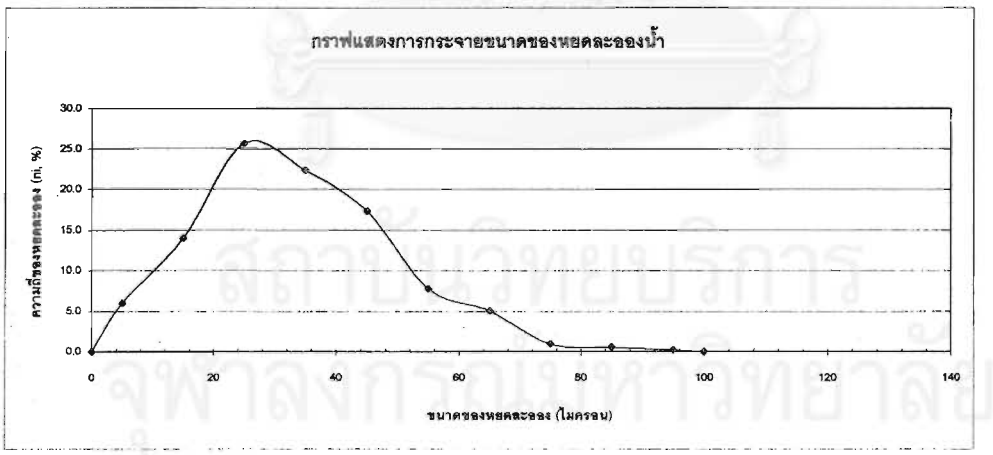
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	33.424	0	0.000	0.000	1.52406	0.000
0 - 10	5	31	6.031	6.031	30.2	28.424	4873	0.699	4.216	0.75914	3.476
10 - 20	15	72	14.008	20.039	210.1	18.424	4755	1.176	16.474	0.28202	1.114
20 - 30	25	132	25.681	45.720	642.0	8.424	1822	1.398	35.900	0.06017	0.093
30 - 40	35	115	22.374	68.093	783.1	-1.576	56	1.544	34.546	-0.08596	0.165
40 -50	45	89	17.315	85.409	779.2	-11.576	2320	1.653	28.626	-0.19510	0.659
50 - 60	55	40	7.782	93.191	428.0	-21.576	3623	1.740	13.544	-0.28225	0.620
60 - 70	65	26	5.058	98.249	328.8	-31.576	5043	1.813	9.170	-0.35480	0.637
70 - 80	75	5	0.973	99.222	73.0	-41.576	1681	1.875	1.824	-0.41695	0.169
80 - 90	85	3	0.584	99.805	49.6	-51.576	1553	1.929	1.126	-0.47131	0.130
90 - 100	95	1	0.195	100.000	18.5	-61.576	738	1.978	0.385	-0.51961	0.053
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-66.576	0	2.000	0.000	-0.54189	0.000
	Total	514	100.000		3342.4		26464		145.811		7.115

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.424 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.350

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 28.715 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.854



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

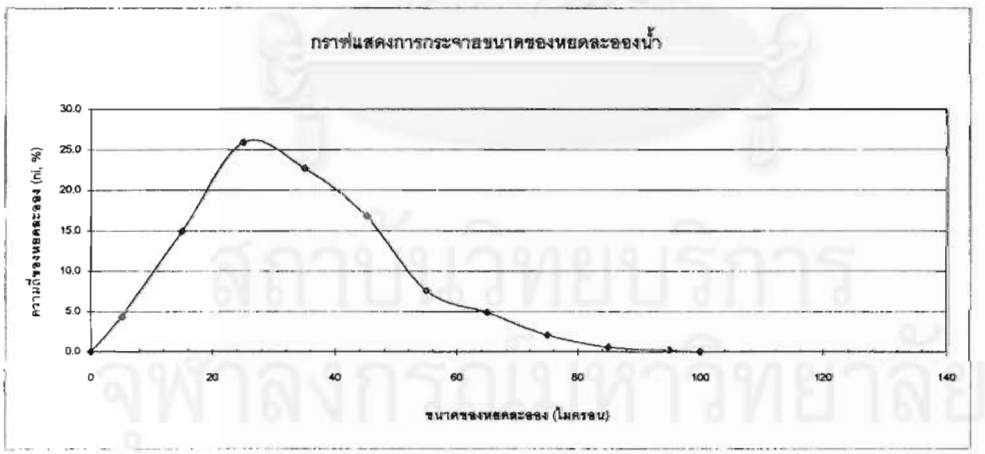
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.017	0	0.000	0.000	1.53170	0.000
0 - 10	5	23	4.348	4.348	21.7	29.017	3661	0.699	3.039	0.77186	2.590
10 - 20	15	79	14.934	19.282	224.0	19.017	5401	1.176	17.564	0.29474	1.297
20 - 30	25	137	25.898	45.180	647.4	9.017	2106	1.398	36.204	0.07289	0.138
30 - 40	35	120	22.684	67.864	794.0	-0.983	22	1.544	35.026	-0.07323	0.122
40 -50	45	89	16.824	84.688	757.1	-10.983	2029	1.653	27.814	-0.18238	0.560
50 - 60	55	40	7.561	92.250	415.9	-20.983	3329	1.740	13.160	-0.26953	0.549
60 - 70	65	26	4.915	97.164	319.5	-30.983	4718	1.813	8.910	-0.34208	0.575
70 - 80	75	11	2.079	99.244	156.0	-40.983	3493	1.875	3.899	-0.40423	0.340
80 - 90	85	3	0.567	99.811	48.2	-50.983	1474	1.929	1.094	-0.45858	0.119
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-60.983	703	1.978	0.374	-0.50689	0.049
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.983	0	2.000	0.000	-0.52917	0.000
	Total	529	100.000		3401.7		26936		147.083		6.339

Anthmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 34.017 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 18.495

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 29.569 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.791



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

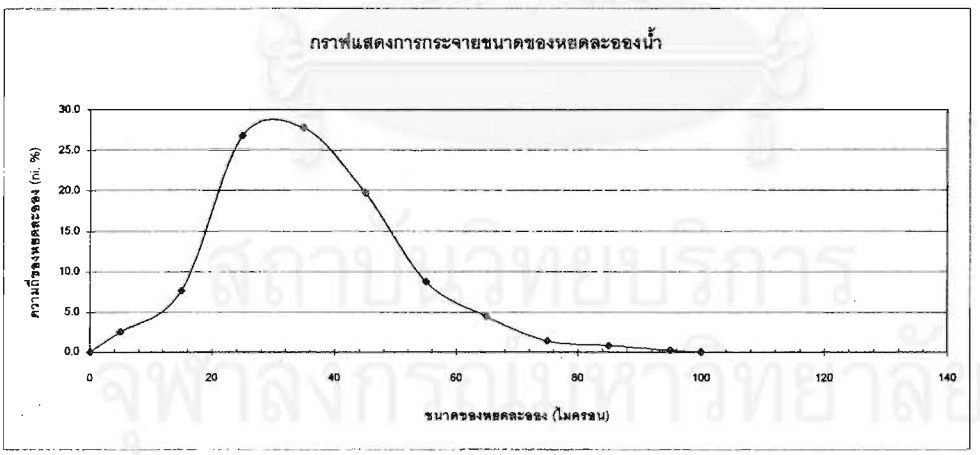
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	36.172	0	0.000	0.000	1.55837	0.000
0 - 10	5	13	2.539	2.539	12.7	31.172	2467	0.699	1.775	0.81575	1.690
10 - 20	15	39	7.617	10.156	114.3	21.172	3411	1.176	8.959	0.33863	0.873
20 - 30	25	137	26.758	36.914	668.9	11.172	3340	1.398	37.406	0.11678	0.365
30 - 40	35	142	27.734	64.648	970.7	1.172	38	1.544	42.824	-0.02934	0.024
40 -50	45	101	19.727	84.375	887.7	-8.828	1537	1.653	32.612	-0.13849	0.378
50 - 60	55	45	8.789	93.164	483.4	-18.828	3116	1.740	15.296	-0.22564	0.447
60 - 70	65	23	4.492	97.656	292.0	-28.828	3733	1.813	8.144	-0.29819	0.399
70 - 80	75	7	1.367	99.023	102.5	-38.828	2061	1.875	2.564	-0.36034	0.178
80 - 90	85	4	0.781	99.805	66.4	-48.828	1863	1.929	1.507	-0.41470	0.134
90 - 100	95	1	0.195	100.000	18.6	-58.828	676	1.978	0.386	-0.46300	0.042
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-63.828	0	2.000	0.000	-0.48528	0.000
	Total	512	100.000		3617.2		22245		151.472		4.531

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 36.172 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 14.990

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 32.713 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.637



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

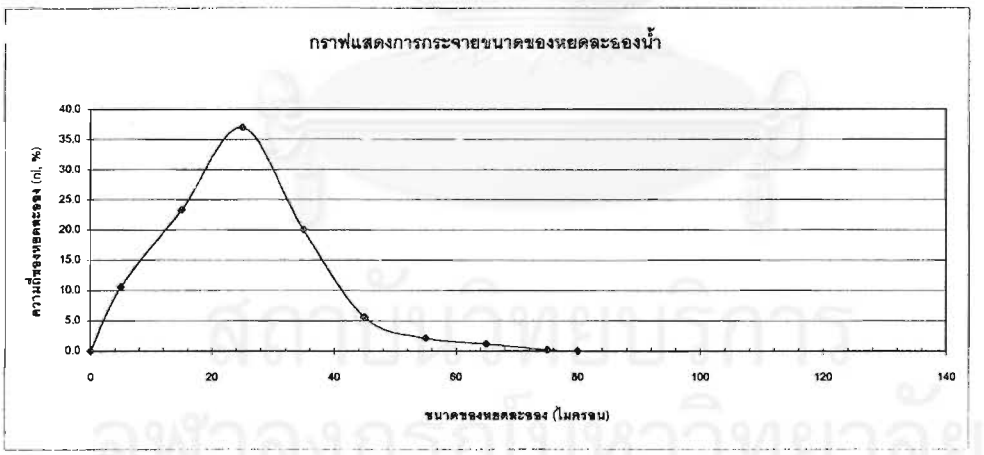
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.665	0	0.000	0.000	1.32867	0.000
0 - 10	5	55	10.597	10.597	53.0	19.865	4182	0.699	7.407	0.62970	4.202
10 - 20	15	121	23.314	33.911	349.7	9.865	2269	1.176	27.419	0.15257	0.543
20 - 30	25	192	36.994	70.906	924.9	-0.135	1	1.398	51.716	-0.06927	0.178
30 - 40	35	104	20.039	90.944	701.3	-10.135	2058	1.544	30.941	-0.21540	0.930
40 -50	45	29	5.588	96.532	251.4	-20.135	2265	1.653	9.238	-0.32455	0.589
50 - 60	55	11	2.119	98.651	116.6	-30.135	1925	1.740	3.689	-0.41170	0.359
60 - 70	65	6	1.156	99.807	75.1	-40.135	1862	1.813	2.096	-0.48425	0.271
70 - 80	75	1	0.193	100.000	14.5	-50.135	484	1.875	0.361	-0.54640	0.058
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-55.135	0	1.903	0.000	-0.57442	0.000
	Total	519	100.000		2486.5		15046		132.867		7.128

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 24.865 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 12.328

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 21.314 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.855



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

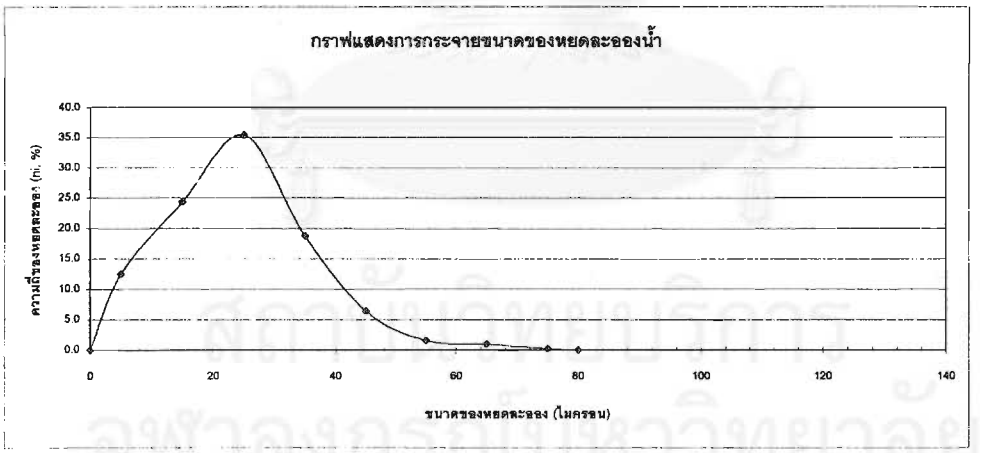
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.183	0	0.000	0.000	1.31093	0.000
0 - 10	5	64	12.451	12.451	62.3	19.183	4582	0.699	8.703	0.61196	4.663
10 - 20	15	125	24.319	36.770	364.8	9.183	2051	1.176	28.601	0.13484	0.442
20 - 30	25	182	35.409	72.179	885.2	-0.817	24	1.398	49.499	-0.08701	0.268
30 - 40	35	96	18.677	90.856	653.7	-10.817	2185	1.544	28.839	-0.23313	1.015
40 - 50	45	33	6.420	97.276	288.9	-20.817	2782	1.653	10.614	-0.34228	0.752
50 - 60	55	8	1.556	98.833	85.6	-30.817	1478	1.740	2.709	-0.42943	0.287
60 - 70	65	5	0.973	99.805	63.2	-40.817	1621	1.813	1.764	-0.50198	0.245
70 - 80	75	1	0.195	100.000	14.6	-50.817	502	1.875	0.365	-0.56413	0.062
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-55.817	0	1.903	0.000	-0.59216	0.000
	Total	514	100.000		2418.3		15225		131.093		7.735

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.183 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 12.401

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.461 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.903



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	7	
ความถี่ของหัวฉีด	:	18.40	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

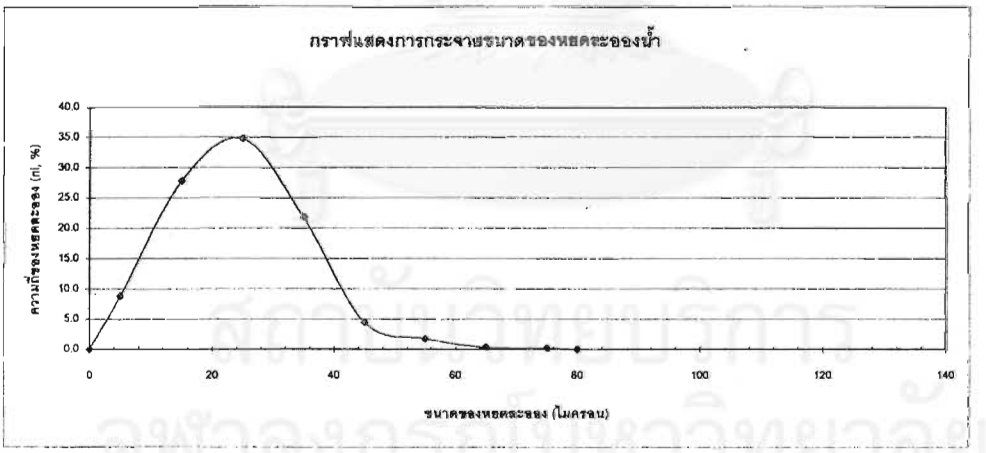
	Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$logd_{mean} - logd_i$	$(logd_{mean} - logd_i)^2 \times n_i$
	<0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.319	0	0.000	0.000	1.32683	0.000
13	0 - 10	5	45	8.755	8.755	43.8	19.319	3268	0.699	6.119	0.62786	3.451
39	10 - 20	15	143	27.821	36.576	417.3	9.319	2416	1.176	32.720	0.15074	0.632
137	20 - 30	25	179	34.825	71.401	870.6	-0.681	16	1.398	48.683	-0.07111	0.176
142	30 - 40	35	112	21.790	93.191	762.6	-10.681	2486	1.544	33.645	-0.21724	1.028
101	40 - 50	45	23	4.475	97.665	201.4	-20.681	1914	1.653	7.398	-0.32638	0.477
45	50 - 60	55	9	1.751	99.416	96.3	-30.681	1648	1.740	3.047	-0.41353	0.299
23	60 - 70	65	2	0.389	99.805	25.3	-40.681	644	1.813	0.705	-0.48609	0.092
7	70 - 80	75	1	0.195	100.000	14.6	-50.681	500	1.875	0.365	-0.54823	0.058
4	>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-55.681	0	1.903	0.000	-0.57626	0.000
1		Total	514	100.000		2431.9		12891		132.683		6.214

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.319 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 11.411

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 21.224 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.780



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

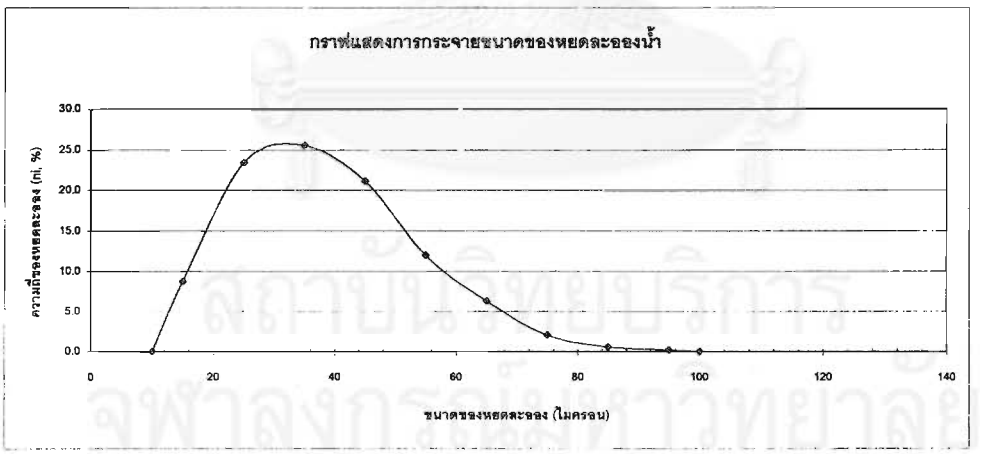
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.543	0	1.000	0.000	0.55108	0.000
10 - 20	15	46	8.762	8.762	131.4	23.543	4856	1.176	10.305	0.37499	1.232
20 - 30	25	123	23.429	32.190	585.7	13.543	4297	1.398	32.752	0.15314	0.549
30 - 40	35	134	25.524	57.714	893.3	3.543	320	1.544	39.410	0.00702	0.001
40 -50	45	111	21.143	78.857	951.4	-6.457	882	1.653	34.954	-0.10213	0.221
50 - 60	55	63	12.000	90.857	660.0	-16.457	3250	1.740	20.884	-0.18928	0.430
60 - 70	65	33	6.286	97.143	408.6	-26.457	4400	1.813	11.395	-0.26183	0.431
70 - 80	75	11	2.095	99.238	157.1	-36.457	2785	1.875	3.929	-0.32398	0.220
80 - 90	85	3	0.571	99.810	48.6	-46.457	1233	1.929	1.103	-0.37833	0.082
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-56.457	607	1.978	0.377	-0.42664	0.035
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.457	0	2.000	0.000	-0.44892	0.000
	Total	525	100.000		3854.3		22631		155.108		3.201

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.543 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.119

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.570 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.513



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

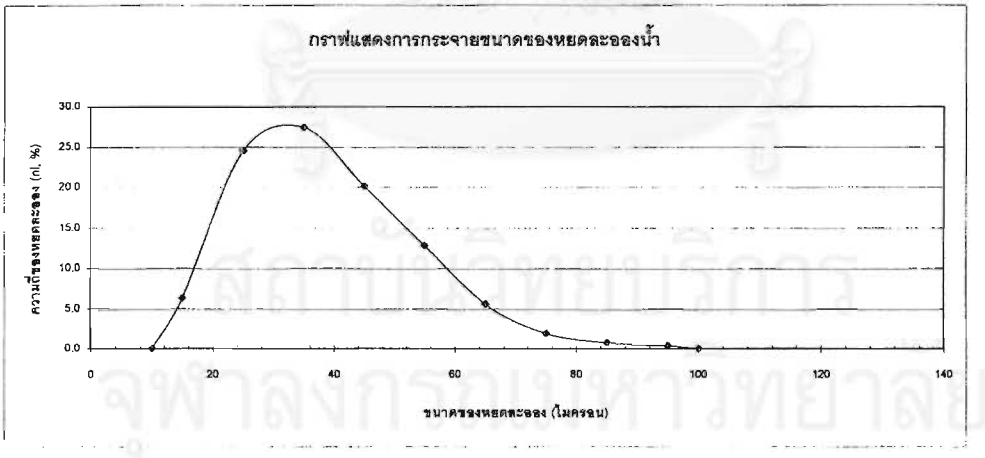
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.916	0	1.000	0.000	0.55804	0.000
10 - 20	15	33	6.334	6.334	95.0	23.916	3623	1.176	7.449	0.38195	0.924
20 - 30	25	128	24.568	30.902	614.2	13.916	4757	1.398	34.345	0.16010	0.630
30 - 40	35	143	27.447	58.349	960.7	3.916	421	1.544	42.380	0.01397	0.005
40 -50	45	105	20.154	78.503	906.9	-6.084	746	1.653	33.318	-0.09517	0.183
50 - 60	55	67	12.860	91.363	707.3	-16.084	3327	1.740	22.381	-0.18232	0.427
60 - 70	65	29	5.566	96.929	361.8	-26.084	3787	1.813	10.091	-0.25487	0.362
70 - 80	75	10	1.919	98.848	144.0	-36.084	2499	1.875	3.599	-0.31702	0.193
80 - 90	85	4	0.768	99.616	65.3	-46.084	1631	1.929	1.481	-0.37138	0.106
90 - 100	95	2	0.384	100.000	36.5	-56.084	1207	1.978	0.759	-0.41968	0.068
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.084	0	2.000	0.000	-0.44196	0.000
	Total	521	100.000		3891.6		21999		155.804		2.897

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.916 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.907

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.144 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.483



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

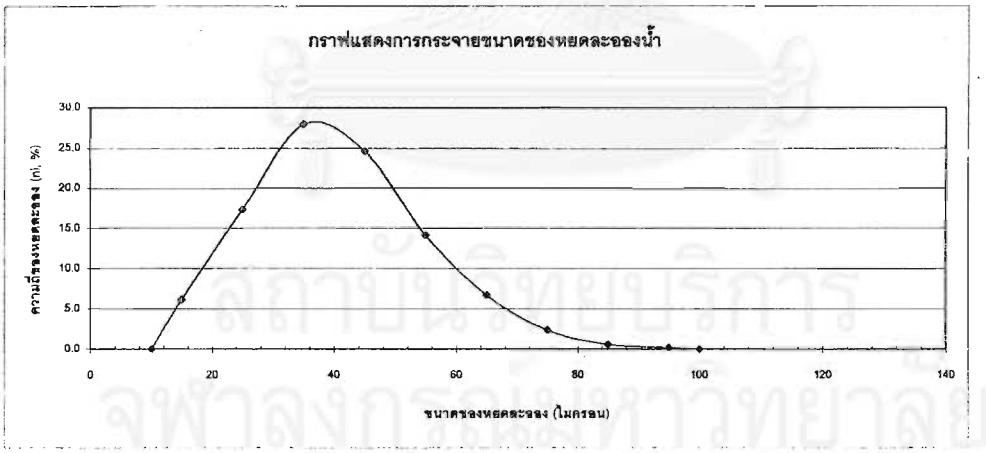
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.709	0	1.000	0.000	0.57992	0.000
10 - 20	15	31	6.102	6.102	91.5	25.709	4033	1.176	7.177	0.40383	0.995
20 - 30	25	88	17.323	23.425	433.1	15.709	4275	1.398	24.216	0.18198	0.574
30 - 40	35	142	27.953	51.378	978.3	5.709	911	1.544	43.161	0.03585	0.036
40 -50	45	125	24.606	75.984	1107.3	-4.291	453	1.653	40.679	-0.07329	0.132
50 - 60	55	72	14.173	90.157	779.5	-14.291	2895	1.740	24.667	-0.16044	0.365
60 - 70	65	34	6.693	96.850	435.0	-24.291	3949	1.813	12.134	-0.23299	0.363
70 - 80	75	12	2.362	99.213	177.2	-34.291	2778	1.875	4.429	-0.29514	0.206
80 - 90	85	3	0.591	99.803	50.2	-44.291	1158	1.929	1.139	-0.34950	0.072
90 - 100	95	1	0.197	100.000	18.7	-54.291	580	1.978	0.389	-0.39780	0.031
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-59.291	0	2.000	0.000	-0.42008	0.000
	Total	508	100.000		4070.9		21032		157.992		2.774

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.709 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 14.576

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.012 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.470



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

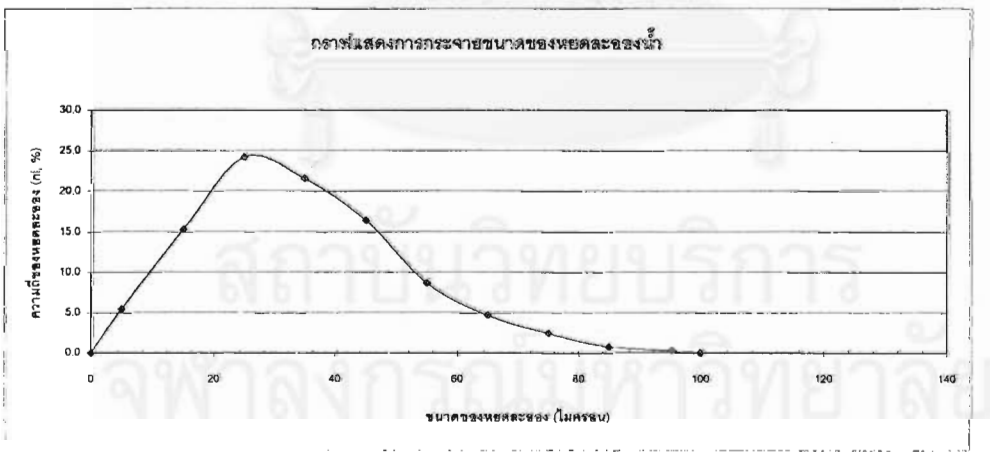
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.148	0	0.000	0.000	1.53336	0.000
0 - 10	5	29	5.492	5.492	27.5	29.148	4666	0.699	3.839	0.76651	3.227
10 - 20	15	81	15.341	20.833	230.1	19.148	5625	1.176	18.042	0.28939	1.285
20 - 30	25	128	24.242	45.076	606.1	9.148	2029	1.398	33.889	0.06754	0.111
30 - 40	35	114	21.591	66.667	755.7	-0.852	16	1.544	33.338	-0.07859	0.133
40 -50	45	87	16.477	83.144	741.5	-10.852	1941	1.653	27.240	-0.18773	0.581
50 - 60	55	46	8.712	91.856	479.2	-20.852	3788	1.740	15.162	-0.27488	0.658
60 - 70	65	25	4.735	96.591	307.8	-30.852	4507	1.813	8.584	-0.34743	0.572
70 - 80	75	13	2.462	99.053	184.7	-40.852	4109	1.875	4.617	-0.40958	0.413
80 - 90	85	4	0.758	99.811	64.4	-50.852	1959	1.929	1.462	-0.46394	0.163
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-60.852	701	1.978	0.375	-0.51224	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.852	0	2.000	0.000	-0.53452	0.000
	Total	528	100.000		3414.8		29340		146.548		7.192

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 34.148 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.215

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 29.207 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.860



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

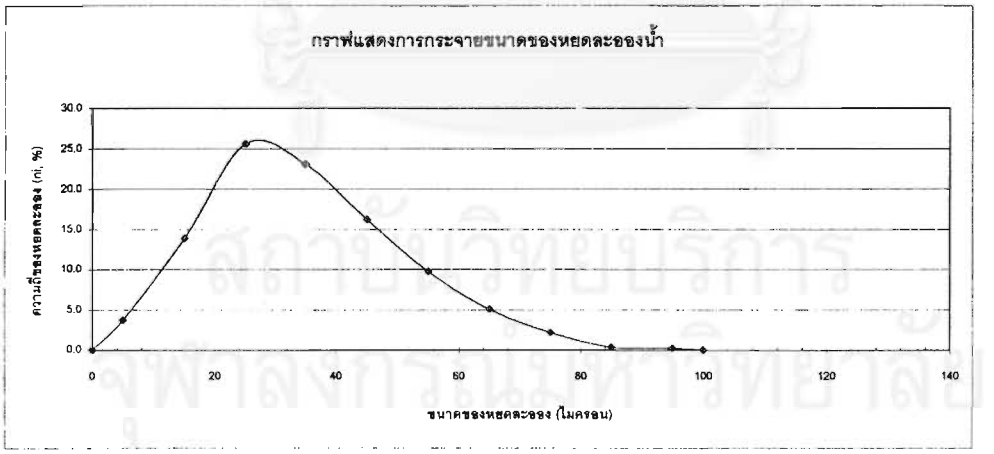
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.824	0	0.000	0.000	1.54188	0.000
0 - 10	5	19	3.711	3.711	18.6	29.824	3301	0.699	2.594	0.78530	2.289
10 - 20	15	71	13.867	17.578	208.0	19.824	5450	1.176	16.309	0.30818	1.317
20 - 30	25	131	25.586	43.164	639.6	9.824	2469	1.398	35.768	0.08633	0.191
30 - 40	35	118	23.047	66.211	806.6	-0.176	1	1.544	35.586	-0.05980	0.082
40 -50	45	83	16.211	82.422	729.5	-10.176	1679	1.653	26.800	-0.16894	0.463
50 - 60	55	50	9.766	92.188	537.1	-20.176	3975	1.740	16.996	-0.25609	0.640
60 - 70	65	26	5.078	97.266	330.1	-30.176	4624	1.813	9.206	-0.32864	0.548
70 - 80	75	11	2.148	99.414	161.1	-40.176	3468	1.875	4.028	-0.39079	0.328
80 - 90	85	2	0.391	99.805	33.2	-50.176	983	1.929	0.754	-0.44515	0.077
90 - 100	95	1	0.195	100.000	18.6	-60.176	707	1.978	0.386	-0.49345	0.048
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.176	0	2.000	0.000	-0.51573	0.000
	Total	512	100.000		3482.4		26657		148.427		5.983

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.824 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.409

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 30.498 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.761



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

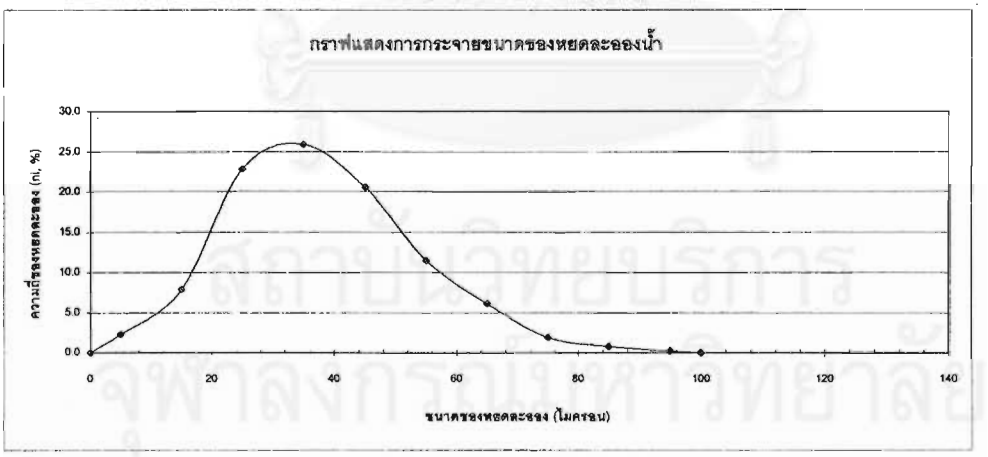
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	37.917	0	0.000	0.000	1.57884	0.000
0 - 10	5	12	2.303	2.303	11.5	32.917	2496	0.699	1.610	0.83498	1.606
10 - 20	15	41	7.869	10.173	118.0	22.917	4133	1.176	9.255	0.35786	1.008
20 - 30	25	119	22.841	33.013	571.0	12.917	3811	1.398	31.930	0.13601	0.423
30 - 40	35	135	25.912	58.925	906.9	2.917	221	1.544	40.009	-0.01012	0.003
40 -50	45	107	20.537	79.463	924.2	-7.083	1030	1.653	33.953	-0.11927	0.292
50 - 60	55	60	11.516	90.979	633.4	-17.083	3361	1.740	20.043	-0.20642	0.491
60 - 70	65	32	6.142	97.121	399.2	-27.083	4505	1.813	11.135	-0.27897	0.478
70 - 80	75	10	1.919	99.040	144.0	-37.083	2639	1.875	3.599	-0.34111	0.223
80 - 90	85	4	0.768	99.808	65.3	-47.083	1702	1.929	1.481	-0.39547	0.120
90 - 100	95	1	0.192	100.000	18.2	-57.083	625	1.978	0.380	-0.44378	0.038
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.083	0	2.000	0.000	-0.46605	0.000
	Total	521	100.000		3791.7		24523		153.395		4.681

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 37.917 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / \{(\Sigma n_i) - 1\})^{1/2}$ = 15.739

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 34.194 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.650



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

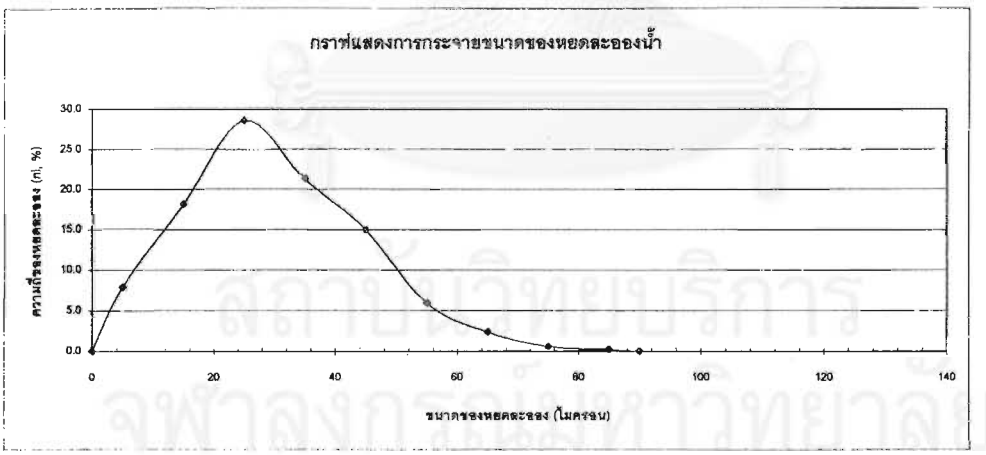
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	29.872	0	0.000	0.000	1.40589	0.000
0 - 10	5	40	7.890	7.890	39.4	24.872	4881	0.699	5.515	0.70692	3.943
10 - 20	15	92	18.146	26.036	272.2	14.872	4013	1.176	21.341	0.22980	0.958
20 - 30	25	145	28.600	54.635	715.0	4.872	679	1.398	39.981	0.00795	0.002
30 - 40	35	108	21.302	75.937	745.6	-5.128	560	1.544	32.891	-0.13818	0.407
40 - 50	45	76	14.990	90.927	674.6	-15.128	3431	1.653	24.782	-0.24733	0.917
50 - 60	55	30	5.917	96.844	325.4	-25.128	3736	1.740	10.298	-0.33448	0.662
60 - 70	65	12	2.367	99.211	153.8	-35.128	2921	1.813	4.291	-0.40703	0.392
70 - 80	75	3	0.592	99.803	44.4	-45.128	1205	1.875	1.110	-0.46917	0.130
80 - 90	85	1	0.197	100.000	16.8	-55.128	599	1.929	0.381	-0.52353	0.054
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-60.128	0	1.954	0.000	-0.54836	0.000
	Total	507	100.000		2987.2		22025		140.589		7.465

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 29.872 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 14.916

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.462 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.882



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

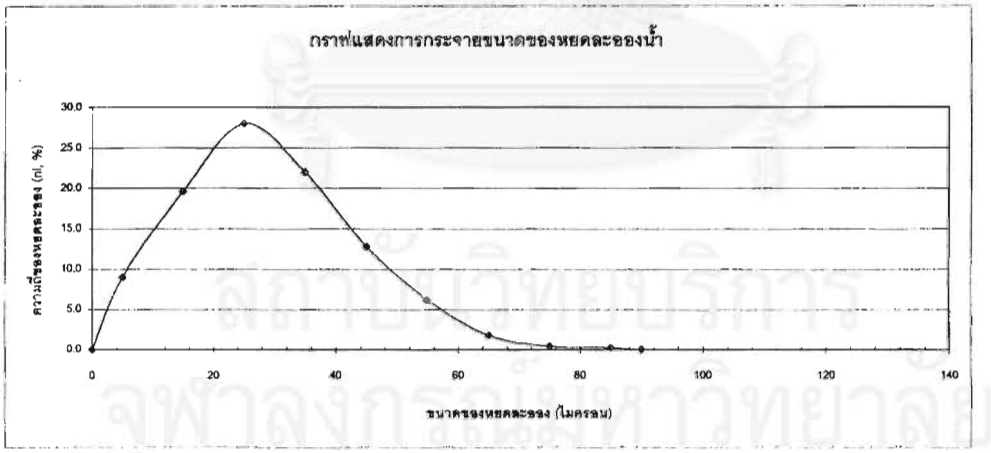
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	28.900	0	0.000	0.000	1.38804	0.000
0 - 10	5	45	9.000	9.000	45.0	23.900	5141	0.699	6.291	0.68907	4.273
10 - 20	15	98	19.600	28.600	294.0	13.900	3787	1.176	23.051	0.21195	0.881
20 - 30	25	140	28.000	56.600	700.0	3.900	426	1.398	39.142	-0.00990	0.003
30 - 40	35	110	22.000	78.600	770.0	-6.100	819	1.544	33.969	-0.15602	0.536
40 -50	45	64	12.800	91.400	576.0	-16.100	3318	1.653	21.161	-0.26517	0.900
50 - 60	55	31	6.200	97.600	341.0	-26.100	4224	1.740	10.790	-0.35232	0.770
60 - 70	65	9	1.800	99.400	117.0	-36.100	2346	1.813	3.263	-0.42487	0.325
70 - 80	75	2	0.400	99.800	30.0	-46.100	850	1.875	0.750	-0.48702	0.095
80 - 90	85	1	0.200	100.000	17.0	-56.100	629	1.929	0.386	-0.54137	0.059
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-61.100	0	1.954	0.000	-0.56620	0.000
	Total	500	100.000		2893.0		21539		138.804		7.840

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 28.900 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 14.750

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.437 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.912



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

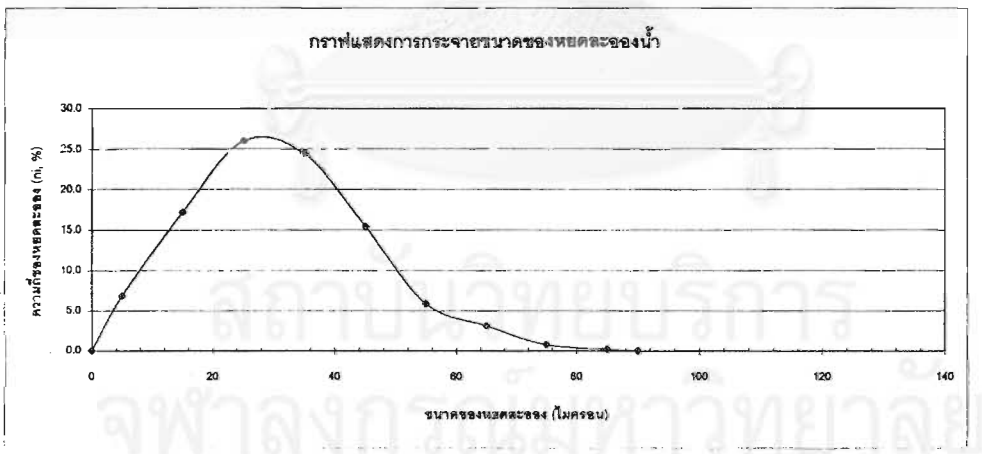
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.969	0	0.000	0.000	1.42494	0.000
0 - 10	5	35	6.849	6.849	34.2	25.969	4619	0.699	4.787	0.72597	3.610
10 - 20	15	88	17.221	24.070	258.3	15.969	4391	1.176	20.254	0.24885	1.066
20 - 30	25	133	26.027	50.098	650.7	5.969	927	1.398	36.385	0.02700	0.019
30 - 40	35	125	24.462	74.560	856.2	-4.031	398	1.544	37.771	-0.11913	0.347
40 -50	45	79	15.460	90.020	695.7	-14.031	3044	1.653	25.558	-0.22827	0.806
50 - 60	55	30	5.871	95.890	322.9	-24.031	3390	1.740	10.217	-0.31542	0.584
60 - 70	65	16	3.131	99.022	203.5	-34.031	3626	1.813	5.676	-0.38797	0.471
70 - 80	75	4	0.783	99.804	58.7	-44.031	1518	1.875	1.468	-0.45012	0.159
80 - 90	85	1	0.196	100.000	16.6	-54.031	571	1.929	0.378	-0.50448	0.050
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.031	0	1.954	0.000	-0.52930	0.000
	Total	511	100.000		3096.9		22484		142.494		7.112

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.969 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.070

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 26.604 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.854



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

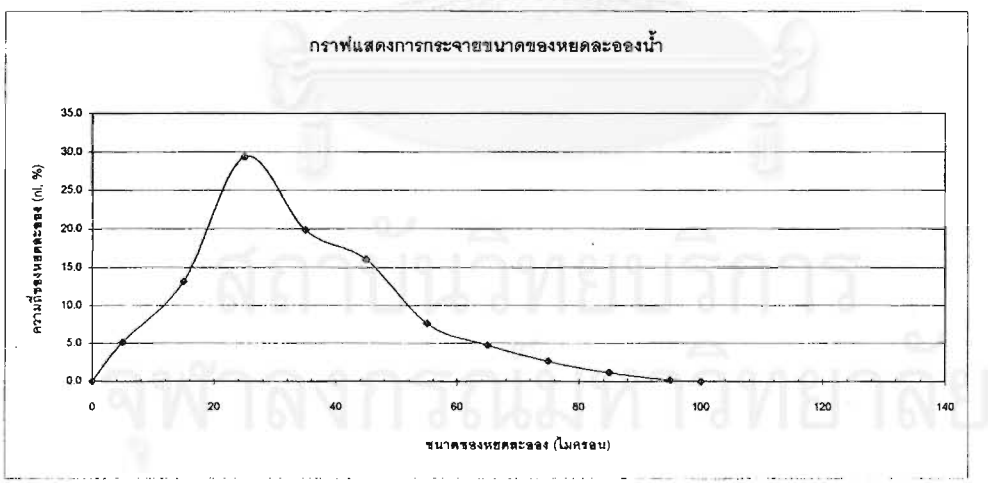
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.198	0	0.000	0.000	1.46851	0.000
0 - 10	5	27	5.153	5.153	25.8	29.198	4393	0.699	3.602	0.76954	3.051
10 - 20	15	69	13.168	18.321	197.5	19.198	4853	1.176	15.487	0.29242	1.126
20 - 30	25	154	29.389	47.710	734.7	9.198	2487	1.398	41.084	0.07057	0.146
30 - 40	35	104	19.847	67.557	694.7	-0.802	13	1.544	30.646	-0.07556	0.113
40 -50	45	84	16.031	83.588	721.4	-10.802	1870	1.653	26.502	-0.18470	0.547
50 - 60	55	40	7.634	91.221	419.8	-20.802	3303	1.740	13.285	-0.27185	0.564
60 - 70	65	25	4.771	95.992	310.1	-30.802	4526	1.813	8.649	-0.34440	0.566
70 - 80	75	14	2.672	98.664	200.4	-40.802	4448	1.875	5.010	-0.40655	0.442
80 - 90	85	6	1.145	99.809	97.3	-50.802	2955	1.929	2.209	-0.46091	0.243
90 - 100	95	1	0.191	100.000	18.1	-60.802	706	1.978	0.377	-0.50921	0.049
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.802	0	2.000	0.000	-0.53149	0.000
	Total	524	100.000		3419.8		29554		146.851		6.848

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 34.198 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.278

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 29.411 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.832



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

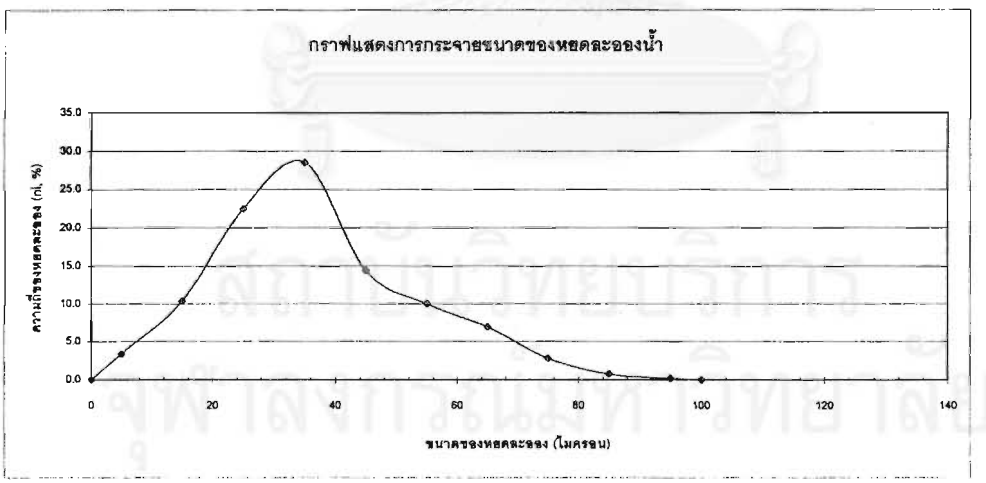
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	36.815	0	0.000	0.000	1.51145	0.000
0 - 10	5	18	3.403	3.403	17.0	31.815	3444	0.699	2.378	0.81248	2.246
10 - 20	15	55	10.397	13.800	156.0	21.815	4948	1.176	12.228	0.33536	1.169
20 - 30	25	119	22.495	36.295	562.4	11.815	3140	1.398	31.447	0.11351	0.290
30 - 40	35	151	28.544	64.839	999.1	1.815	94	1.544	44.075	-0.03262	0.030
40 -50	45	76	14.367	79.206	646.5	-8.185	963	1.653	23.751	-0.14176	0.289
50 - 60	55	53	10.019	89.225	551.0	-18.185	3313	1.740	17.437	-0.22891	0.525
60 - 70	65	37	6.994	96.219	454.6	-28.185	5556	1.813	12.680	-0.30146	0.636
70 - 80	75	15	2.836	99.055	212.7	-38.185	4135	1.875	5.317	-0.36361	0.375
80 - 90	85	4	0.756	99.811	64.3	-48.185	1756	1.929	1.459	-0.41797	0.132
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-58.185	640	1.978	0.374	-0.46627	0.041
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-63.185	0	2.000	0.000	-0.48855	0.000
	Total	529	100.000		3681.5		27988		151.145		5.733

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 36.815 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.814

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 32.468 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.740



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

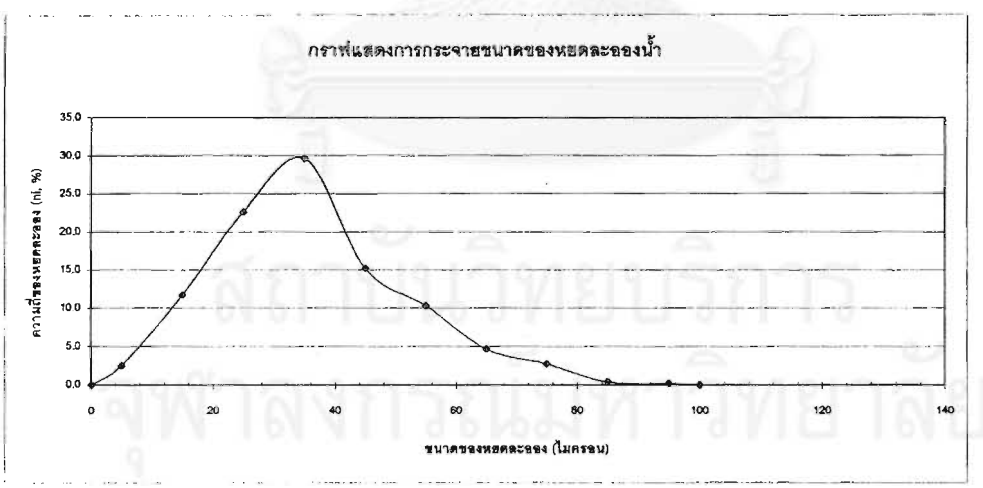
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	36.033	0	0.000	0.000	1.50740	0.000
0 - 10	5	13	2.534	2.534	12.7	31.033	2440	0.699	1.771	0.80843	1.656
10 - 20	15	60	11.695	14.230	175.4	21.033	5174	1.176	13.755	0.33131	1.284
20 - 30	25	116	22.612	36.842	565.3	11.033	2753	1.398	31.610	0.10946	0.271
30 - 40	35	152	29.630	66.472	1037.0	1.033	32	1.544	45.750	-0.03666	0.040
40 - 50	45	78	15.205	81.676	684.2	-8.967	1223	1.653	25.137	-0.14581	0.323
50 - 60	55	53	10.331	92.008	568.2	-18.967	3717	1.740	17.980	-0.23296	0.561
60 - 70	65	24	4.678	96.686	304.1	-28.967	3926	1.813	8.481	-0.30551	0.437
70 - 80	75	14	2.729	99.415	204.7	-38.967	4144	1.875	5.117	-0.36766	0.369
80 - 90	85	2	0.390	99.805	33.1	-48.967	935	1.929	0.752	-0.42201	0.069
90 - 100	95	1	0.195	100.000	18.5	-58.967	678	1.978	0.386	-0.47032	0.043
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-63.967	0	2.000	0.000	-0.49260	0.000
	Total	513	100.000		3603.3		25020		150.740		5.053

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 36.033 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.897

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 32.167 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.682



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

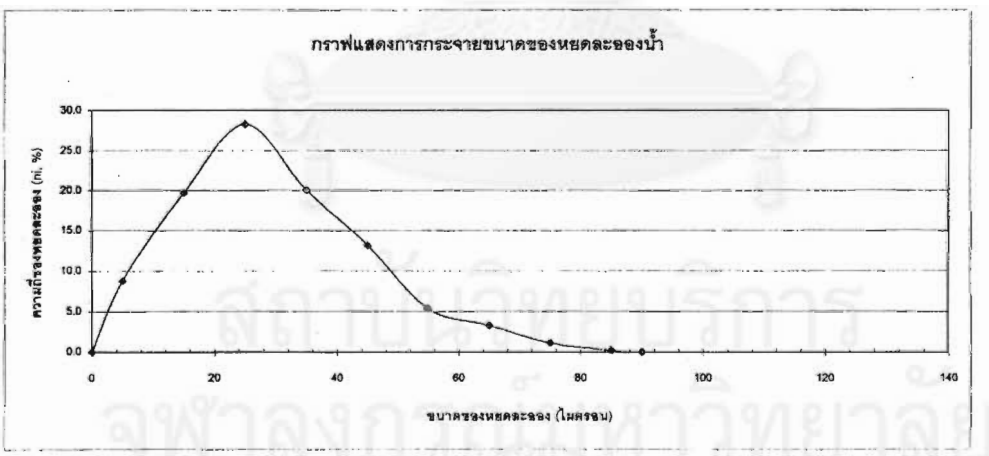
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	29.512	0	0.000	0.000	1.39410	0.000
0 - 10	5	46	8.795	8.795	44.0	24.512	5285	0.699	6.148	0.69513	4.250
10 - 20	15	103	19.694	28.489	295.4	14.512	4148	1.176	23.162	0.21801	0.936
20 - 30	25	148	28.298	56.788	707.5	4.512	576	1.398	39.559	-0.00384	0.000
30 - 40	35	105	20.076	76.864	702.7	-5.488	605	1.544	30.999	-0.14997	0.452
40 -50	45	69	13.193	90.057	593.7	-15.488	3165	1.653	21.811	-0.25911	0.886
50 - 60	55	28	5.354	95.411	294.5	-25.488	3478	1.740	9.317	-0.34626	0.642
60 - 70	65	17	3.250	98.662	211.3	-35.488	4094	1.813	5.893	-0.41882	0.570
70 - 80	75	6	1.147	99.809	86.0	-45.488	2374	1.875	2.151	-0.48096	0.265
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.3	-55.488	589	1.929	0.369	-0.53532	0.055
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-60.488	0	1.954	0.000	-0.56014	0.000
	Total	523	100.000		2951.2		24312		139.410		8.056

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 29.512 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.671

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.780 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.929



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

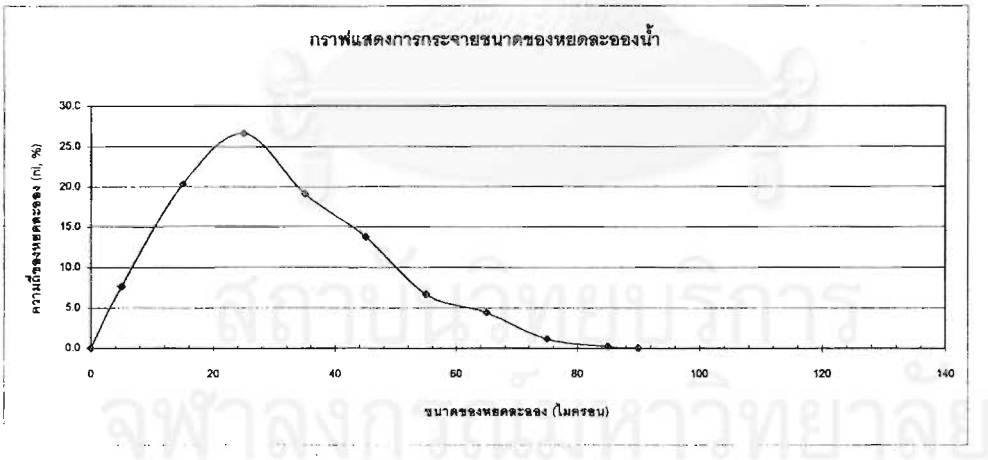
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulaitve	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.575	0	0.000	0.000	1.41028	0.000
0 - 10	5	40	7.663	7.663	38.3	25.575	5012	0.699	5.356	0.71131	3.877
10 - 20	15	106	20.307	27.969	304.6	15.575	4926	1.176	23.882	0.23419	1.114
20 - 30	25	139	26.628	54.598	665.7	5.575	828	1.398	37.225	0.01234	0.004
30 - 40	35	100	19.157	73.755	670.5	-4.425	375	1.544	29.580	-0.13379	0.343
40 -50	45	72	13.793	87.548	620.7	-14.425	2870	1.653	22.803	-0.24293	0.814
50 - 60	55	35	6.705	94.253	368.8	-24.425	4000	1.740	11.669	-0.33008	0.731
60 - 70	65	23	4.406	98.659	286.4	-34.425	5222	1.813	7.988	-0.40263	0.714
70 - 80	75	6	1.149	99.808	86.2	-44.425	2269	1.875	2.155	-0.46478	0.248
80 - 90	85	1	0.192	100.000	16.3	-54.425	567	1.929	0.370	-0.51914	0.052
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.425	0	1.954	0.000	-0.54396	0.000
	Total	522	100.000		3057.5		26069		141.028		7.897

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.575 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.227

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.720 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.916



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เวโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.5	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

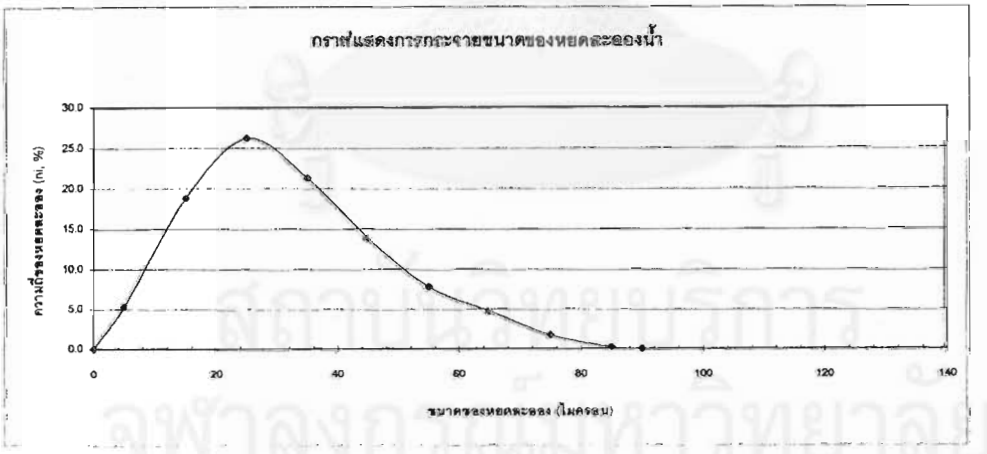
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.167	0	0.000	0.000	1.44111	0.000
0 - 10	5	28	5.323	5.323	26.6	27.167	3929	0.699	3.721	0.74214	2.932
10 - 20	15	99	18.821	24.144	282.3	17.167	5547	1.176	22.136	0.26502	1.322
20 - 30	25	138	26.236	50.380	655.9	7.167	1348	1.398	36.676	0.04317	0.049
30 - 40	35	112	21.293	71.673	745.2	-2.833	171	1.544	32.877	-0.10296	0.226
40 -50	45	73	13.878	85.551	624.5	-12.833	2285	1.653	22.944	-0.21210	0.624
50 - 60	55	41	7.795	93.346	428.7	-22.833	4064	1.740	13.566	-0.29925	0.698
60 - 70	65	25	4.753	98.099	308.9	-32.833	5124	1.813	8.617	-0.37181	0.657
70 - 80	75	9	1.711	99.810	128.3	-42.833	3139	1.875	3.208	-0.43395	0.322
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.2	-52.833	531	1.929	0.367	-0.48831	0.045
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-57.833	0	1.954	0.000	-0.51313	0.000
	Total	526	100.000		3216.7		26137		144.111		6.875

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.167 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))^{1/2}$ = 16.248

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.613 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.835



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

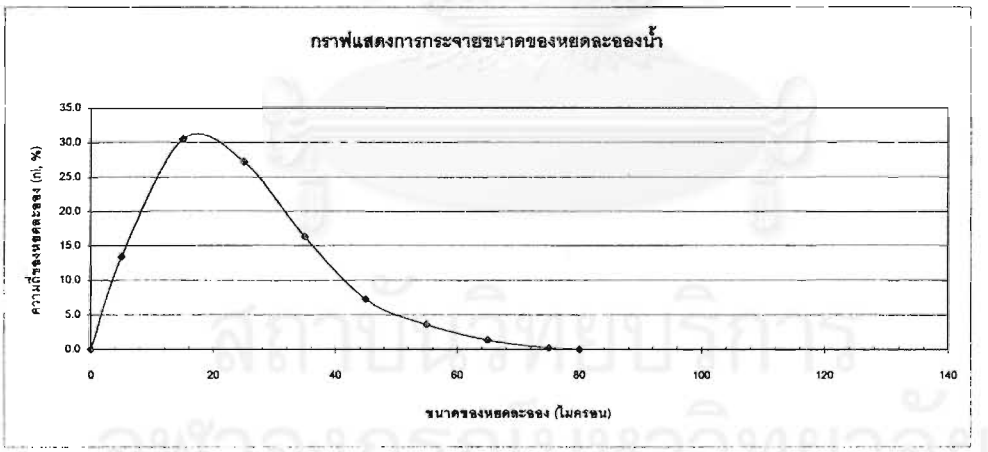
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.079	0	0.000	0.000	1.29776	0.000
0 - 10	5	70	13.436	13.436	67.2	19.079	4891	0.699	9.391	0.59879	4.817
10 - 20	15	159	30.518	43.954	457.8	9.079	2515	1.176	35.892	0.12167	0.452
20 - 30	25	142	27.255	71.209	681.4	-0.921	23	1.398	38.101	-0.10018	0.274
30 - 40	35	85	16.315	87.524	571.0	-10.921	1946	1.544	25.191	-0.24631	0.990
40 -50	45	38	7.294	94.818	328.2	-20.921	3192	1.653	12.058	-0.35545	0.922
50 - 60	55	19	3.647	98.464	200.6	-30.921	3487	1.740	6.347	-0.44260	0.714
60 - 70	65	7	1.344	99.808	87.3	-40.921	2250	1.813	2.436	-0.51515	0.357
70 - 80	75	1	0.192	100.000	14.4	-50.921	498	1.875	0.360	-0.57730	0.064
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-55.921	0	1.903	0.000	-0.60533	0.000
	Total	521	100.000		2407.9		18802		129.776		8.589

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 24.079 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.781

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 19.850 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.970



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

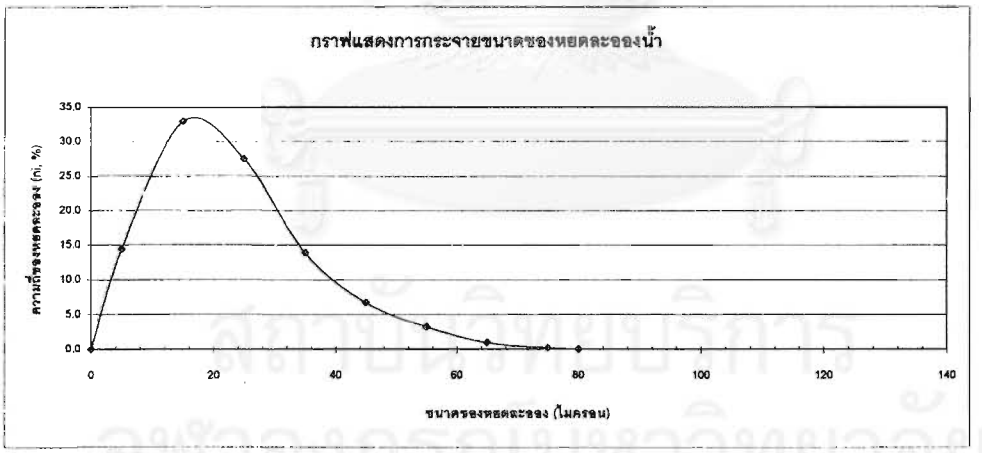
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	23.015	0	0.000	0.000	1.27746	0.000
0 - 10	5	75	14.451	14.451	72.3	18.015	4690	0.699	10.101	0.57849	4.836
10 - 20	15	171	32.948	47.399	494.2	8.015	2117	1.176	38.750	0.10137	0.339
20 - 30	25	143	27.553	74.952	688.8	-1.985	109	1.398	38.517	-0.12048	0.400
30 - 40	35	72	13.873	88.825	485.5	-11.985	1993	1.544	21.421	-0.26661	0.986
40 -50	45	35	6.744	95.568	303.5	-21.985	3259	1.653	11.149	-0.37575	0.952
50 - 60	55	17	3.276	98.844	180.2	-31.985	3351	1.740	5.701	-0.46290	0.702
60 - 70	65	5	0.963	99.807	62.6	-41.985	1698	1.813	1.747	-0.53545	0.276
70 - 80	75	1	0.193	100.000	14.5	-51.985	521	1.875	0.361	-0.59760	0.069
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-56.985	0	1.903	0.000	-0.62563	0.000
	Total	519	100.000		2301.5		17737		127.746		8.560

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 23.015 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ([\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 13.385

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 18.943 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.968

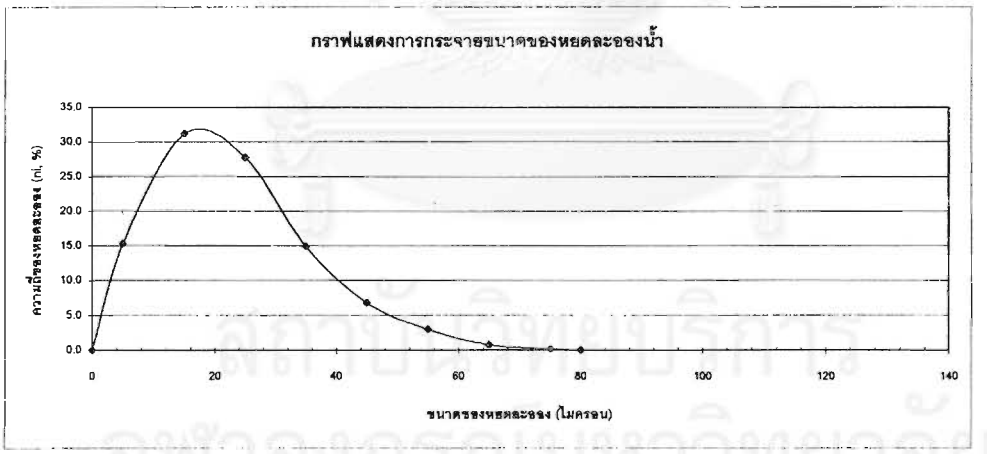


ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	22.977	0	0.000	0.000	1.27531	0.000
0 - 10	5	81	15.312	15.312	76.6	17.977	4949	0.699	10.703	0.57634	5.086
10 - 20	15	165	31.191	46.503	467.9	7.977	1985	1.176	36.683	0.09922	0.307
20 - 30	25	147	27.788	74.291	694.7	-2.023	114	1.398	38.846	-0.12263	0.418
30 - 40	35	79	14.934	89.225	522.7	-12.023	2159	1.544	23.059	-0.26876	1.079
40 -50	45	36	6.805	96.030	306.2	-22.023	3301	1.653	11.251	-0.37790	0.972
50 - 60	55	16	3.025	99.055	166.4	-32.023	3102	1.740	5.264	-0.46505	0.654
60 - 70	65	4	0.756	99.811	49.1	-42.023	1335	1.813	1.371	-0.53760	0.219
70 - 80	75	1	0.189	100.000	14.2	-52.023	512	1.875	0.354	-0.59975	0.068
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-57.023	0	1.903	0.000	-0.62778	0.000
	Total	529	100.000		2297.7		17455		127.531		8.802

Arithmetic mean (d_{mean})	=	$\Sigma n_i d / \Sigma n_i$	=	22.977 ไมครอน
standard deviation σ	=	$\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$	=	13.278
geometric mean(d_g)	=	$\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$	=	18.850 ไมครอน
gemetric standard deviation σ_g	=	$\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$	=	1.987



อิทธิพลของอัตราการไหลของของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

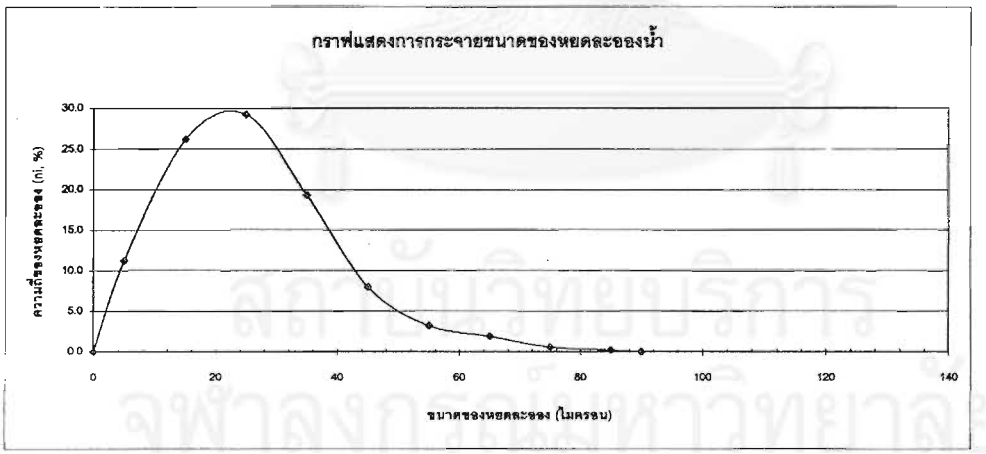
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.803	0	0.000	0.000	1.33251	0.000
0 - 10	5	59	11.281	11.281	56.4	20.803	4882	0.699	7.885	0.63354	4.528
10 - 20	15	137	26.195	37.476	392.9	10.803	3057	1.176	30.808	0.15642	0.641
20 - 30	25	153	29.254	66.730	731.4	0.803	19	1.398	40.896	-0.06543	0.125
30 - 40	35	101	19.312	86.042	675.9	-9.197	1633	1.544	29.819	-0.21156	0.864
40 -50	45	42	8.031	94.073	361.4	-19.197	2959	1.653	13.276	-0.32070	0.826
50 - 60	55	17	3.250	97.323	178.8	-29.197	2771	1.740	5.657	-0.40785	0.541
60 - 70	65	10	1.912	99.235	124.3	-39.197	2938	1.813	3.466	-0.48040	0.441
70 - 80	75	3	0.574	99.809	43.0	-49.197	1388	1.875	1.076	-0.54255	0.169
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.3	-59.197	670	1.929	0.369	-0.59691	0.068
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-64.197	0	1.954	0.000	-0.62173	0.000
	Total	523	100.000		2580.3		20318		133.251		8.203

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 25.803 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.326

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 21.504 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.940



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

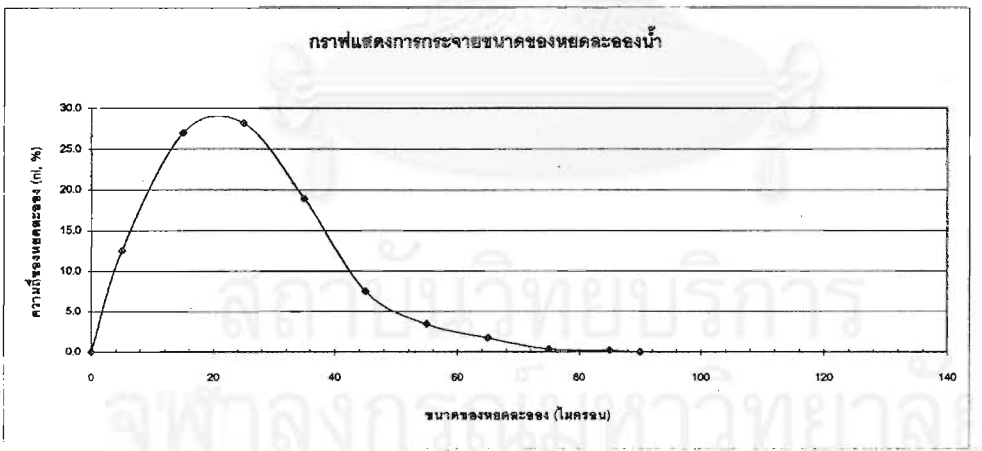
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.232	0	0.000	0.000	1.31911	0.000
0 - 10	5	65	12.548	12.548	62.7	20.232	5136	0.699	8.771	0.62014	4.826
10 - 20	15	140	27.027	39.575	405.4	10.232	2829	1.176	31.786	0.14302	0.553
20 - 30	25	146	28.185	67.761	704.6	0.232	2	1.398	39.401	-0.07883	0.175
30 - 40	35	98	18.919	86.680	662.2	-9.768	1805	1.544	29.212	-0.22495	0.957
40 -50	45	39	7.529	94.208	338.8	-19.768	2942	1.653	12.447	-0.33410	0.840
50 - 60	55	18	3.475	97.683	191.1	-29.768	3079	1.740	6.048	-0.42125	0.617
60 - 70	65	9	1.737	99.421	112.9	-39.768	2748	1.813	3.150	-0.49380	0.424
70 - 80	75	2	0.386	99.807	29.0	-49.768	956	1.875	0.724	-0.55595	0.119
80 - 90	85	1	0.193	100.000	16.4	-59.768	690	1.929	0.372	-0.61030	0.072
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-64.768	0	1.954	0.000	-0.63513	0.000
	Total	518	100.000		2523.2		20188		131.911		8.583

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.232 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 14.280

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.850 ไมครอน

gametric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.970



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

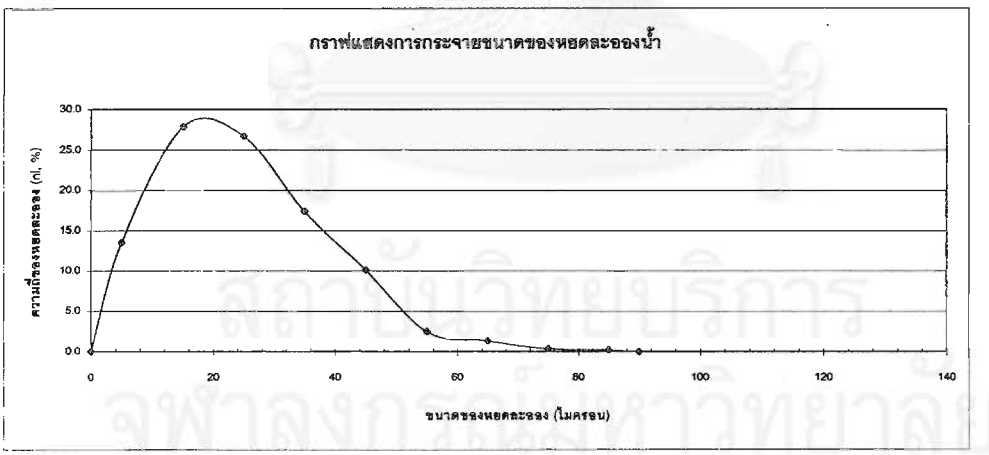
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.847	0	0.000	0.000	1.30949	0.000
0 - 10	5	71	13.550	13.550	67.7	19.847	5337	0.699	9.471	0.61052	5.050
10 - 20	15	146	27.863	41.412	417.9	9.847	2702	1.176	32.769	0.13340	0.496
20 - 30	25	140	26.718	68.130	667.9	-0.153	1	1.398	37.350	-0.08845	0.209
30 - 40	35	91	17.366	85.496	607.8	-10.153	1790	1.544	26.815	-0.23458	0.956
40 -50	45	53	10.115	95.611	455.2	-20.153	4108	1.653	16.721	-0.34372	1.195
50 - 60	55	13	2.481	98.092	136.5	-30.153	2256	1.740	4.318	-0.43087	0.461
60 - 70	65	7	1.336	99.427	86.8	-40.153	2154	1.813	2.422	-0.50342	0.339
70 - 80	75	2	0.382	99.809	28.6	-50.153	960	1.875	0.716	-0.56557	0.122
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.2	-60.153	691	1.929	0.368	-0.61993	0.073
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.153	0	1.954	0.000	-0.64475	0.000
	Total	524	100.000		2484.7		19998		130.949		8.900

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.847 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.213

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.393 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.995



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

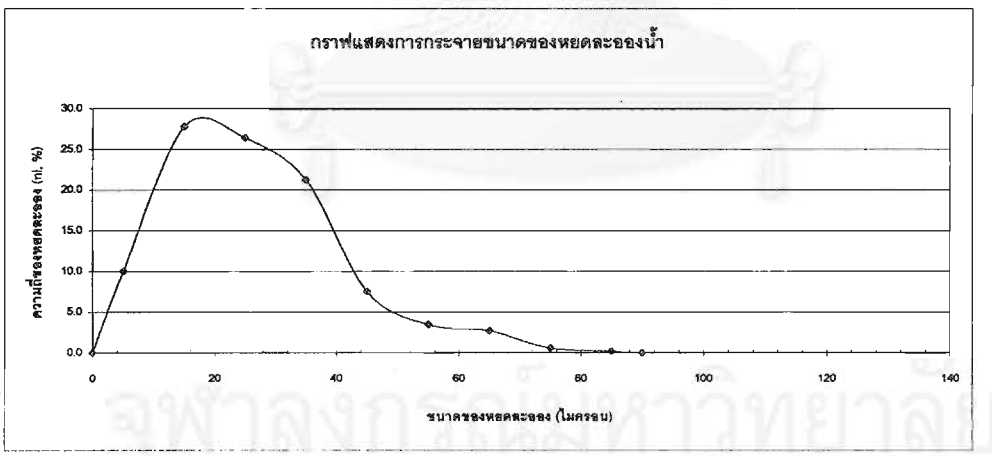
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	26.371	0	0.000	0.000	1.34325	0.000
0 - 10	5	52	10.039	10.039	50.2	21.371	4585	0.699	7.017	0.64428	4.167
10 - 20	15	144	27.799	37.838	417.0	11.371	3594	1.176	32.654	0.16716	0.777
20 - 30	25	137	26.448	64.286	661.2	1.371	50	1.398	36.973	-0.05469	0.079
30 - 40	35	110	21.236	85.521	743.2	-8.629	1581	1.544	32.789	-0.20081	0.856
40 -50	45	39	7.529	93.050	338.8	-18.629	2613	1.653	12.447	-0.30996	0.723
50 - 60	55	18	3.475	96.525	191.1	-28.629	2848	1.740	6.048	-0.39711	0.548
60 - 70	65	14	2.703	99.228	175.7	-38.629	4033	1.813	4.900	-0.46966	0.596
70 - 80	75	3	0.579	99.807	43.4	-48.629	1370	1.875	1.086	-0.53181	0.164
80 - 90	85	1	0.193	100.000	16.4	-58.629	664	1.929	0.372	-0.58616	0.066
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-63.629	0	1.954	0.000	-0.61099	0.000
	Total	518	100.000		2637.1		21337		134.325		7.977

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 26.371 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 14.681

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}\{\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i\}$ = 22.042 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.922



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

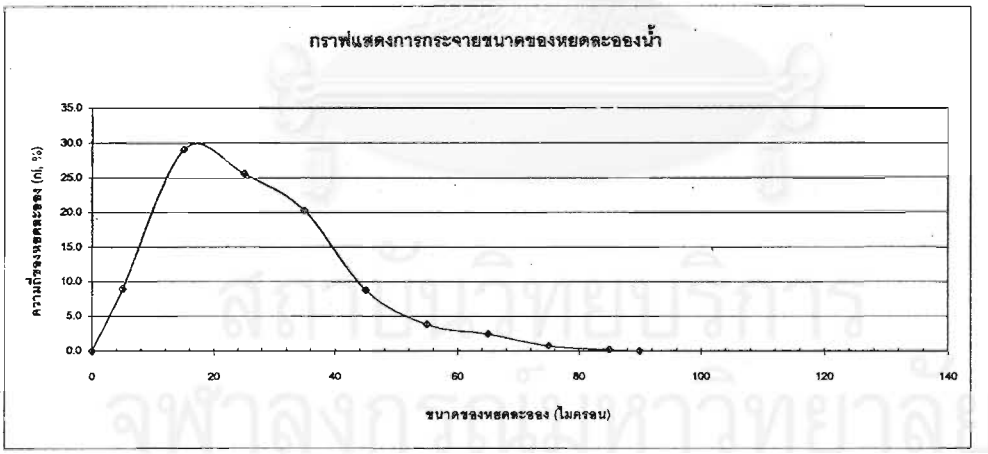
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	26.721	0	0.000	0.000	1.35079	0.000
0 - 10	5	47	8.987	8.987	44.9	21.721	4240	0.699	6.281	0.65182	3.818
10 - 20	15	152	29.063	38.050	435.9	11.721	3993	1.176	34.181	0.17470	0.887
20 - 30	25	134	25.621	63.671	640.5	1.721	76	1.398	35.817	-0.04715	0.057
30 - 40	35	106	20.268	83.939	709.4	-8.279	1389	1.544	31.295	-0.19327	0.757
40 -50	45	46	8.795	92.734	395.8	-18.279	2939	1.653	14.541	-0.30242	0.804
50 - 60	55	20	3.824	96.558	210.3	-28.279	3058	1.740	6.655	-0.38957	0.580
60 - 70	65	13	2.486	99.044	161.6	-38.279	3642	1.813	4.506	-0.46212	0.531
70 - 80	75	4	0.765	99.809	57.4	-48.279	1783	1.875	1.434	-0.52427	0.210
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.3	-58.279	649	1.929	0.369	-0.57863	0.064
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-63.279	0	1.954	0.000	-0.60345	0.000
	Total	523	100.000		2672.1		21769		135.079		7.709

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 26.721 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]]^{1/2}$ = 14.829

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 22.428 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.901



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

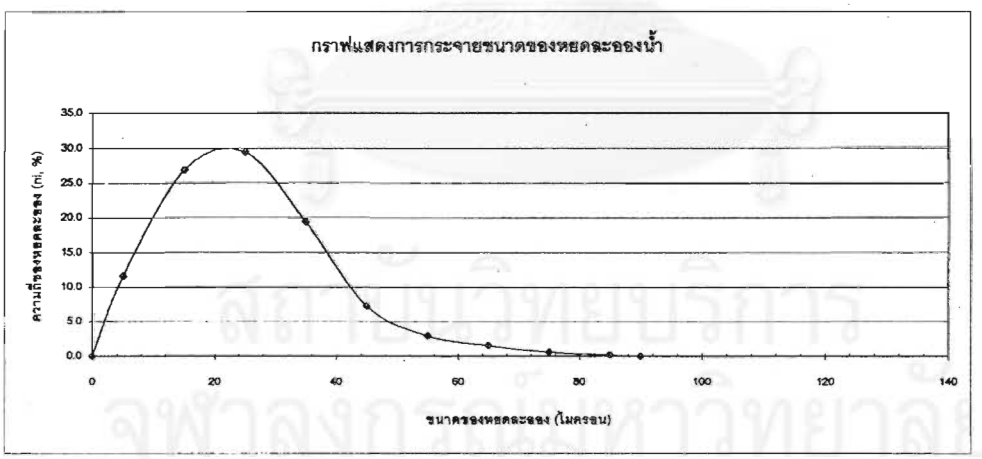
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.314	0	0.000	0.000	1.32486	0.000
0 - 10	5	59	11.591	11.591	58.0	20.314	4783	0.699	8.102	0.62569	4.538
10 - 20	15	137	26.916	38.507	403.7	10.314	2863	1.176	31.655	0.14856	0.594
20 - 30	25	150	29.470	67.976	736.7	0.314	3	1.398	41.197	-0.07328	0.158
30 - 40	35	99	19.450	87.426	680.7	-9.686	1825	1.544	30.032	-0.21941	0.936
40 -50	45	37	7.269	94.695	327.1	-19.686	2817	1.653	12.017	-0.32856	0.785
50 - 60	55	15	2.947	97.642	162.1	-29.686	2597	1.740	5.129	-0.41571	0.509
60 - 70	65	8	1.572	99.214	102.2	-39.686	2475	1.813	2.849	-0.48826	0.375
70 - 80	75	3	0.589	99.804	44.2	-49.686	1455	1.875	1.105	-0.55041	0.179
80 - 90	85	1	0.196	100.000	16.7	-59.686	700	1.929	0.379	-0.60476	0.072
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-64.686	0	1.954	0.000	-0.62959	0.000
	Total	509	100.000		2531.4		19519		132.466		8.146

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 25.314 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / \{(\Sigma n_i) - 1\}]^{1/2}$ = 14.041

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 21.118 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.936



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

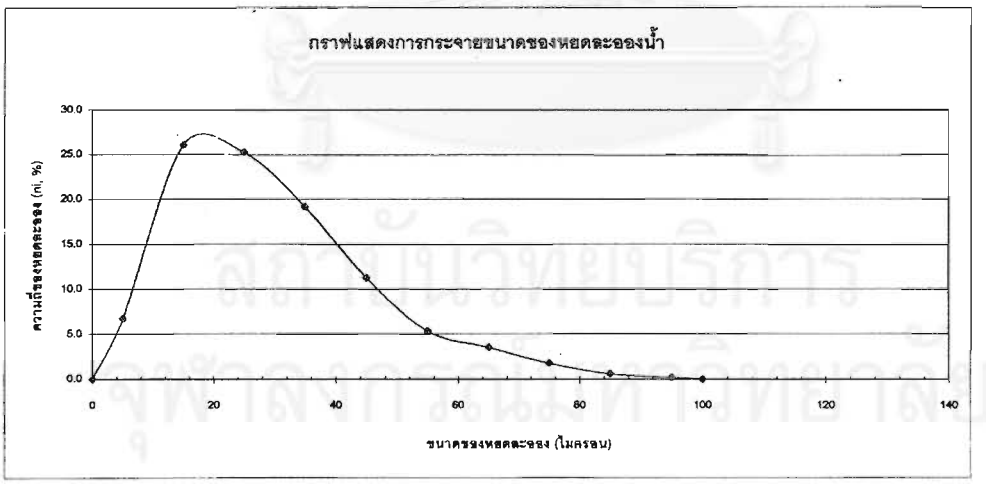
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	29.625	0	0.000	0.000	1.39569	0.000
0 - 10	5	34	6.719	6.719	33.6	24.625	4074	0.699	4.697	0.69672	3.262
10 - 20	15	132	26.087	32.806	391.3	14.625	5579	1.176	30.681	0.21959	1.258
20 - 30	25	128	25.296	58.103	632.4	4.625	541	1.398	35.363	-0.00225	0.000
30 - 40	35	97	19.170	77.273	670.9	-5.375	554	1.544	29.600	-0.14838	0.422
40 -50	45	57	11.265	88.538	506.9	-15.375	2663	1.653	18.623	-0.25753	0.747
50 - 60	55	27	5.336	93.874	293.5	-25.375	3436	1.740	9.287	-0.34468	0.634
60 - 70	65	18	3.557	97.431	231.2	-35.375	4452	1.813	6.449	-0.41723	0.619
70 - 80	75	9	1.779	99.209	133.4	-45.375	3662	1.875	3.335	-0.47938	0.409
80 - 90	85	3	0.593	99.802	50.4	-55.375	1818	1.929	1.144	-0.53373	0.169
90 - 100	95	1	0.198	100.000	18.8	-65.375	845	1.978	0.391	-0.58204	0.067
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-70.375	0	2.000	0.000	-0.60431	0.000
	Total	506	100.000		2962.5		27624		139.569		7.587

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 29.625 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.704

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.871 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.892



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

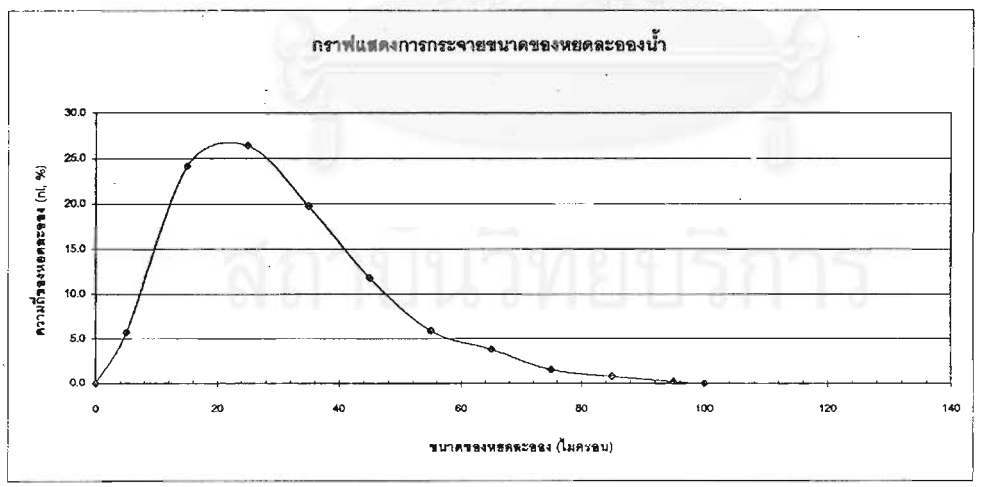
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.418	0	0.000	0.000	1.41185	0.000
0 - 10	5	30	5.703	5.703	28.5	25.418	3685	0.699	3.987	0.71288	2.898
10 - 20	15	127	24.144	29.848	362.2	15.418	5740	1.176	28.396	0.23576	1.342
20 - 30	25	139	26.426	56.274	660.6	5.418	776	1.398	36.942	0.01391	0.005
30 - 40	35	104	19.772	76.046	692.0	-4.582	415	1.544	30.529	-0.13222	0.346
40 -50	45	62	11.787	87.833	530.4	-14.582	2506	1.653	19.487	-0.24136	0.687
50 - 60	55	31	5.894	93.726	324.1	-24.582	3561	1.740	10.257	-0.32851	0.636
60 - 70	65	20	3.802	97.529	247.1	-34.582	4547	1.813	6.893	-0.40106	0.612
70 - 80	75	8	1.521	99.049	114.1	-44.582	3023	1.875	2.852	-0.46321	0.326
80 - 90	85	4	0.760	99.810	64.6	-54.582	2266	1.929	1.467	-0.51757	0.204
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-64.582	793	1.978	0.376	-0.56587	0.061
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-69.582	0	2.000	0.000	-0.58815	0.000
	Total	526	100.000		3041.8		27311		141.185		7.116

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.418 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.609

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 25.814 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.854



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

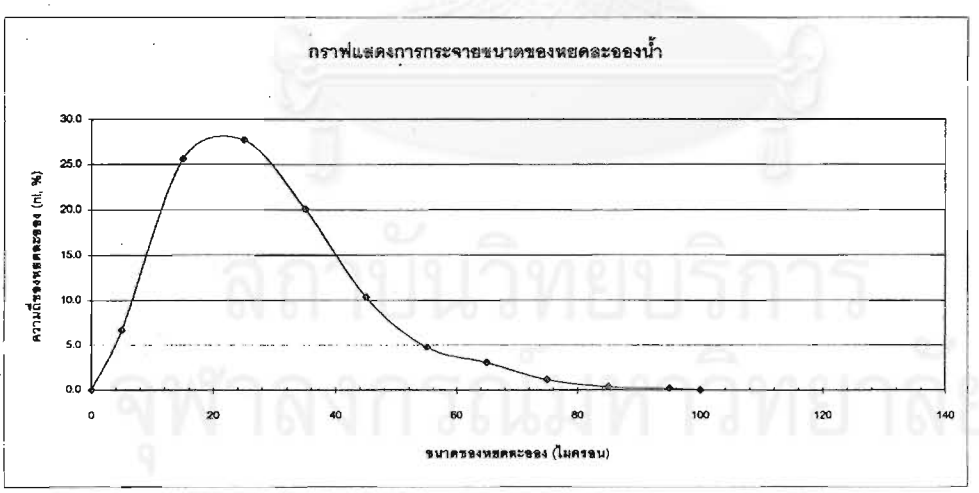
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	28.767	0	0.000	0.000	1.38770	0.000
0 - 10	5	35	6.692	6.692	33.5	23.767	3780	0.699	4.678	0.68873	3.174
10 - 20	15	134	25.621	32.314	384.3	13.767	4856	1.176	30.133	0.21160	1.147
20 - 30	25	145	27.725	60.038	693.1	3.767	393	1.398	38.757	-0.01024	0.003
30 - 40	35	105	20.076	80.115	702.7	-6.233	780	1.544	30.999	-0.15637	0.491
40 -50	45	54	10.325	90.440	464.6	-16.233	2721	1.653	17.069	-0.26552	0.728
50 - 60	55	25	4.780	95.220	262.9	-26.233	3290	1.740	8.319	-0.35267	0.595
60 - 70	65	16	3.059	98.279	198.9	-36.233	4016	1.813	5.546	-0.42522	0.553
70 - 80	75	6	1.147	99.426	86.0	-46.233	2452	1.875	2.151	-0.48737	0.272
80 - 90	85	2	0.382	99.809	32.5	-56.233	1209	1.929	0.738	-0.54172	0.112
90 - 100	95	1	0.191	100.000	18.2	-66.233	839	1.978	0.378	-0.59003	0.067
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-71.233	0	2.000	0.000	-0.61230	0.000
	Total	523	100.000		2876.7		24336		138.770		7.142

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 28.767 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 15.679

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 24.417 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.856



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

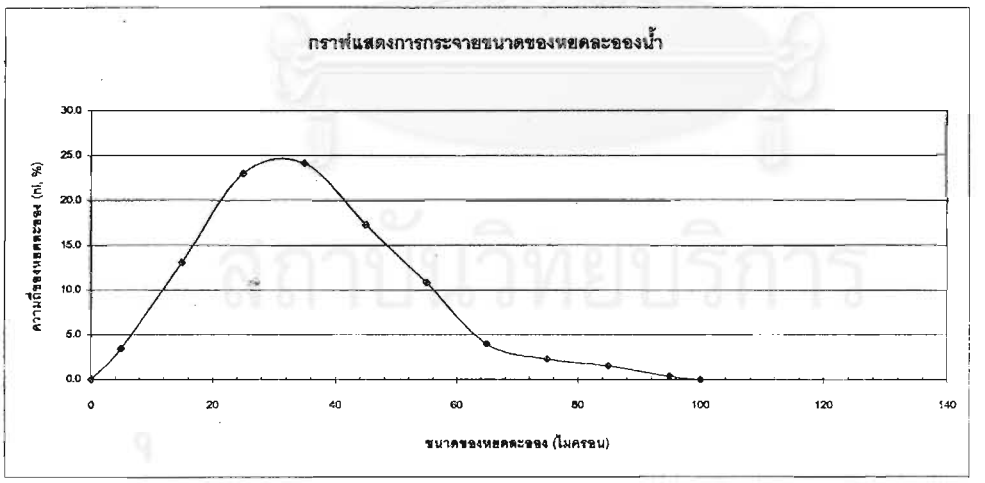
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	36.046	0	0.000	0.000	1.49921	0.000
0 - 10	5	18	3.422	3.422	17.1	31.046	3298	0.699	2.392	0.80024	2.191
10 - 20	15	69	13.118	16.540	196.8	21.046	5810	1.176	15.428	0.32312	1.370
20 - 30	25	121	23.004	39.544	575.1	11.046	2807	1.398	32.158	0.10127	0.236
30 - 40	35	127	24.144	63.688	845.1	1.046	26	1.544	37.281	-0.04486	0.049
40 - 50	45	91	17.300	80.989	778.5	-8.954	1387	1.653	28.601	-0.15400	0.410
50 - 60	55	57	10.837	91.825	596.0	-18.954	3893	1.740	18.859	-0.24115	0.630
60 - 70	65	21	3.992	95.817	259.5	-28.954	3347	1.813	7.238	-0.31370	0.393
70 - 80	75	12	2.281	98.099	171.1	-38.954	3462	1.875	4.278	-0.37585	0.322
80 - 90	85	8	1.521	99.620	129.3	-48.954	3645	1.929	2.934	-0.43021	0.281
90 - 100	95	2	0.380	100.000	36.1	-58.954	1322	1.978	0.752	-0.47851	0.087
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-63.954	0	2.000	0.000	-0.50079	0.000
	Total	526	100.000		3604.6		28997		149.921		5.970

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 36.046 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.114

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.565 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.760



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

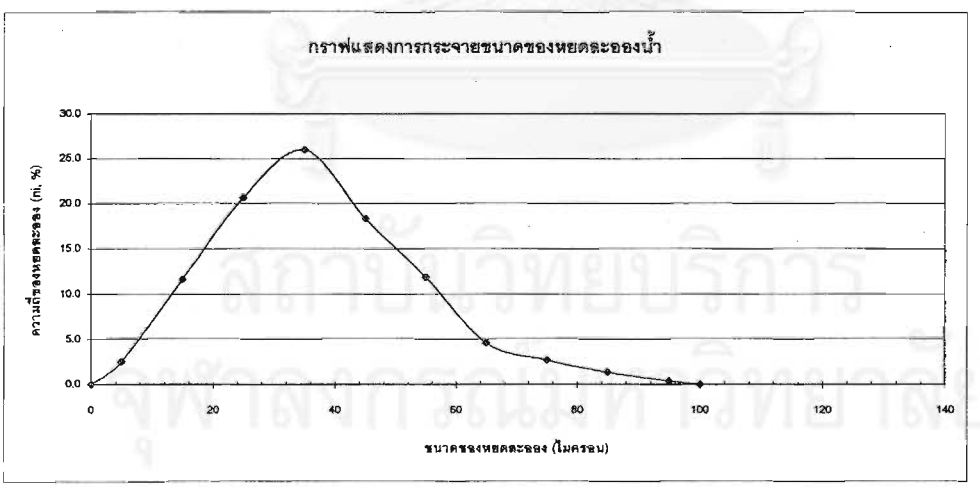
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	37.409	0	0.000	0.000	1.52128	0.000
0 - 10	5	13	2.486	2.486	12.4	32.409	2611	0.699	1.737	0.82231	1.681
10 - 20	15	61	11.663	14.149	175.0	22.409	5857	1.176	13.717	0.34519	1.390
20 - 30	25	108	20.650	34.799	516.3	12.409	3180	1.398	28.868	0.12334	0.314
30 - 40	35	136	26.004	60.803	910.1	2.409	151	1.544	40.152	-0.02278	0.013
40 -50	45	96	18.356	79.159	826.0	-7.591	1058	1.653	30.346	-0.13193	0.319
50 - 60	55	62	11.855	91.013	652.0	-17.591	3668	1.740	20.631	-0.21908	0.569
60 - 70	65	24	4.589	95.602	298.3	-27.591	3493	1.813	8.319	-0.29163	0.390
70 - 80	75	14	2.677	98.279	200.8	-37.591	3783	1.875	5.019	-0.35378	0.335
80 - 90	85	7	1.338	99.618	113.8	-47.591	3031	1.929	2.582	-0.40813	0.223
90 - 100	95	2	0.382	100.000	36.3	-57.591	1268	1.978	0.756	-0.45644	0.080
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.591	0	2.000	0.000	-0.47872	0.000
	Total	523	100.000		3740.9		28100		152.128		5.315

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.409 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.848

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 33.211 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.705



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	2	
ความถี่ของหัวฉีด	:	26.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

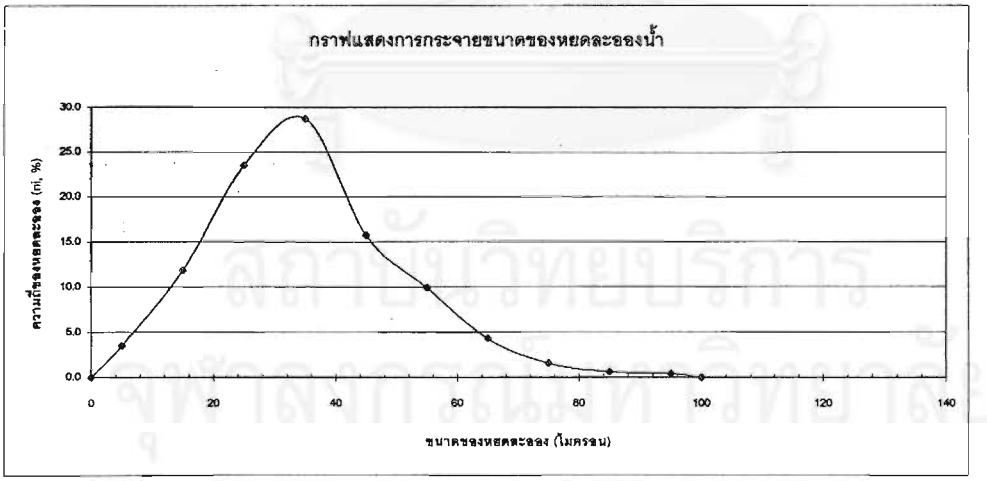
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	35.214	0	0.000	0.000	1.49377	0.000
0 - 10	5	18	3.495	3.495	17.5	30.214	3191	0.699	2.443	0.79480	2.208
10 - 20	15	61	11.845	15.340	177.7	20.214	4840	1.176	13.930	0.31768	1.195
20 - 30	25	121	23.495	38.835	587.4	10.214	2451	1.398	32.845	0.09583	0.216
30 - 40	35	148	28.738	67.573	1005.8	0.214	1	1.544	44.373	-0.05030	0.073
40 -50	45	81	15.728	83.301	707.8	-9.786	1506	1.653	26.002	-0.15944	0.400
50 - 60	55	51	9.903	93.204	544.7	-19.786	3877	1.740	17.235	-0.24659	0.602
60 - 70	65	22	4.272	97.476	277.7	-29.786	3790	1.813	7.744	-0.31914	0.435
70 - 80	75	8	1.553	99.029	116.5	-39.786	2459	1.875	2.913	-0.38129	0.226
80 - 90	85	3	0.583	99.612	49.5	-49.786	1444	1.929	1.124	-0.43565	0.111
90 - 100	95	2	0.388	100.000	36.9	-59.786	1388	1.978	0.768	-0.48395	0.091
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-64.786	0	2.000	0.000	-0.50623	0.000
	Total	515	100.000		3521.4		24947		149.377		5.556

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 35.214 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.874

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.173 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)_i\}$ = 1.725



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

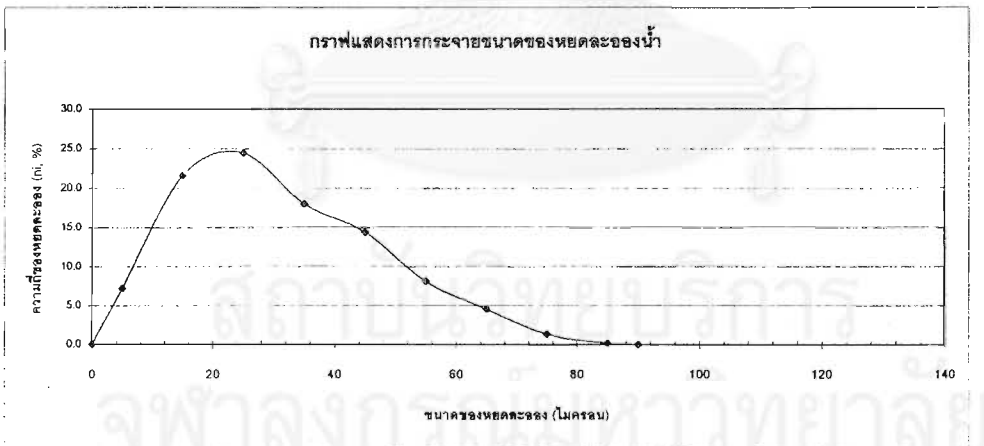
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	31.129	0	0.000	0.000	1.41689	0.000
0 - 10	5	38	7.211	7.211	36.1	26.129	4923	0.699	5.040	0.71792	3.716
10 - 20	15	114	21.632	28.843	324.5	16.129	5627	1.176	25.441	0.24080	1.254
20 - 30	25	129	24.478	53.321	612.0	6.129	920	1.398	34.219	0.01895	0.009
30 - 40	35	95	18.027	71.347	630.9	-3.871	270	1.544	27.834	-0.12718	0.292
40 - 50	45	76	14.421	85.769	649.0	-13.871	2775	1.653	23.841	-0.23632	0.805
50 - 60	55	43	8.159	93.928	448.8	-23.871	4649	1.740	14.200	-0.32347	0.854
60 - 70	65	24	4.554	98.482	296.0	-33.871	5225	1.813	8.256	-0.39602	0.714
70 - 80	75	7	1.328	99.810	99.6	-43.871	2556	1.875	2.491	-0.45817	0.279
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.1	-53.871	551	1.929	0.366	-0.51253	0.050
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-58.871	0	1.954	0.000	-0.53735	0.000
	Total	527	100.000		3112.9		27496		141.689		7.973

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 31.129 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.665

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 26.115 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.922



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

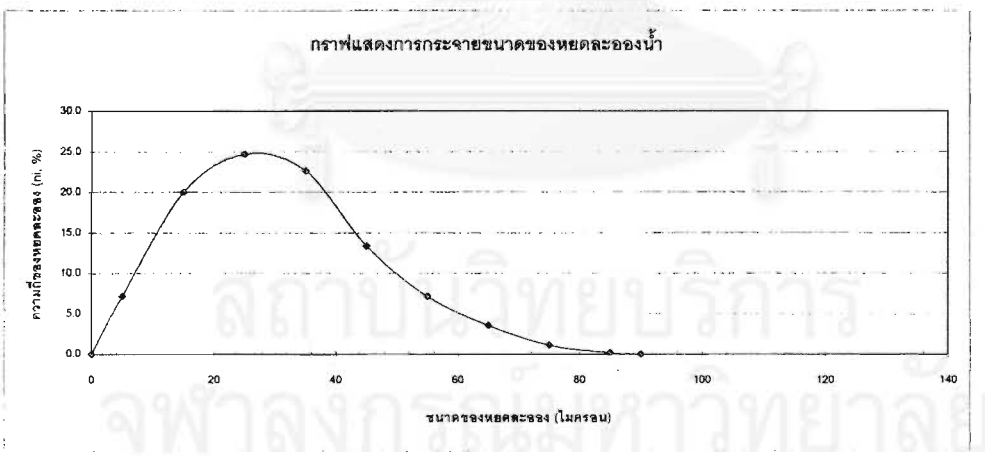
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.774	0	0.000	0.000	1.41657	0.000
0 - 10	5	38	7.170	7.170	35.8	25.774	4763	0.699	5.011	0.71760	3.692
10 - 20	15	106	20.000	27.170	300.0	15.774	4976	1.176	23.522	0.24048	1.157
20 - 30	25	131	24.717	51.887	617.9	5.774	824	1.398	34.553	0.01863	0.009
30 - 40	35	120	22.642	74.528	792.5	-4.226	404	1.544	34.960	-0.12750	0.368
40 -50	45	71	13.396	87.925	602.8	-14.226	2711	1.653	22.147	-0.23664	0.750
50 - 60	55	38	7.170	95.094	394.3	-24.226	4208	1.740	12.478	-0.32379	0.752
60 - 70	65	19	3.585	98.679	233.0	-34.226	4200	1.813	6.499	-0.39634	0.563
70 - 80	75	6	1.132	99.811	84.9	-44.226	2214	1.875	2.123	-0.45849	0.238
80 - 90	85	1	0.189	100.000	16.0	-54.226	555	1.929	0.364	-0.51285	0.050
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.226	0	1.954	0.000	-0.53767	0.000
	Total	530	100.000		3077.4		24855		141.657		7.578

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.774 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 15.845

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 26.096 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.891



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

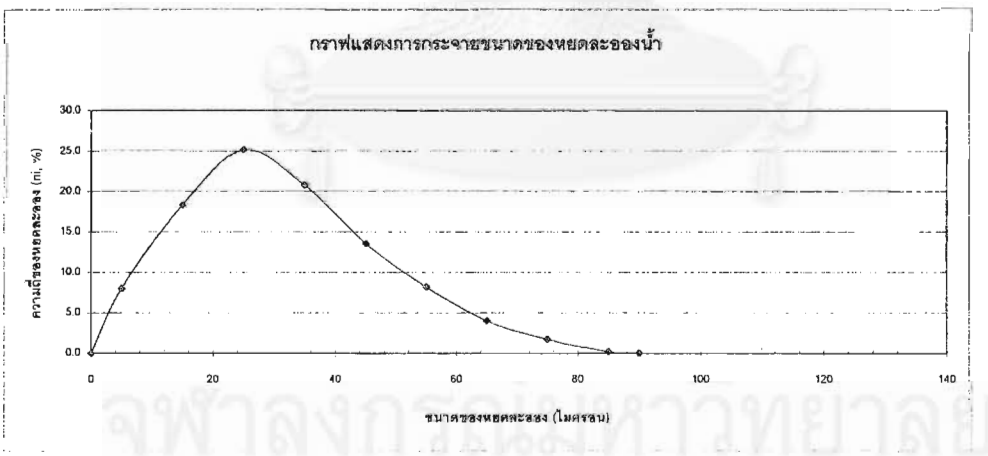
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	31.393	0	0.000	0.000	1.42020	0.000
0 - 10	5	42	8.015	8.015	40.1	26.393	5583	0.699	5.602	0.72123	4.169
10 - 20	15	96	18.321	26.336	274.8	16.393	4923	1.176	21.547	0.24410	1.092
20 - 30	25	132	25.191	51.527	629.8	6.393	1030	1.398	35.215	0.02226	0.012
30 - 40	35	109	20.802	72.328	728.1	-3.607	271	1.544	32.119	-0.12387	0.319
40 - 50	45	71	13.550	85.878	609.7	-13.607	2609	1.653	22.400	-0.23302	0.736
50 - 60	55	43	8.206	94.084	451.3	-23.607	4573	1.740	14.282	-0.32017	0.841
60 - 70	65	21	4.008	98.092	260.5	-33.607	4526	1.813	7.265	-0.39272	0.618
70 - 80	75	9	1.718	99.809	128.8	-43.607	3266	1.875	3.221	-0.45487	0.355
80 - 90	85	1	0.191	100.000	16.2	-53.607	548	1.929	0.368	-0.50922	0.049
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-58.607	0	1.954	0.000	-0.53405	0.000
	Total	524	100.000		3139.3		27230		142.020		8.192

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 31.393 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 16.585

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 26.315 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.939



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

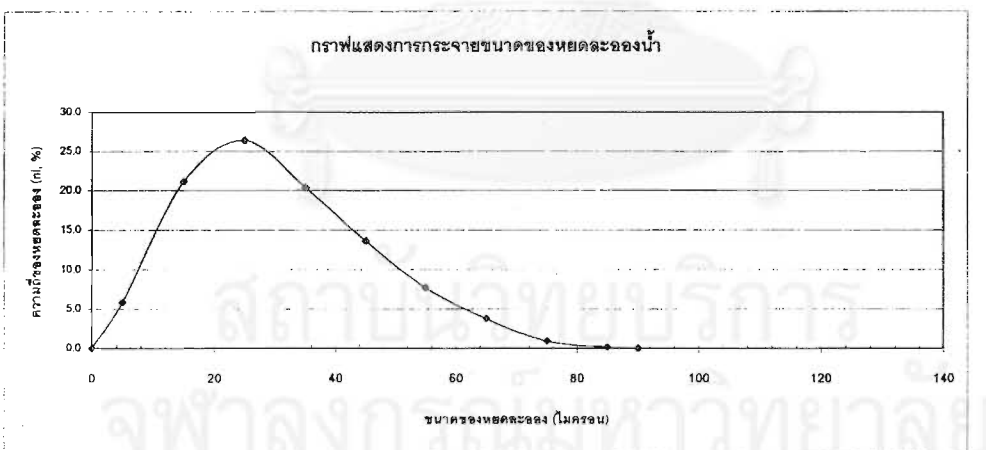
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.887	0	0.000	0.000	1.42228	0.000
0 - 10	5	31	5.849	5.849	29.2	25.887	3920	0.699	4.088	0.72331	3.060
10 - 20	15	112	21.132	26.981	317.0	15.887	5334	1.176	24.853	0.24619	1.281
20 - 30	25	140	26.415	53.396	660.4	5.887	915	1.398	36.927	0.02434	0.016
30 - 40	35	108	20.377	73.774	713.2	-4.113	345	1.544	31.464	-0.12178	0.302
40 - 50	45	72	13.585	87.358	611.3	-14.113	2706	1.653	22.459	-0.23093	0.724
50 - 60	55	41	7.736	95.094	425.5	-24.113	4498	1.740	13.463	-0.31808	0.783
60 - 70	65	20	3.774	98.868	245.3	-34.113	4391	1.813	6.841	-0.39063	0.576
70 - 80	75	5	0.943	99.811	70.8	-44.113	1836	1.875	1.769	-0.45278	0.193
80 - 90	85	1	0.189	100.000	16.0	-54.113	552	1.929	0.364	-0.50714	0.049
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.113	0	1.954	0.000	-0.53196	0.000
	Total	530	100.000		3088.7		24497		142.228		6.984

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 30.887 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 15.730

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 26.441 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.843



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

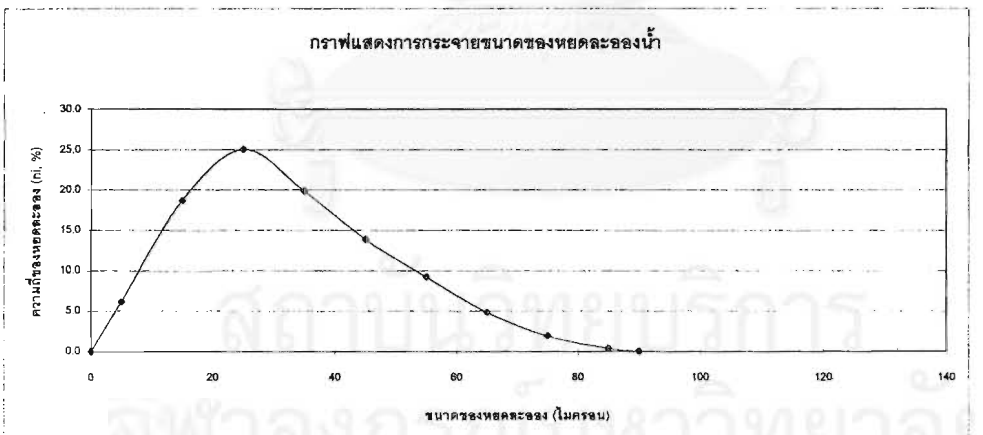
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.553	0	0.000	0.000	1.44069	0.000
0 - 10	5	32	6.166	6.166	30.8	27.553	4681	0.699	4.310	0.74172	3.392
10 - 20	15	97	18.690	24.855	280.3	17.553	5758	1.176	21.981	0.26460	1.309
20 - 30	25	130	25.048	49.904	626.2	7.553	1429	1.398	35.016	0.04275	0.046
30 - 40	35	103	19.846	69.750	694.6	-2.447	119	1.544	30.643	-0.10337	0.212
40 -50	45	72	13.873	83.622	624.3	-12.447	2149	1.653	22.935	-0.21252	0.627
50 - 60	55	48	9.249	92.871	508.7	-22.447	4660	1.740	16.096	-0.29967	0.831
60 - 70	65	25	4.817	97.688	313.1	-32.447	5071	1.813	8.733	-0.37222	0.667
70 - 80	75	10	1.927	99.615	144.5	-42.447	3472	1.875	3.613	-0.43437	0.364
80 - 90	85	2	0.385	100.000	32.8	-52.447	1060	1.929	0.744	-0.48873	0.092
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-57.447	0	1.954	0.000	-0.51355	0.000
	Total	519	100.000		3255.3		28399		144.069		7.539

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.553 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.937

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 27.586 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.888



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

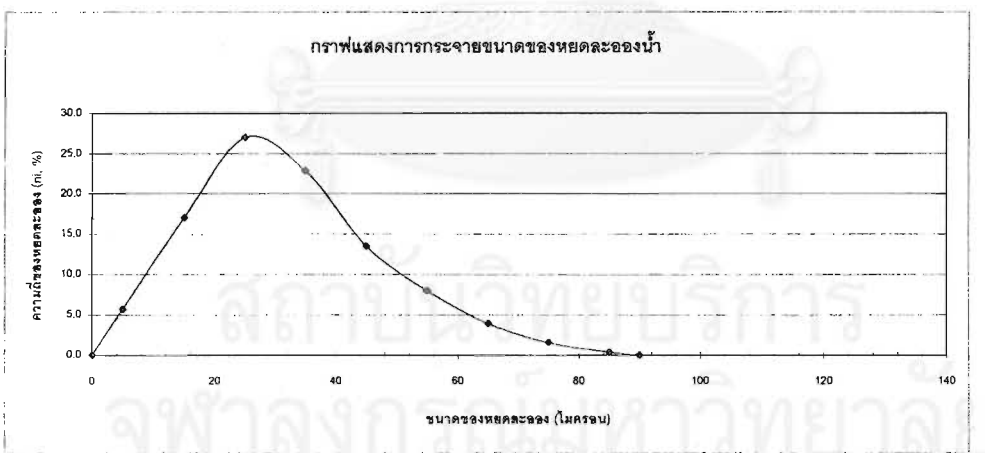
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.143	0	0.000	0.000	1.44169	0.000
0 - 10	5	29	5.675	5.675	28.4	27.143	4181	0.699	3.967	0.74272	3.131
10 - 20	15	87	17.025	22.701	255.4	17.143	5003	1.176	20.023	0.26560	1.201
20 - 30	25	138	27.006	49.706	675.1	7.143	1378	1.398	37.753	0.04375	0.052
30 - 40	35	117	22.896	72.603	801.4	-2.857	187	1.544	35.353	-0.10237	0.240
40 - 50	45	69	13.503	86.106	607.6	-12.857	2232	1.653	22.323	-0.21152	0.604
50 - 60	55	41	8.023	94.129	441.3	-22.857	4192	1.740	13.964	-0.29867	0.716
60 - 70	65	20	3.914	98.043	254.4	-32.857	4225	1.813	7.096	-0.37122	0.539
70 - 80	75	8	1.566	99.609	117.4	-42.857	2876	1.875	2.936	-0.43337	0.294
80 - 90	85	2	0.391	100.000	33.3	-52.857	1093	1.929	0.755	-0.48772	0.093
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-57.857	0	1.954	0.000	-0.51255	0.000
	Total	511	100.000		3214.3		25368		144.169		6.870

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.143 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.007

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.650 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.834



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

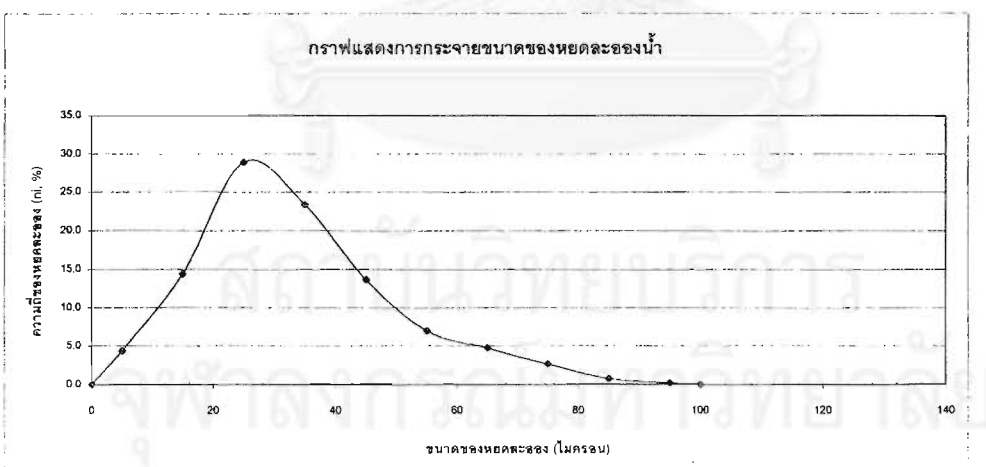
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	33.658	0	0.000	0.000	1.46598	0.000
0 - 10	5	23	4.348	4.348	21.7	28.658	3571	0.699	3.039	0.76701	2.558
10 - 20	15	76	14.367	18.715	215.5	18.658	5001	1.176	16.897	0.28989	1.207
20 - 30	25	153	28.922	47.637	723.1	8.658	2168	1.398	40.432	0.06804	0.134
30 - 40	35	124	23.440	71.078	820.4	-1.342	42	1.544	36.194	-0.07809	0.143
40 -50	45	72	13.611	84.688	612.5	-11.342	1751	1.653	22.501	-0.18723	0.477
50 - 60	55	37	6.994	91.682	384.7	-21.342	3186	1.740	12.173	-0.27438	0.527
60 - 70	65	25	4.726	96.408	307.2	-31.342	4642	1.813	8.568	-0.34694	0.569
70 - 80	75	14	2.647	99.055	198.5	-41.342	4523	1.875	4.962	-0.40908	0.443
80 - 90	85	4	0.756	99.811	64.3	-51.342	1993	1.929	1.459	-0.46344	0.162
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-61.342	711	1.978	0.374	-0.51175	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-66.342	0	2.000	0.000	-0.53402	0.000
	Total	529	100.000		3365.8		27589		146.598		6.269

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.658 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.694

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.240 ไมครอน

geometric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.785



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 5

ความถี่ของหัวฉีด : 22.50 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

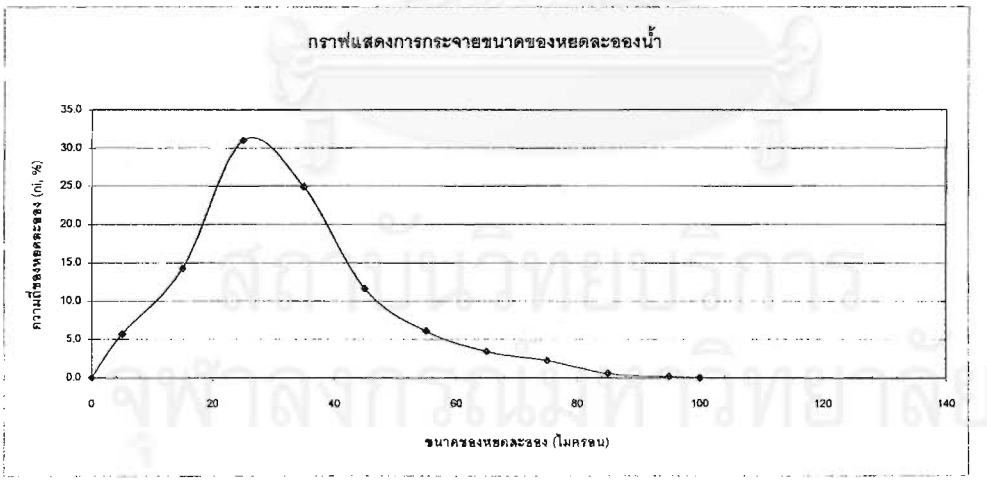
Interval, μm	Midpoint d_i	Volume n_i	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i$log d_i	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.053	0	0.000	0.000	1.44249	0.000
0 - 10	5	30	5.703	5.703	28.5	27.053	4174	0.699	3.987	0.74352	3.153
10 - 20	15	75	14.259	19.962	213.9	17.053	4147	1.176	16.769	0.26840	1.012
20 - 30	25	163	30.989	50.951	774.7	7.053	1542	1.398	43.320	0.04455	0.062
30 - 40	35	131	24.905	75.856	871.7	-2.947	216	1.544	38.455	-0.10158	0.257
40 - 50	45	61	11.597	87.452	521.9	-12.947	1944	1.653	19.172	-0.21072	0.515
50 - 60	55	32	6.084	93.536	334.6	-22.947	3203	1.740	10.588	-0.29787	0.540
60 - 70	65	18	3.422	96.958	222.4	-32.947	3715	1.813	6.204	-0.37042	0.470
70 - 80	75	12	2.281	99.240	171.1	-42.947	4208	1.875	4.278	-0.43257	0.427
80 - 90	85	3	0.570	99.810	48.5	-52.947	1599	1.929	1.100	-0.48693	0.135
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-62.947	753	1.978	0.376	-0.53523	0.054
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-67.947	0	2.000	0.000	-0.55751	0.000
	Total	526	100.000		3205.3		25500		144.249		6.624

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.053 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.049

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.701 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.814



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

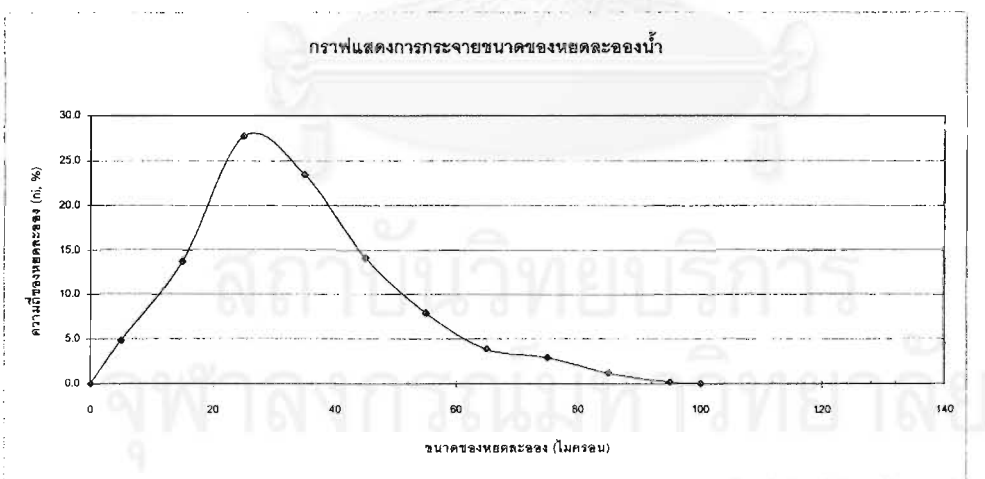
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.050	0	0.000	0.000	1.46840	0.000
0 - 10	5	25	4.845	4.845	24.2	29.050	4089	0.699	3.386	0.76943	2.868
10 - 20	15	71	13.760	18.605	206.4	19.050	4994	1.176	16.183	0.29230	1.176
20 - 30	25	145	27.713	46.318	692.8	9.050	2270	1.398	38.741	0.07046	0.138
30 - 40	35	121	23.450	69.767	820.7	-0.950	21	1.544	36.208	-0.07567	0.134
40 -50	45	73	14.147	83.915	636.6	-10.950	1696	1.653	23.388	-0.18482	0.483
50 - 60	55	41	7.946	91.860	437.0	-20.950	3487	1.740	13.828	-0.27197	0.588
60 - 70	65	20	3.876	95.736	251.9	-30.950	3713	1.813	7.027	-0.34452	0.460
70 - 80	75	15	2.907	98.643	218.0	-40.950	4875	1.875	5.451	-0.40667	0.481
80 - 90	85	6	1.163	99.806	98.8	-50.950	3018	1.929	2.244	-0.46102	0.247
90 - 100	95	1	0.194	100.000	18.4	-60.950	720	1.978	0.383	-0.50933	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.950	0	2.000	0.000	-0.53160	0.000
	Total	516	100.000		3405.0		28883		146.840		6.625

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.050 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.081

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.403 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.814



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

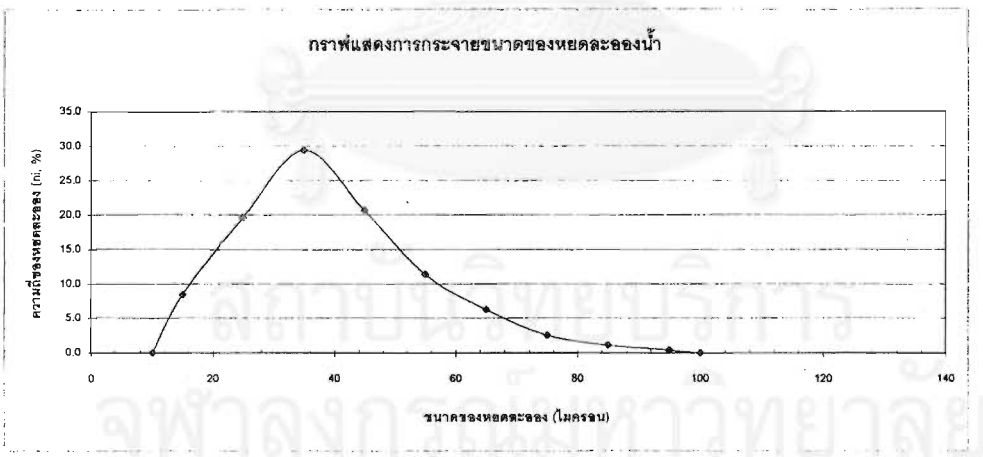
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	29.420	0	1.000	0.000	0.56076	0.000
10 - 20	15	43	8.448	8.448	126.7	24.420	5038	1.176	9.936	0.38467	1.250
20 - 30	25	100	19.646	28.094	491.2	14.420	4085	1.398	27.464	0.16282	0.521
30 - 40	35	150	29.470	57.564	1031.4	4.420	576	1.544	45.503	0.01669	0.008
40 -50	45	105	20.629	78.193	928.3	-5.580	642	1.653	34.104	-0.09246	0.176
50 - 60	55	58	11.395	89.587	626.7	-15.580	2766	1.740	19.831	-0.17961	0.368
60 - 70	65	32	6.287	95.874	408.6	-25.580	4114	1.813	11.397	-0.25216	0.400
70 - 80	75	13	2.554	98.428	191.6	-35.580	3233	1.875	4.789	-0.31430	0.252
80 - 90	85	6	1.179	99.607	100.2	-45.580	2449	1.929	2.274	-0.36866	0.160
90 - 100	95	2	0.393	100.000	37.3	-55.580	1214	1.978	0.777	-0.41697	0.068
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-60.580	0	2.000	0.000	-0.43924	0.000
	Total	509	100.000		3942.0		24117		156.076		3.204

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 39.420 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.608

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 36.371 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.513



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เวโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

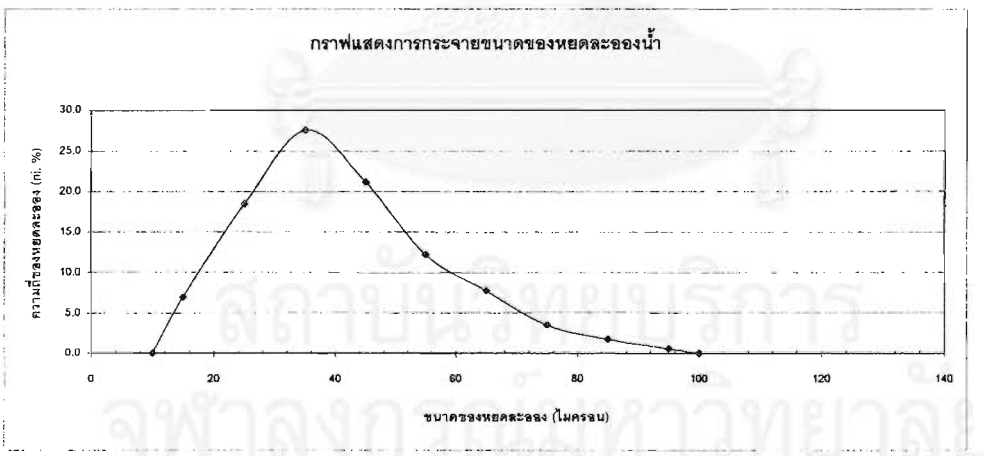
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	31.272	0	1.000	0.000	0.58021	0.000
10 - 20	15	36	6.990	6.990	104.9	26.272	4825	1.176	8.221	0.40412	1.142
20 - 30	25	95	18.447	25.437	461.2	16.272	4884	1.398	25.787	0.18227	0.613
30 - 40	35	142	27.573	53.010	965.0	6.272	1085	1.544	42.574	0.03615	0.036
40 - 50	45	109	21.165	74.175	952.4	-3.728	294	1.653	34.990	-0.07300	0.113
50 - 60	55	63	12.233	86.408	672.8	-13.728	2305	1.740	21.290	-0.16015	0.314
60 - 70	65	40	7.767	94.175	504.9	-23.728	4373	1.813	14.081	-0.23270	0.421
70 - 80	75	18	3.495	97.670	262.1	-33.728	3976	1.875	6.554	-0.29485	0.304
80 - 90	85	9	1.748	99.417	148.5	-43.728	3342	1.929	3.372	-0.34921	0.213
90 - 100	95	3	0.583	100.000	55.3	-53.728	1682	1.978	1.152	-0.39751	0.092
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-58.728	0	2.000	0.000	-0.41979	0.000
	Total	515	100.000		4127.2		26765		158.021		3.247

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 41.272 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.443

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.038 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.517



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	5	
ความถี่ของหัวฉีด	:	22.50	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

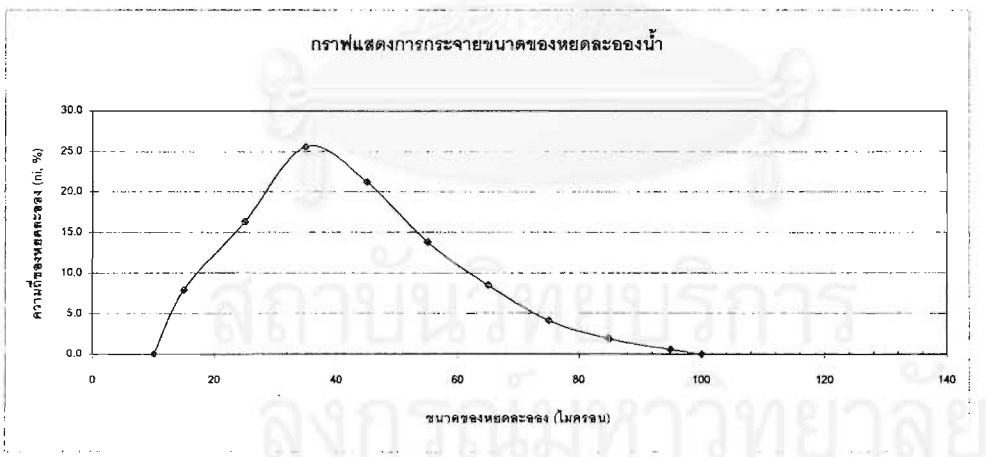
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	32.178	0	1.000	0.000	0.58775	0.000
10 - 20	15	42	7.955	7.955	119.3	27.178	5876	1.176	9.355	0.41166	1.348
20 - 30	25	86	16.288	24.242	407.2	17.178	4806	1.398	22.769	0.16381	0.587
30 - 40	35	135	25.568	49.811	894.9	7.178	1317	1.544	39.479	0.04369	0.049
40 -50	45	112	21.212	71.023	954.5	-2.822	169	1.653	35.068	-0.06546	0.091
50 - 60	55	73	13.826	84.848	760.4	-12.822	2273	1.740	24.062	-0.15261	0.322
60 - 70	65	45	8.523	93.371	554.0	-22.822	4439	1.813	15.451	-0.22516	0.432
70 - 80	75	22	4.167	97.538	312.5	-32.822	4489	1.875	7.813	-0.28731	0.344
80 - 90	85	10	1.894	99.432	161.0	-42.822	3473	1.929	3.654	-0.34167	0.221
90 - 100	95	3	0.568	100.000	54.0	-52.822	1585	1.978	1.124	-0.38997	0.086
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-57.822	0	2.000	0.000	-0.41225	0.000
	Total	528	100.000		4217.8		28427		158.775		3.480

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 42.178 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 18.945

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 38.704 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.540



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

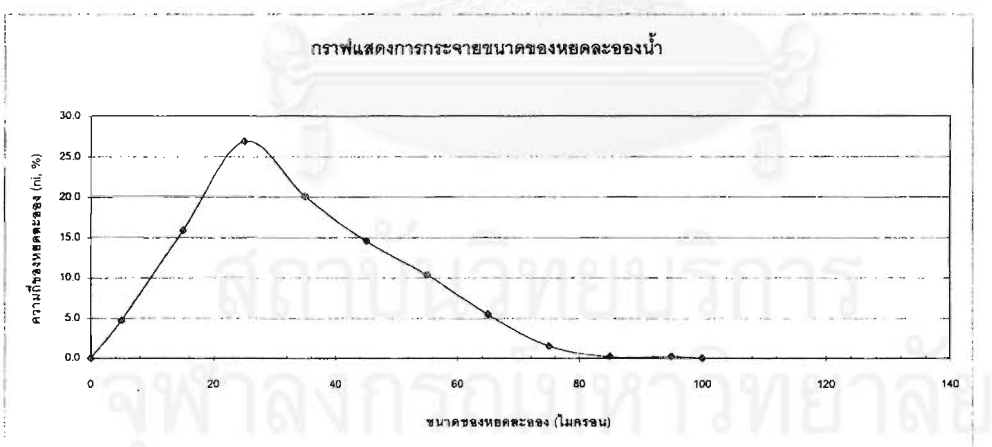
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	33.712	0	0.000	0.000	1.52779	0.000
0 - 10	5	25	4.735	4.735	23.7	28.712	3903	0.699	3.310	0.76494	2.771
10 - 20	15	84	15.909	20.644	238.6	18.712	5570	1.176	18.711	0.28782	1.318
20 - 30	25	142	26.894	47.538	672.3	8.712	2041	1.398	37.596	0.06597	0.117
30 - 40	35	106	20.076	67.614	702.7	-1.288	33	1.544	30.998	-0.08016	0.129
40 -50	45	77	14.583	82.197	656.3	-11.288	1858	1.653	24.109	-0.18930	0.523
50 - 60	55	55	10.417	92.614	572.9	-21.288	4721	1.740	18.129	-0.27645	0.796
60 - 70	65	29	5.492	98.106	357.0	-31.288	5377	1.813	9.957	-0.34900	0.669
70 - 80	75	8	1.515	99.621	113.6	-41.288	2583	1.875	2.841	-0.41115	0.256
80 - 90	85	1	0.189	99.811	16.1	-51.288	498	1.929	0.365	-0.46551	0.041
90 - 100	95	1	0.189	100.000	18.0	-61.288	711	1.978	0.375	-0.51381	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-66.288	0	2.000	0.000	-0.53609	0.000
	Total	528	100.000		3371.2		27296		146.391		8.669

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 33.712 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 16.605

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 29.101 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.818



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

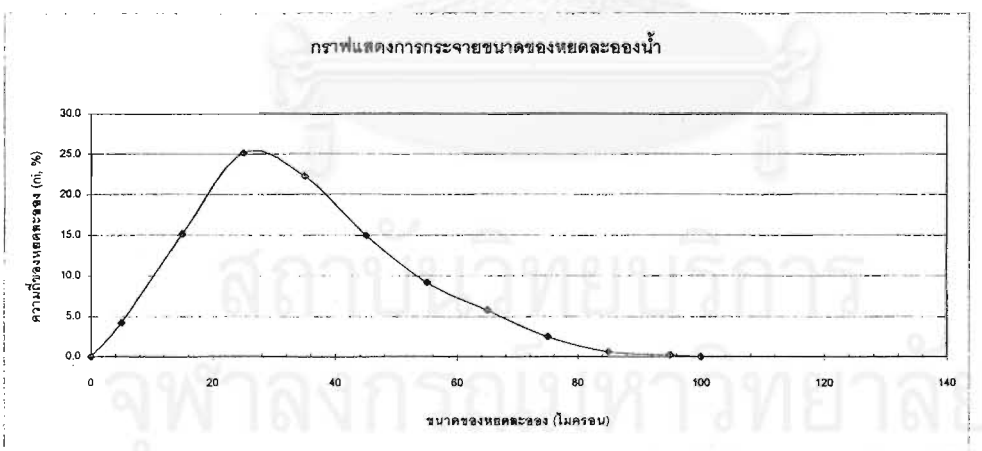
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.655	0	0.000	0.000	1.53976	0.000
0 - 10	5	22	4.223	4.223	21.1	29.655	3713	0.699	2.952	0.77809	2.556
10 - 20	15	79	15.163	19.386	227.4	19.655	5358	1.176	17.833	0.30097	1.374
20 - 30	25	131	25.144	44.530	628.6	9.655	2344	1.398	35.150	0.07912	0.157
30 - 40	35	116	22.265	66.795	779.3	-0.345	3	1.544	34.378	-0.06701	0.100
40 -50	45	78	14.971	81.766	673.7	-10.345	1602	1.653	24.751	-0.17615	0.465
50 - 60	55	48	9.213	90.979	506.7	-20.345	3814	1.740	16.034	-0.26330	0.639
60 - 70	65	30	5.758	96.737	374.3	-30.345	5302	1.813	10.439	-0.33585	0.650
70 - 80	75	13	2.495	99.232	187.1	-40.345	4062	1.875	4.679	-0.39800	0.395
80 - 90	85	3	0.576	99.808	48.9	-50.345	1460	1.929	1.111	-0.45236	0.118
90 - 100	95	1	0.192	100.000	18.2	-60.345	699	1.978	0.380	-0.50066	0.048
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.345	0	2.000	0.000	-0.52294	0.000
	Total	521	100.000		3465.5		28856		147.706		6.501

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.655 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.073

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.996 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.804



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	52	มิลลิลิตรต่อนาที (866 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

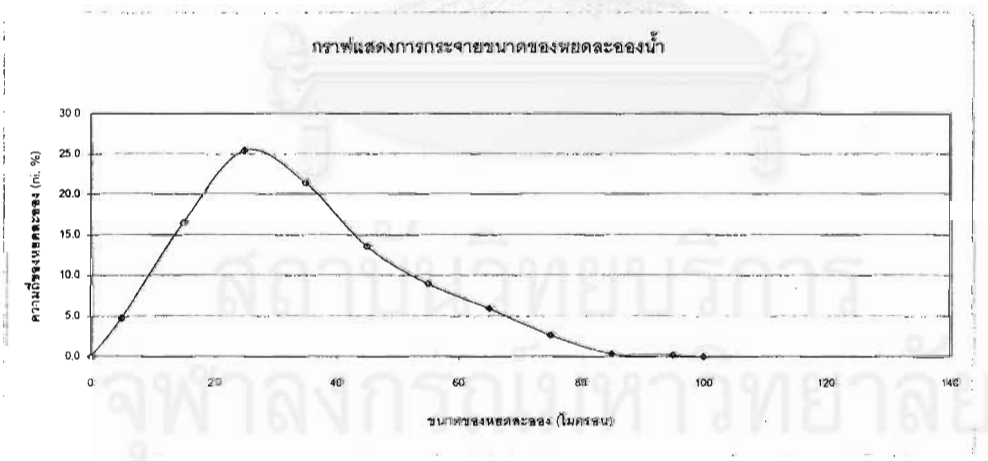
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.042	0	0.000	0.000	1.53202	0.000
0 - 10	5	25	4.789	4.789	23.9	29.042	4039	0.699	3.348	0.76644	2.813
10 - 20	15	86	16.475	21.264	247.1	19.042	5974	1.176	19.376	0.28932	1.379
20 - 30	25	133	25.479	46.743	637.0	9.042	2083	1.398	35.618	0.06747	0.116
30 - 40	35	112	21.456	68.199	751.0	-0.958	20	1.544	33.129	-0.07866	0.133
40 - 50	45	71	13.602	81.801	612.1	-10.958	1633	1.653	22.486	-0.18781	0.480
50 - 60	55	47	9.004	90.805	495.2	-20.958	3955	1.740	15.670	-0.27496	0.681
60 - 70	65	31	5.939	96.743	386.0	-30.958	5692	1.813	10.766	-0.34751	0.717
70 - 80	75	14	2.682	99.425	201.1	-40.958	4499	1.875	5.029	-0.40965	0.450
80 - 90	85	2	0.383	99.808	32.6	-50.958	995	1.929	0.739	-0.46401	0.082
90 - 100	95	1	0.192	100.000	18.2	-60.958	712	1.978	0.379	-0.51232	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.958	0	2.000	0.000	-0.53459	0.000
	Total	522	100.000		3404.2		29602		146.541		6.902

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.042 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.292

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.202 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.83



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

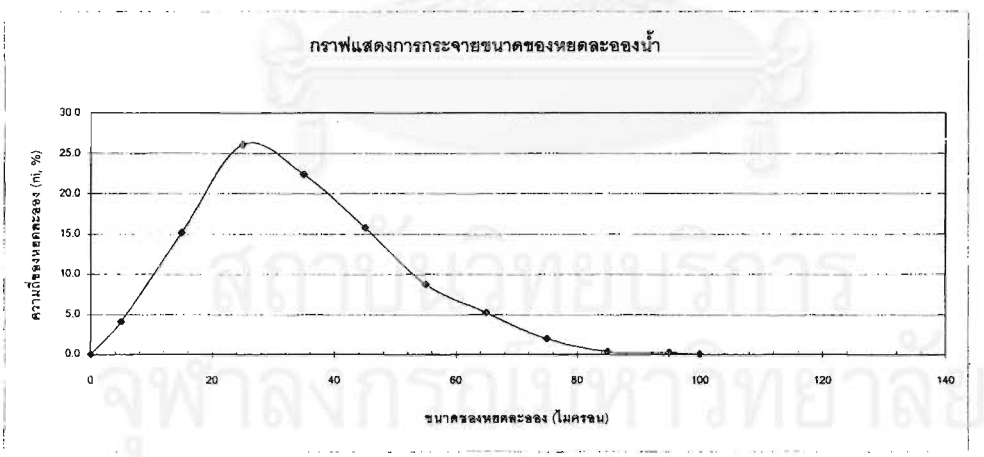
Interval, µm	Midpoint d_i	จำนวน n_i	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.125	0	0.000	0.000	1.53307	0.000
0 - 10	5	21	4.086	4.086	20.4	29.125	3466	0.699	2.856	0.77392	2.447
10 - 20	15	78	15.175	19.261	227.6	19.125	5550	1.176	17.847	0.29680	1.337
20 - 30	25	134	26.070	45.331	651.8	9.125	2171	1.398	36.444	0.07495	0.146
30 - 40	35	115	22.374	67.704	783.1	-0.875	17	1.544	34.546	-0.07117	0.113
40 -50	45	81	15.759	83.463	709.1	-10.875	1864	1.653	26.053	-0.18032	0.512
50 - 60	55	45	8.755	92.218	481.5	-20.875	3815	1.740	15.237	-0.26747	0.626
60 - 70	65	27	5.253	97.471	341.4	-30.875	5008	1.813	9.523	-0.34002	0.607
70 - 80	75	10	1.946	99.416	145.9	-40.875	3251	1.875	3.648	-0.40217	0.315
80 - 90	85	2	0.389	99.805	33.1	-50.875	1007	1.929	0.751	-0.45652	0.081
90 - 100	95	1	0.195	100.000	18.5	-60.875	721	1.978	0.385	-0.50483	0.050
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.875	0	2.000	0.000	-0.52711	0.000
	Total	514	100.000		3412.5		26869		147.289		6.235

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.125 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.474

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 29.709 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.782



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

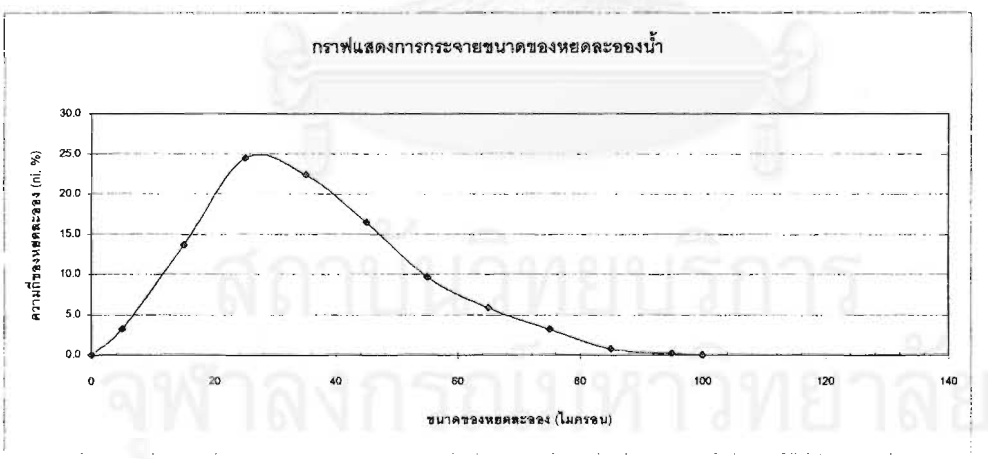
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	35.987	0	0.000	0.000	1.55614	0.000
0 - 10	5	17	3.226	3.226	16.1	30.987	3097	0.699	2.255	0.79905	2.060
10 - 20	15	72	13.662	16.888	204.9	20.987	6017	1.176	16.068	0.32193	1.416
20 - 30	25	129	24.478	41.366	612.0	10.987	2955	1.398	34.219	0.10008	0.245
30 - 40	35	118	22.391	63.757	783.7	0.987	22	1.544	34.573	-0.04605	0.047
40 -50	45	87	16.509	80.266	742.9	-9.013	1341	1.653	27.292	-0.15520	0.398
50 - 60	55	51	9.677	89.943	532.3	-19.013	3498	1.740	16.842	-0.24235	0.568
60 - 70	65	31	5.882	95.825	382.4	-29.013	4952	1.813	10.664	-0.31490	0.583
70 - 80	75	17	3.226	99.051	241.9	-39.013	4910	1.875	6.049	-0.37704	0.459
80 - 90	85	4	0.759	99.810	64.5	-49.013	1823	1.929	1.464	-0.43140	0.141
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.0	-59.013	661	1.978	0.375	-0.47971	0.044
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-64.013	0	2.000	0.000	-0.50198	0.000
	Total	527	100.000		3598.7		29276		149.802		5.961

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 35.987 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 17.197

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.479 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.759



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เวโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	120	มิลลิลิตรต่อนาที (2,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

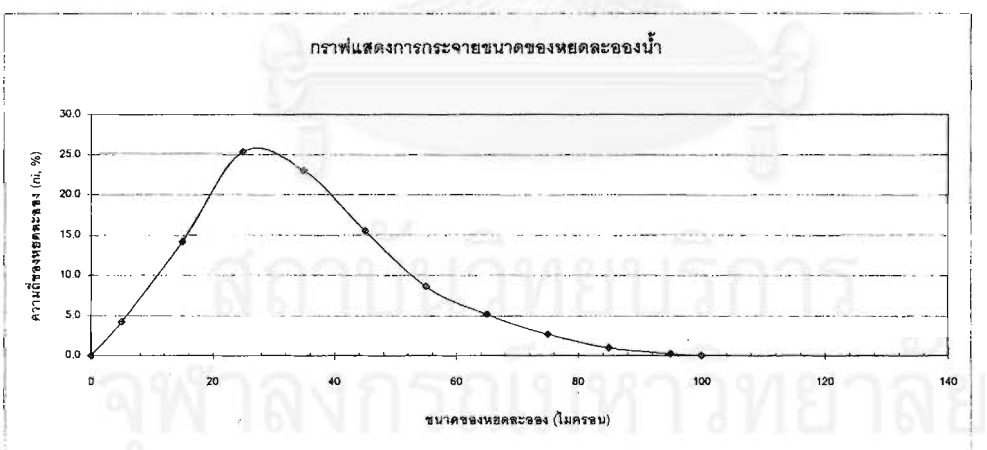
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	34.866	0	0.000	0.000	1.54240	0.000
0 - 10	5	22	4.223	4.223	21.1	29.866	3768	0.699	2.952	0.78140	2.578
10 - 20	15	74	14.203	18.426	213.1	19.866	5605	1.176	16.705	0.30428	1.315
20 - 30	25	132	25.336	43.762	633.4	9.866	2466	1.398	35.418	0.08243	0.172
30 - 40	35	120	23.033	66.795	806.1	-0.134	0	1.544	35.564	-0.06369	0.093
40 - 50	45	81	15.547	82.342	699.6	-10.134	1597	1.653	25.703	-0.17284	0.464
50 - 60	55	45	8.637	90.979	475.0	-20.134	3501	1.740	15.032	-0.25999	0.584
60 - 70	65	27	5.182	96.161	336.9	-30.134	4706	1.813	9.395	-0.33254	0.573
70 - 80	75	14	2.687	98.848	201.5	-40.134	4328	1.875	5.039	-0.39469	0.419
80 - 90	85	5	0.960	99.808	81.6	-50.134	2412	1.929	1.852	-0.44904	0.194
90 - 100	95	1	0.192	100.000	18.2	-60.134	694	1.978	0.380	-0.49735	0.047
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-65.134	0	2.000	0.000	-0.51963	0.000
	Total	521	100.000		3486.6		29077		148.037		6.440

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 34.866 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.138

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 30.226 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.799

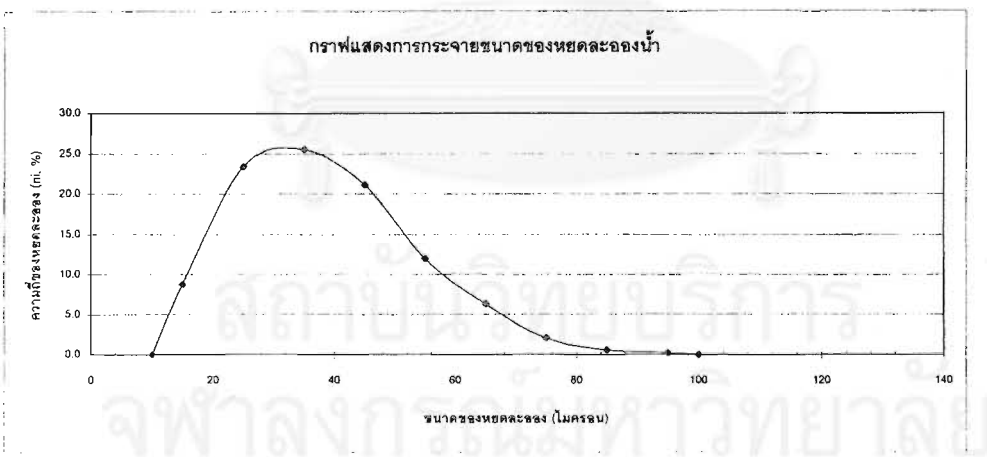


ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.543	0	1.000	0.000	0.55108	0.000
10 - 20	15	46	8.762	8.762	131.4	23.543	4856	1.176	10.305	0.37499	1.232
20 - 30	25	123	23.429	32.190	585.7	13.543	4297	1.398	32.752	0.15314	0.549
30 - 40	35	134	25.524	57.714	893.3	3.543	320	1.544	39.410	0.00702	0.001
40 -50	45	111	21.143	78.857	951.4	-6.457	882	1.653	34.954	-0.10213	0.221
50 - 60	55	63	12.000	90.857	660.0	-16.457	3250	1.740	20.884	-0.18928	0.430
60 - 70	65	33	6.286	97.143	408.6	-26.457	4400	1.813	11.395	-0.26183	0.431
70 - 80	75	11	2.095	99.238	157.1	-36.457	2785	1.875	3.929	-0.32398	0.220
80 - 90	85	3	0.571	99.810	48.6	-46.457	1233	1.929	1.103	-0.37833	0.082
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-56.457	607	1.978	0.377	-0.42664	0.035
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.457	0	2.000	0.000	-0.44892	0.000
	Total	525	100.000		3854.3		22631		155.108		3.201

Arithmetic mean (d_{mean})	=	$\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$	= 38.543	ไมครอน
standard deviation σ	=	$\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$	= 15.119	
geometric mean(d_g)	=	$\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$	= 35.570	ไมครอน
gemetric standard deviation σ_g	=	$\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$	= 1.513	



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

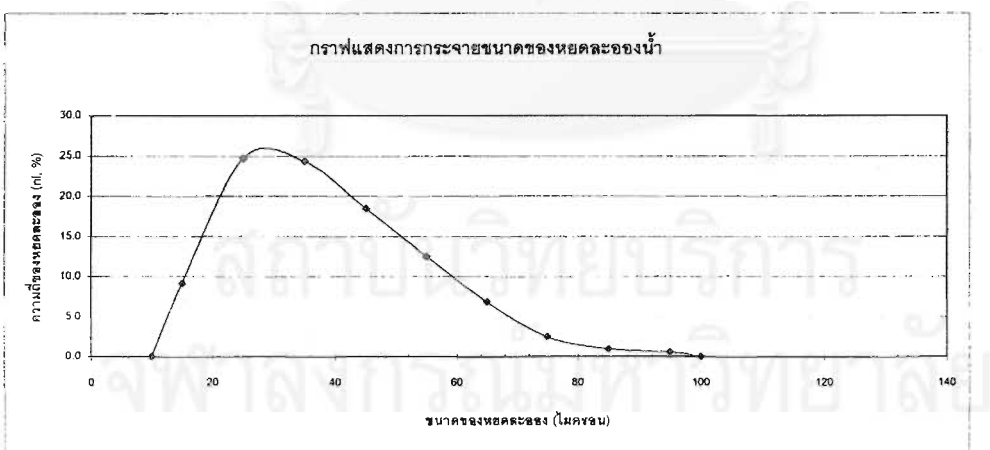
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.916	0	1.000	0.000	0.55185	0.000
10 - 20	15	48	9.125	9.125	136.9	23.916	5220	1.176	10.732	0.37576	1.288
20 - 30	25	130	24.715	33.840	617.9	13.916	4786	1.398	34.550	0.15391	0.585
30 - 40	35	128	24.335	58.175	851.7	3.916	373	1.544	37.574	0.00778	0.001
40 - 50	45	97	18.441	76.616	829.8	-6.084	683	1.653	30.487	-0.10137	0.189
50 - 60	55	66	12.548	89.163	690.1	-16.084	3246	1.740	21.837	-0.18852	0.446
60 - 70	65	36	6.844	96.008	444.9	-26.084	4656	1.813	12.408	-0.26107	0.466
70 - 80	75	13	2.471	98.479	185.4	-36.084	3218	1.875	4.634	-0.32321	0.258
80 - 90	85	5	0.951	99.430	80.8	-46.084	2019	1.929	1.834	-0.37757	0.136
90 - 100	95	3	0.570	100.000	54.2	-56.084	1794	1.978	1.128	-0.42588	0.103
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.084	0	2.000	0.000	-0.44815	0.000
	Total	526	100.000		3891.6		25995		155.185		3.474

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.916 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.204

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.633 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.539



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

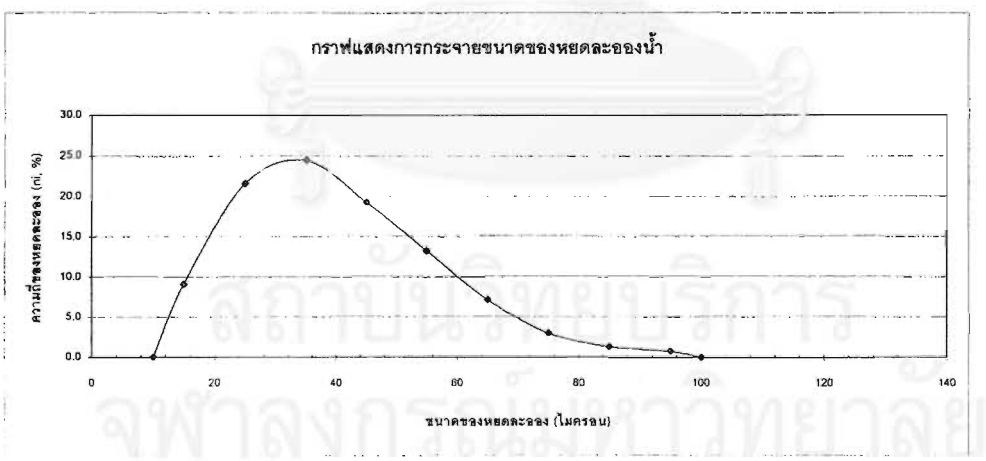
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	30.095	0	1.000	0.000	0.56395	0.000
10 - 20	15	48	9.091	9.091	136.4	25.095	5725	1.176	10.692	0.38786	1.368
20 - 30	25	114	21.591	30.682	539.8	15.095	4919	1.398	30.183	0.16601	0.595
30 - 40	35	129	24.432	55.114	855.1	5.095	634	1.544	37.724	0.01988	0.010
40 - 50	45	102	19.318	74.432	869.3	-4.905	465	1.653	31.937	-0.08927	0.154
50 - 60	55	70	13.258	87.689	729.2	-14.905	2945	1.740	23.073	-0.17642	0.413
60 - 70	65	38	7.197	94.886	467.8	-24.905	4464	1.813	13.047	-0.24897	0.446
70 - 80	75	16	3.030	97.917	227.3	-34.905	3692	1.875	5.682	-0.31111	0.293
80 - 90	85	7	1.326	99.242	112.7	-44.905	2673	1.929	2.558	-0.36547	0.177
90 - 100	95	4	0.758	100.000	72.0	-54.905	2284	1.978	1.498	-0.41378	0.130
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-59.905	0	2.000	0.000	-0.43605	0.000
	Total	528	100.000		4009.5		27802		156.395		3.585

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 40.095 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / \{(\Sigma n_i) - 1\})^{1/2}$ = 16.758

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 36.639 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.550



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

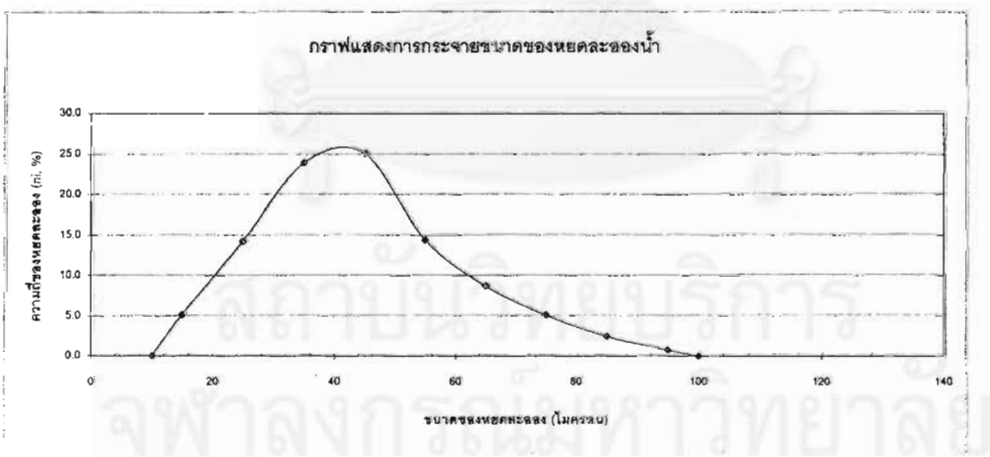
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	34.316	0	1.000	0.000	0.61342	0.000
10 - 20	15	27	5.133	5.133	77.0	29.316	4411	1.176	6.037	0.43733	0.982
20 - 30	25	75	14.259	19.392	356.5	19.316	5320	1.398	19.933	0.21548	0.662
30 - 40	35	126	23.954	43.346	838.4	9.316	2079	1.544	36.987	0.06935	0.115
40 -50	45	132	25.095	68.441	1129.3	-0.684	12	1.653	41.487	-0.03979	0.040
50 - 60	55	76	14.449	82.890	794.7	-10.684	1649	1.740	25.146	-0.12694	0.233
60 - 70	65	46	8.745	91.635	568.4	-20.684	3742	1.813	15.854	-0.19949	0.348
70 - 80	75	27	5.133	96.768	385.0	-30.684	4833	1.875	9.625	-0.26164	0.351
80 - 90	85	13	2.471	99.240	210.1	-40.684	4091	1.929	4.769	-0.31600	0.247
90 - 100	95	4	0.760	100.000	72.2	-50.684	1954	1.978	1.504	-0.36431	0.101
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-55.684	0	2.000	0.000	-0.38658	0.000
	Total	526	100.000		4431.6		28090		161.342		3.079

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 44.316 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 16.845

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 41.080 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))$ = 1.501



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 8

ความถี่ของหัวฉีด : 17.80 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 456 มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ความดันของอากาศ : 2.0 , กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

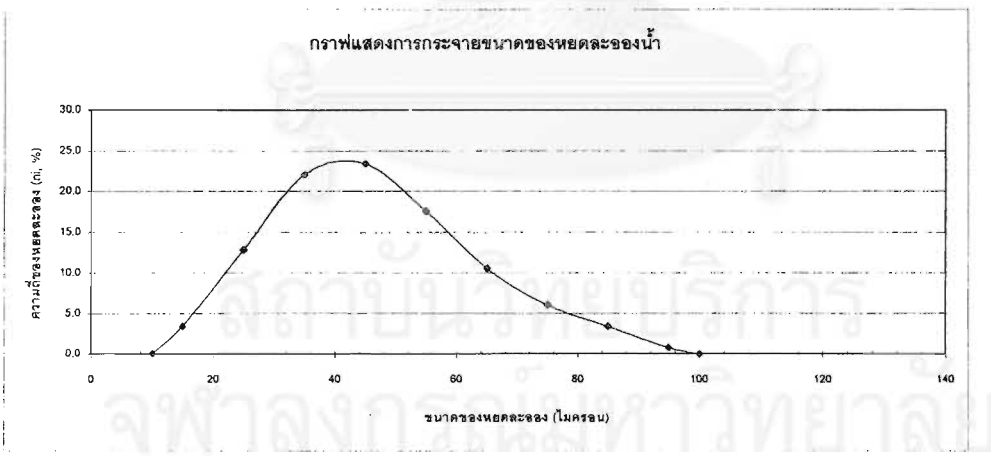
	Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (%)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
	< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	36.623	0	1.000	0.000	0.63755	0.000
48	10 - 20	15	18	3.396	3.396	50.9	31.623	3396	1.176	3.994	0.46146	0.723
130	20 - 30	25	68	12.830	16.226	320.8	21.623	5999	1.398	17.936	0.23961	0.737
128	30 - 40	35	117	22.075	38.302	772.6	11.623	2982	1.544	34.086	0.09349	0.193
97	40 -50	45	124	23.396	61.698	1052.8	1.623	62	1.653	38.679	-0.01566	0.006
66	50 - 60	55	93	17.547	79.245	965.1	-8.377	1231	1.740	30.538	-0.10281	0.185
36	60 - 70	65	56	10.566	89.811	686.8	-18.377	3568	1.813	19.155	-0.17536	0.325
13	70 - 80	75	32	6.038	95.849	452.8	-28.377	4862	1.875	11.321	-0.23751	0.341
5	80 - 90	85	18	3.396	99.245	288.7	-38.377	5002	1.929	6.553	-0.29187	0.289
3	90 - 100	95	4	0.755	100.000	71.7	-48.377	1766	1.978	1.493	-0.34017	0.087
	> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-53.377	0	2.000	0.000	-0.36245	0.000
		Total	530	100.000		4662.3		28869		163.755		2.886

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.623 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 17.076

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.408 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.482



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	8	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.80	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	456	มิลลิลิตรต่อนาที (7,600 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	3	

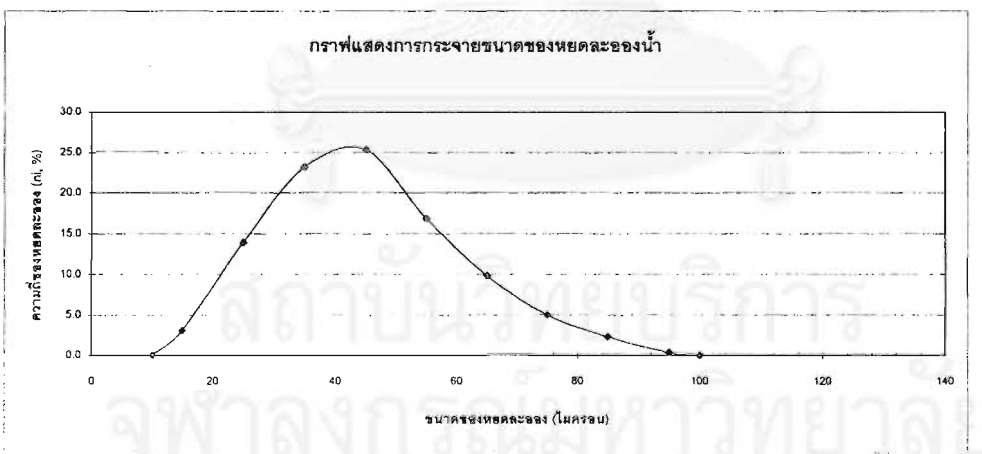
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	35.251	0	1.000	0.000	0.62681	0.000
10 - 20	15	16	3.095	3.095	46.4	30.251	2832	1.176	3.640	0.45071	0.629
20 - 30	25	72	13.926	17.021	348.2	20.251	5712	1.398	19.468	0.22887	0.729
30 - 40	35	120	23.211	40.232	812.4	10.251	2439	1.544	35.839	0.08274	0.159
40 - 50	45	131	25.338	65.571	1140.2	0.251	2	1.653	41.890	-0.02641	0.018
50 - 60	55	87	16.828	82.398	925.5	-9.749	1599	1.740	29.287	-0.11356	0.217
60 - 70	65	51	9.865	92.263	641.2	-19.749	3847	1.813	17.884	-0.18611	0.342
70 - 80	75	26	5.029	97.292	377.2	-29.749	4451	1.875	9.430	-0.24826	0.310
80 - 90	85	12	2.321	99.613	197.3	-39.749	3667	1.929	4.478	-0.30261	0.213
90 - 100	95	2	0.387	100.000	36.8	-49.749	957	1.978	0.765	-0.35092	0.048
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-54.749	0	2.000	0.000	-0.37319	0.000
	Total	517	100.000		4525.1		25506		162.681		2.664

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 45.251 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 16.051

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 42.345 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.459



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิทธิพลของชนิดของของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

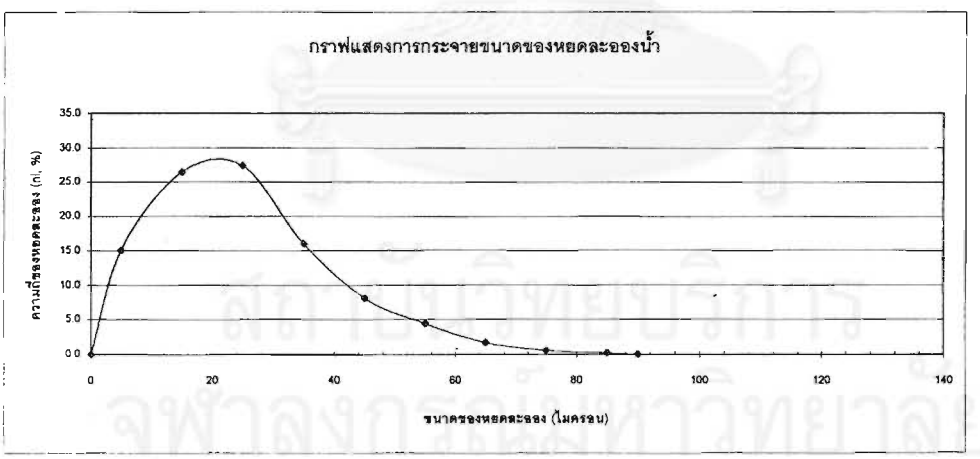
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	25.000	0	0.000	0.000	1.30433	0.000
0 - 10	5	78	15.058	15.058	75.3	20.000	6023	0.699	10.525	0.60536	5.518
10 - 20	15	137	26.448	41.506	396.7	10.000	2645	1.176	31.105	0.12824	0.435
20 - 30	25	142	27.413	68.919	685.3	0.000	0	1.398	38.322	-0.09361	0.240
30 - 40	35	83	16.023	84.942	560.8	-10.000	1602	1.544	24.741	-0.23974	0.921
40 - 50	45	42	8.108	93.050	364.9	-20.000	3243	1.653	13.404	-0.34888	0.987
50 - 60	55	23	4.440	97.490	244.2	-30.000	3996	1.740	7.727	-0.43603	0.844
60 - 70	65	9	1.737	99.228	112.9	-40.000	2780	1.813	3.150	-0.50858	0.449
70 - 80	75	3	0.579	99.807	43.4	-50.000	1448	1.875	1.086	-0.57073	0.189
80 - 90	85	1	0.193	100.000	16.4	-60.000	695	1.929	0.372	-0.62509	0.075
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-65.000	0	1.954	0.000	-0.64991	0.000
	Total	518	100.000		2500.0		22432		130.433		9.659

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 25.000 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.053

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 20.153 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 2.053



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

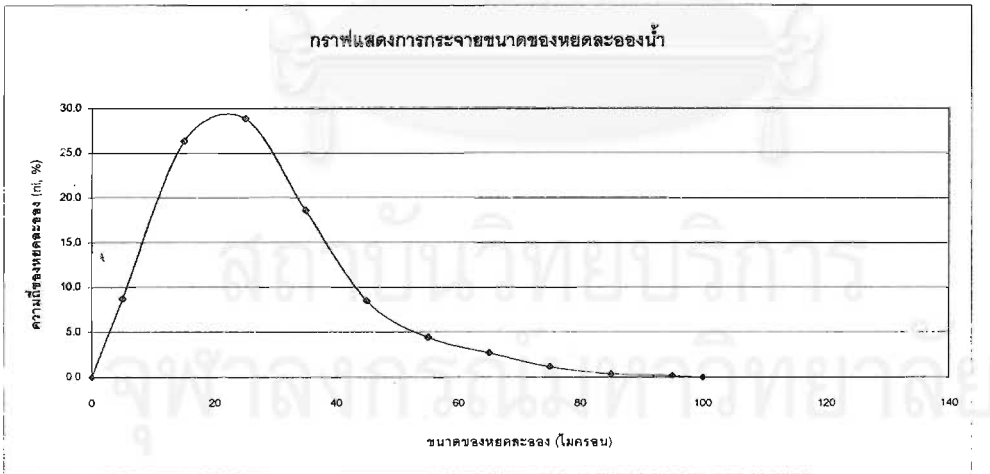
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	27.558	0	0.000	0.000	1.36272	0.000
0 - 10	5	45	8.721	8.721	43.6	22.558	4438	0.699	6.096	0.66375	3.842
10 - 20	15	136	26.357	35.078	395.3	12.558	4157	1.176	30.998	0.18663	0.918
20 - 30	25	149	28.876	63.953	721.9	2.558	189	1.398	40.367	-0.03522	0.036
30 - 40	35	96	18.605	82.558	651.2	-7.442	1030	1.544	28.727	-0.18135	0.612
40 -50	45	44	8.527	91.085	383.7	-17.442	2594	1.653	14.097	-0.29049	0.720
50 - 60	55	23	4.457	95.543	245.2	-27.442	3357	1.740	7.757	-0.37764	0.636
60 - 70	65	14	2.713	98.256	176.4	-37.442	3804	1.813	4.919	-0.45019	0.550
70 - 80	75	6	1.163	99.419	87.2	-47.442	2617	1.875	2.180	-0.51234	0.305
80 - 90	85	2	0.388	99.806	32.9	-57.442	1279	1.929	0.748	-0.56670	0.124
90 - 100	95	1	0.194	100.000	18.4	-67.442	881	1.978	0.383	-0.61500	0.073
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-72.442	0	2.000	0.000	-0.63728	0.000
	Total	516	100.000		2755.8		24346		136.272		7.816

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 27.558 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.682

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 23.053 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.910



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : i

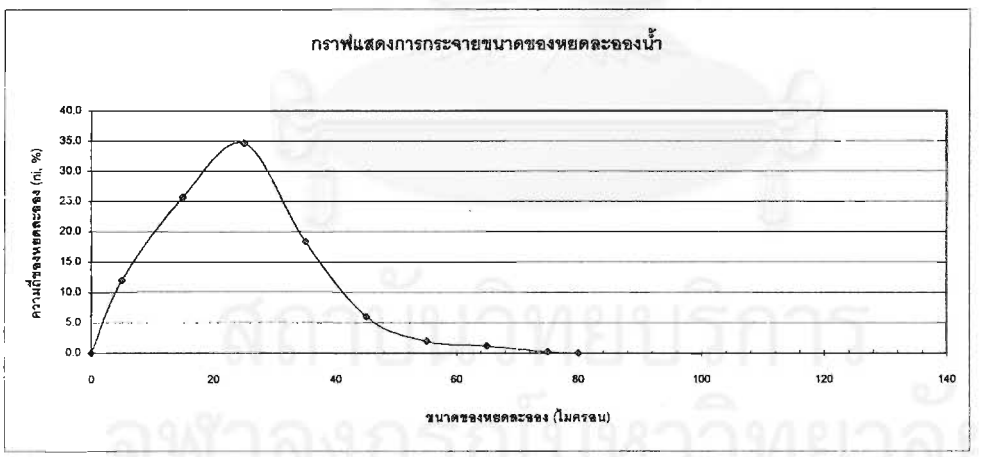
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	24.207	0	0.000	0.000	1.31157	0.000
0 - 10	5	62	11.992	11.992	60.0	19.207	4424	0.699	8.382	0.61260	4.500
10 - 20	15	133	25.725	37.718	385.9	9.207	2181	1.176	30.255	0.13548	0.472
20 - 30	25	179	34.623	72.340	865.6	-0.793	22	1.398	48.401	-0.08637	0.258
30 - 40	35	95	18.375	90.716	643.1	-10.793	2141	1.544	28.373	-0.23250	0.993
40 -50	45	31	5.996	96.712	269.8	-20.793	2592	1.653	9.913	-0.34165	0.700
50 - 60	55	10	1.934	98.646	106.4	-30.793	1834	1.740	3.366	-0.42880	0.356
60 - 70	65	6	1.161	99.807	75.4	-40.793	1931	1.813	2.104	-0.50135	0.292
70 - 80	75	1	0.193	100.000	14.5	-50.793	499	1.875	0.363	-0.56349	0.061
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-55.793	0	1.903	0.000	-0.59152	0.000
	Total	517	100.000		2420.7		15624		131.157		7.633

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 24.207 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 12.562

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 20.491 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.895



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

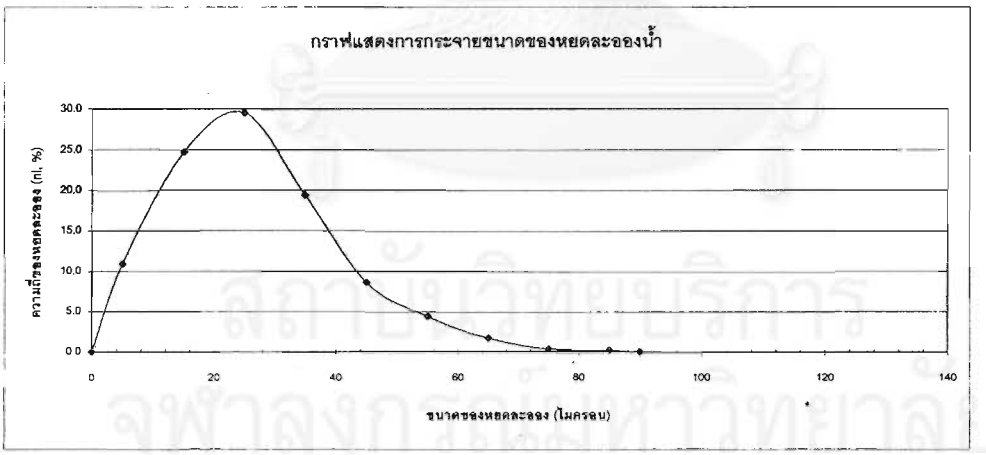
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	26.324	0	0.000	0.000	1.34205	0.000
0 - 10	5	57	10.940	10.940	54.7	21.324	4975	0.699	7.647	0.64308	4.524
10 - 20	15	129	24.760	35.701	371.4	11.324	3175	1.176	29.120	0.16596	0.682
20 - 30	25	154	29.559	65.259	739.0	1.324	52	1.398	41.321	-0.05589	0.092
30 - 40	35	101	19.386	84.645	678.5	-8.676	1459	1.544	29.933	-0.20202	0.791
40 -50	45	45	8.637	93.282	388.7	-18.676	3012	1.653	14.279	-0.31116	0.836
50 - 60	55	23	4.415	97.697	242.8	-28.676	3630	1.740	7.683	-0.39831	0.700
60 - 70	65	9	1.727	99.424	112.3	-38.676	2584	1.813	3.132	-0.47086	0.383
70 - 80	75	2	0.384	99.808	28.8	-48.676	910	1.875	0.720	-0.53301	0.109
80 - 90	85	1	0.192	100.000	16.3	-58.676	661	1.929	0.370	-0.58737	0.066
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-63.676	0	1.954	0.000	-0.61219	0.000
	Total	521	100.000		2632.4		20458		134.205		8.185

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 26.324 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 14.375

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 21.981 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.939



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 1

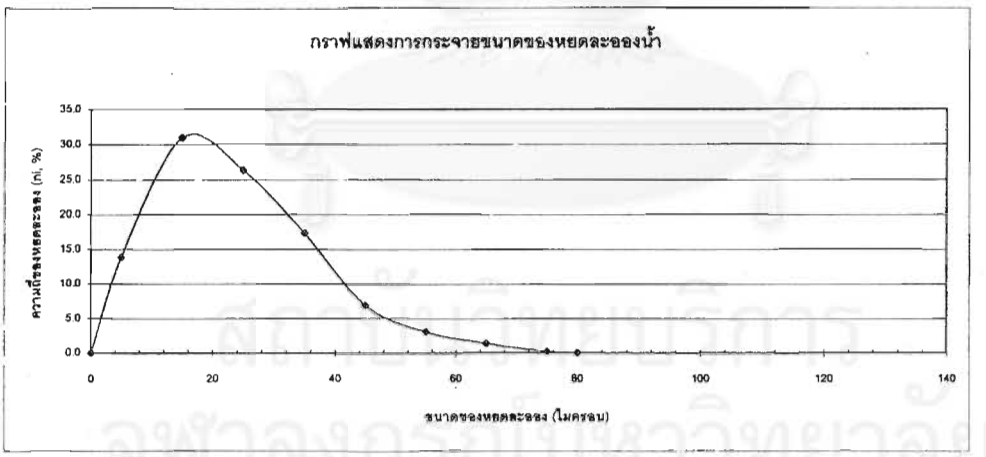
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean}-d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<0	0	0	0.000	0.000	0.0	23.808	0	0.000	0.000	1.29248	0.000
0 - 10	5	72	13.846	13.846	69.2	18.808	4898	0.699	9.678	0.59351	4.877
10 - 20	15	161	30.962	44.808	464.4	8.808	2402	1.176	36.414	0.11638	0.419
20 - 30	25	137	26.346	71.154	658.7	-1.192	37	1.398	36.830	-0.10546	0.293
30 - 40	35	90	17.308	88.462	605.8	-11.192	2168	1.544	26.724	-0.25159	1.096
40 -50	45	36	6.923	95.385	311.5	-21.192	3109	1.653	11.445	-0.36074	0.901
50 - 60	55	16	3.077	98.462	169.2	-31.192	2994	1.740	5.355	-0.44789	0.617
60 - 70	65	7	1.346	99.808	87.5	-41.192	2284	1.813	2.440	-0.52044	0.365
70 - 80	75	1	0.192	100.000	14.4	-51.192	504	1.875	0.361	-0.58259	0.065
>80	80	0	0.000	100.000	0.0	-56.192	0	1.903	0.000	-0.61061	0.000
	Total	520	100.000		2380.8		18396		129.248		8.633

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 23.808 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 13.632

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 19.610 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.974



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำเชื่อม ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

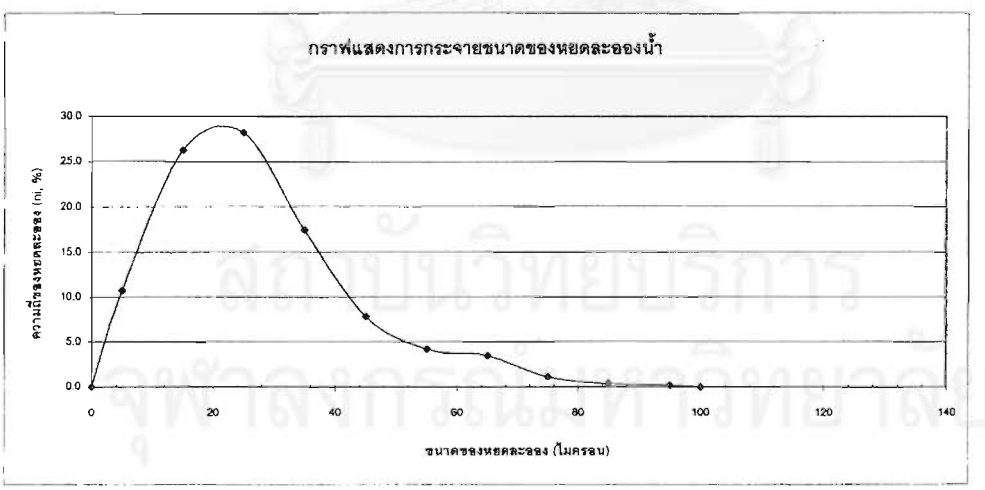
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	27.131	0	0.000	0.000	1.34753	0.000
0 - 10	5	56	10.749	10.749	53.7	22.131	5264	0.699	7.513	0.64856	4.521
10 - 20	15	137	26.296	37.044	394.4	12.131	3869	1.176	30.926	0.17144	0.773
20 - 30	25	147	28.215	65.259	705.4	2.131	128	1.398	39.443	-0.05041	0.072
30 - 40	35	91	17.466	82.726	611.3	-7.869	1082	1.544	26.969	-0.19654	0.675
40 -50	45	41	7.869	90.595	354.1	-17.869	2513	1.653	13.010	-0.30568	0.735
50 - 60	55	22	4.223	94.818	232.2	-27.869	3280	1.740	7.349	-0.39283	0.652
60 - 70	65	18	3.455	98.273	224.6	-37.869	4955	1.813	6.263	-0.46538	0.748
70 - 80	75	6	1.152	99.424	86.4	-47.869	2639	1.875	2.159	-0.52753	0.320
80 - 90	85	2	0.384	99.808	32.6	-57.869	1286	1.929	0.741	-0.58189	0.130
90 - 100	95	1	0.192	100.000	18.2	-67.869	884	1.978	0.380	-0.63019	0.076
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-72.869	0	2.000	0.000	-0.65247	0.000
	Total	521	100.000		2713.1		25899		134.753		8.702

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 27.131 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.174

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 22.260 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.979



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	กลีเซอรอล (Glycerol)	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

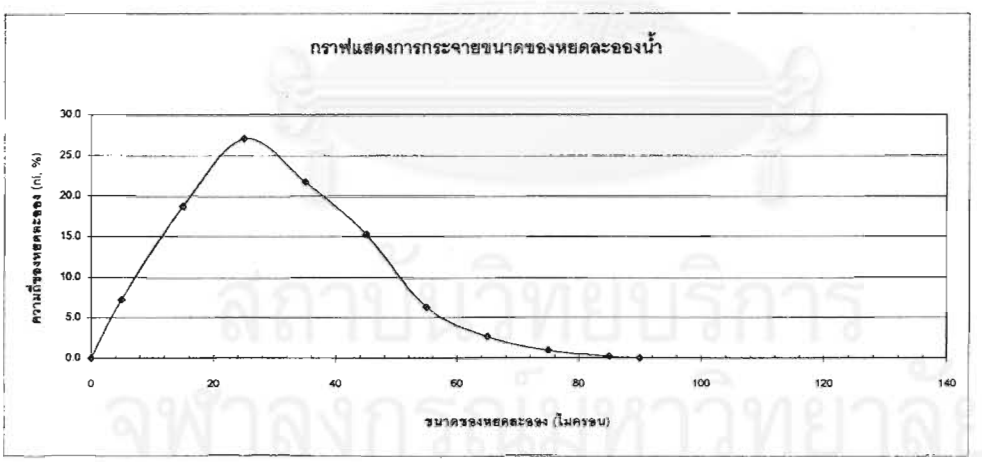
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	30.448	0	0.000	0.000	1.41471	0.000
0 - 10	5	38	7.238	7.238	36.2	25.448	4687	0.699	5.059	0.71574	3.708
10 - 20	15	98	18.667	25.905	280.0	15.448	4454	1.176	21.954	0.23862	1.063
20 - 30	25	142	27.048	52.952	676.2	5.448	803	1.398	37.811	0.01677	0.008
30 - 40	35	114	21.714	74.667	760.0	-4.552	450	1.544	33.528	-0.12936	0.363
40 -50	45	80	15.238	89.905	685.7	-14.552	3227	1.653	25.192	-0.23850	0.867
50 - 60	55	33	6.286	96.190	345.7	-24.552	3789	1.740	10.939	-0.32565	0.667
60 - 70	65	14	2.667	98.857	173.3	-34.552	3184	1.813	4.834	-0.39820	0.423
70 - 80	75	5	0.952	99.810	71.4	-44.552	1890	1.875	1.786	-0.46035	0.202
80 - 90	85	1	0.190	100.000	16.2	-54.552	567	1.929	0.368	-0.51471	0.050
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-59.552	0	1.954	0.000	-0.53953	0.000
	Total	525	100.000		3044.8		23051		141.471		7.350

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 30.448 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.259

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.984 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.873



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : กลีเซอรอล (Glycerol)

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

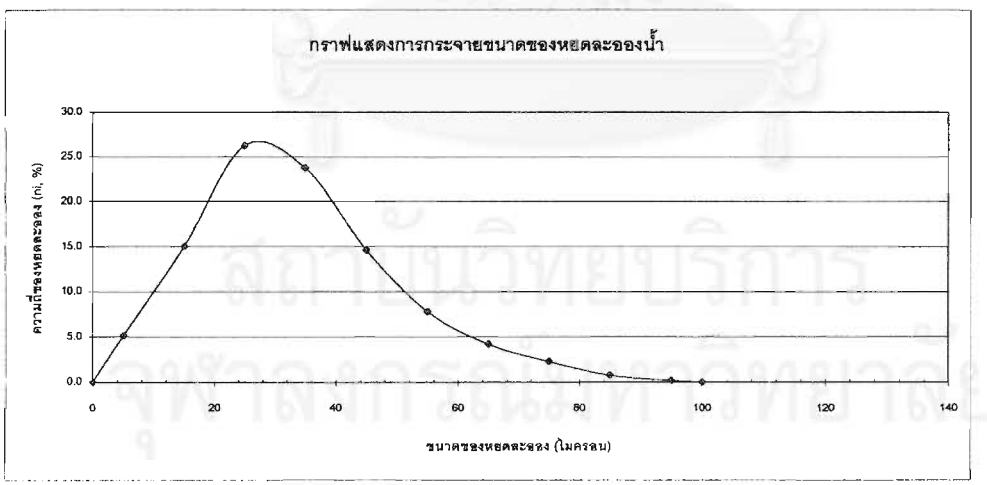
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	33.517	0	0.000	0.000	1.46091	0.000
0 - 10	5	27	5.133	5.133	25.7	28.517	4174	0.699	3.588	0.76194	2.980
10 - 20	15	79	15.019	20.152	225.3	18.517	5150	1.176	17.664	0.28482	1.218
20 - 30	25	138	26.236	46.388	655.9	8.517	1903	1.398	36.676	0.06297	0.104
30 - 40	35	125	23.764	70.152	831.7	-1.483	52	1.544	36.694	-0.08316	0.164
40 -50	45	77	14.639	84.791	658.7	-11.483	1930	1.653	24.201	-0.19230	0.541
50 - 60	55	41	7.795	92.586	428.7	-21.483	3597	1.740	13.566	-0.27945	0.609
60 - 70	65	22	4.183	96.768	271.9	-31.483	4146	1.813	7.583	-0.35200	0.518
70 - 80	75	12	2.281	99.049	171.1	-41.483	3926	1.875	4.278	-0.41415	0.391
80 - 90	85	4	0.760	99.810	64.6	-51.483	2016	1.929	1.467	-0.46851	0.167
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.1	-61.483	719	1.978	0.376	-0.51681	0.051
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-66.483	0	2.000	0.000	-0.53909	0.000
	Total	526	100.000		3351.7		27613		146.091		6.744

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 33.517 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.701

geometric mean(σ_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 28.901 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.824



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	254	มิลลิลิตรต่อนาที (4,233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำมันพืช	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

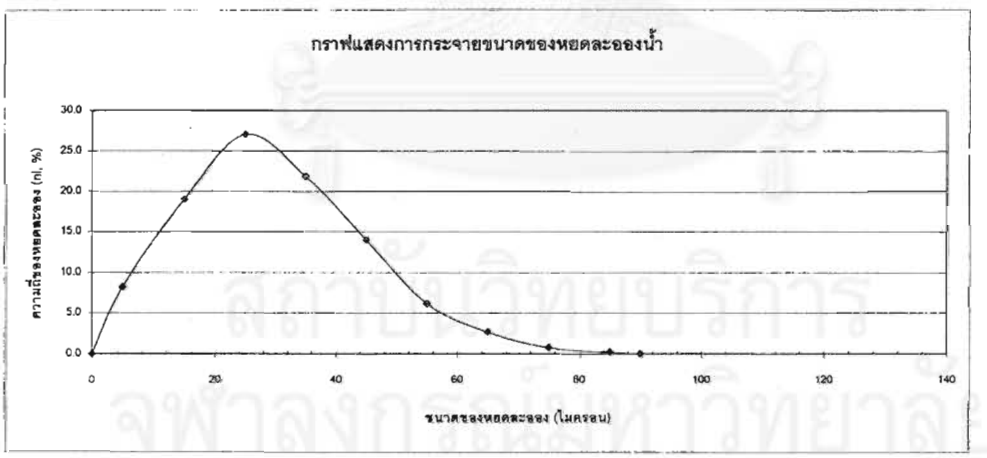
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	29.856	0	0.000	0.000	1.40270	0.000
0 - 10	5	43	8.253	8.253	41.3	24.856	5099	0.699	5.769	0.70373	4.087
10 - 20	15	99	19.002	27.255	285.0	14.856	4194	1.176	22.348	0.22661	0.976
20 - 30	25	141	27.063	54.319	676.6	4.856	638	1.398	37.833	0.00476	0.001
30 - 40	35	114	21.881	76.200	765.8	-5.144	579	1.544	33.786	-0.14136	0.437
40 -50	45	73	14.012	90.211	630.5	-15.144	3213	1.653	23.164	-0.25051	0.879
50 - 60	55	32	6.142	96.353	337.8	-25.144	3883	1.740	10.689	-0.33766	0.700
60 - 70	65	14	2.687	99.040	174.7	-35.144	3319	1.813	4.872	-0.41021	0.452
70 - 80	75	4	0.768	99.808	57.6	-45.144	1565	1.875	1.440	-0.47238	0.171
80 - 90	85	1	0.192	100.000	16.3	-55.144	584	1.929	0.370	-0.52672	0.053
>90	90	0	0.000	100.000	0.0	-60.144	0	1.954	0.000	-0.55154	0.000
	Total	521	100.000		2985.6		23074		140.270		7.757

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 29.856 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 15.267

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 25.276 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.905



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 254 มิลลิลิตรต่อนาที (4.233 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำมันพืช

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

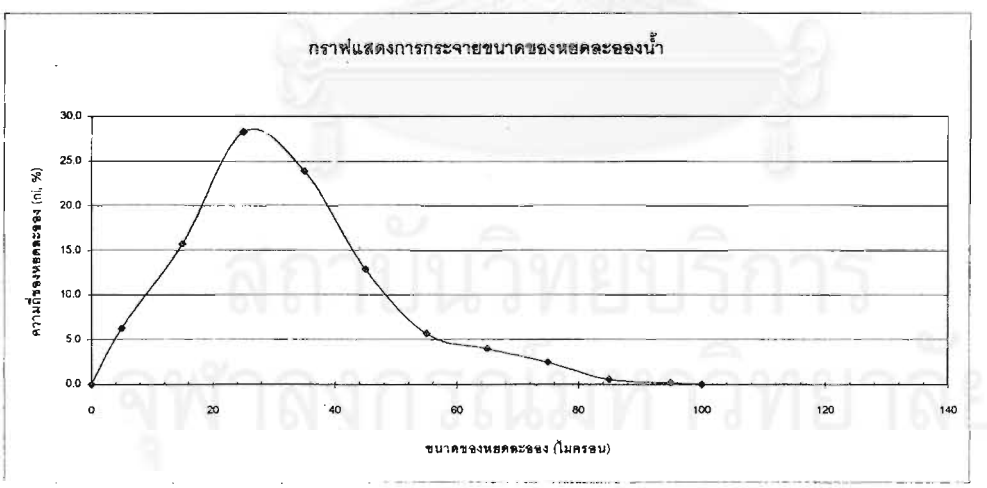
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	32.154	0	0.000	0.000	1.43903	0.000
0 - 10	5	33	6.262	6.262	31.3	27.154	4617	0.699	4.377	0.74006	3.430
10 - 20	15	83	15.750	22.011	236.2	17.154	4634	1.176	18.523	0.26294	1.089
20 - 30	25	149	28.273	50.285	706.8	7.154	1447	1.398	39.524	0.04109	0.048
30 - 40	35	126	23.909	74.194	836.8	-2.846	194	1.544	36.917	-0.10504	0.264
40 -50	45	68	12.903	87.097	580.6	-12.846	2129	1.653	21.332	-0.21418	0.592
50 - 60	55	30	5.693	92.789	313.1	-22.846	2971	1.740	9.907	-0.30133	0.517
60 - 70	65	21	3.985	96.774	259.0	-32.846	4299	1.813	7.224	-0.37388	0.557
70 - 80	75	13	2.467	99.241	185.0	-42.846	4529	1.875	4.625	-0.43603	0.469
80 - 90	85	3	0.569	99.810	48.4	-52.846	1590	1.929	1.098	-0.49039	0.137
90 - 100	95	1	0.190	100.000	18.0	-62.846	749	1.978	0.375	-0.53869	0.055
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-67.846	0	2.000	0.000	-0.56097	0.000
	Total	527	100.000		3215.4		27159		143.903		7.157

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 32.154 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.563

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 27.481 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.857



ผลการวัดการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดที่ใช้ทดลองในโรงโม่หิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 1

อัตราการไหลของของเหลว : 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที (46.667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

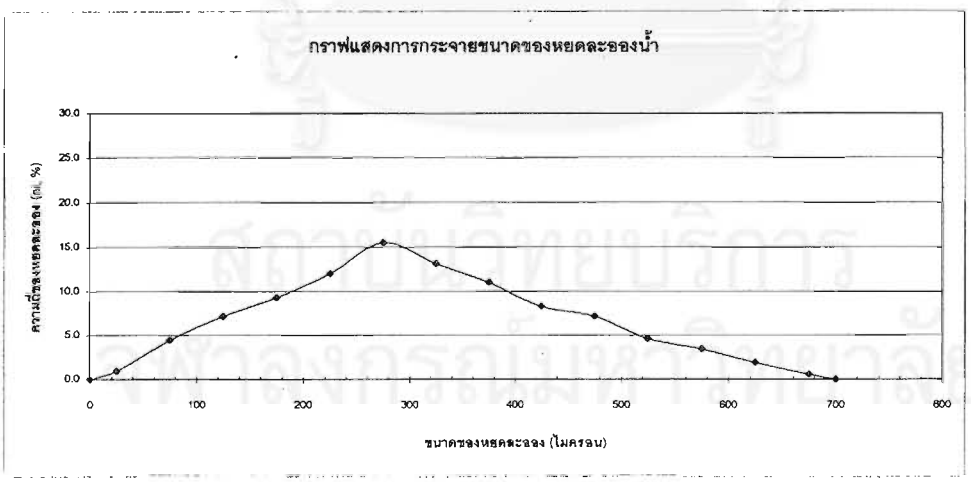
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	313.350	0	0.000	0.000	2.44144	0.000
0 - 50	25	5	0.971	0.971	24.3	288.350	80724	1.398	1.357	1.04350	1.057
50 - 100	75	23	4.466	5.437	335.0	238.350	253717	1.875	8.374	0.56638	1.433
100 - 150	125	37	7.184	8.155	898.1	188.350	254873	2.097	15.065	0.34453	0.853
150 - 200	175	48	9.320	17.476	1631.1	138.350	178398	2.243	20.906	0.19840	0.367
200 - 250	225	62	12.039	29.515	2708.7	88.350	93971	2.352	28.318	0.03926	0.096
250 - 300	275	80	15.534	45.049	4271.8	38.350	22846	2.439	37.893	0.00210	0.000
300 - 350	325	68	13.204	58.252	4291.3	-11.650	1792	2.512	33.167	-0.07045	0.066
350 - 400	375	57	11.068	69.320	4150.5	-61.650	42067	2.574	28.489	-0.13259	0.195
400 - 450	425	43	8.350	77.670	3548.5	-111.650	104084	2.628	21.946	-0.18695	0.292
450 - 500	475	37	7.184	84.854	3412.6	-161.650	187736	2.677	19.231	-0.23526	0.398
500 - 550	525	24	4.660	89.515	2446.6	-211.650	208758	2.720	12.676	-0.27872	0.362
550 - 600	575	18	3.495	93.010	2009.7	-261.650	239281	2.760	9.645	-0.31823	0.354
600 - 650	625	10	1.942	94.951	1213.6	-311.650	188594	2.796	5.429	-0.35444	0.244
650 - 700	675	3	0.583	95.534	393.2	-361.650	76189	2.829	1.648	-0.38787	0.088
> 700	700	0	0.000	95.534	0.0	-386.650	0	2.845	0.000	-0.40366	0.000
	Total	515	100.000		31335.0		1933029		244.144		5.803

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 313.350 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 139.734

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 276.336 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.746



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงไม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 1

อัตราการไหลของของเหลว : 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที (46,667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

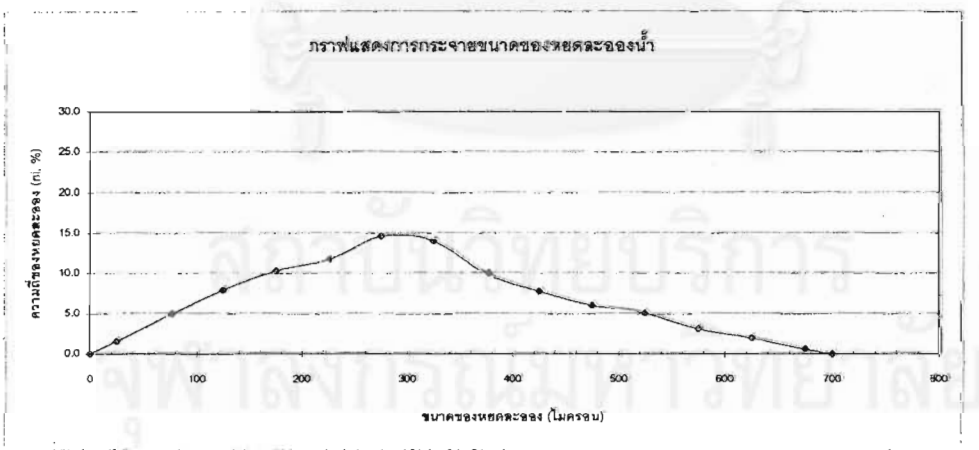
Interval, µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	305.235	0	0.000	0.000	2.42381	0.000
0 - 50	25	8	1.566	1.566	39.1	280.235	122948	1.398	2.189	1.02587	1.648
50 - 100	75	25	4.892	6.458	366.9	230.235	259335	1.875	9.173	0.54875	1.173
100 - 150	125	41	8.023	9.589	1002.9	180.235	260640	2.097	16.825	0.32690	0.857
150 - 200	175	53	10.372	19.961	1815.1	130.235	175918	2.243	23.264	0.18077	0.339
200 - 250	225	60	11.742	31.703	2641.9	80.235	75589	2.352	27.619	0.07162	0.060
250 - 300	275	75	14.677	46.380	4036.2	30.235	13417	2.439	35.802	-0.01553	0.004
300 - 350	325	72	14.090	60.470	4579.3	-19.765	5504	2.512	35.392	-0.08808	0.109
350 - 400	375	51	9.980	70.450	3742.7	-69.765	48577	2.574	25.690	-0.15022	0.225
400 - 450	425	40	7.828	78.278	3326.8	-119.765	112279	2.628	20.574	-0.20458	0.328
450 - 500	475	31	6.067	84.344	2881.6	-169.765	174839	2.677	16.238	-0.25289	0.388
500 - 550	525	26	5.088	89.432	2671.2	-219.765	245737	2.720	13.840	-0.29635	0.447
550 - 600	575	16	3.131	92.564	1800.4	-269.765	227861	2.760	8.641	-0.33586	0.353
600 - 650	625	10	1.957	94.521	1223.1	-319.765	200097	2.796	5.471	-0.37207	0.271
650 - 700	675	3	0.587	95.108	396.3	-369.765	80270	2.829	1.661	-0.40550	0.097
> 700	700	0	0.000	95.108	0.0	-394.765	0	2.845	0.000	-0.42129	0.000
	Total	511	100.000		30523.5		2003008		242.381		6.599

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 305.235 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 142.241

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 265.342 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_{gi} - \log d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))$ = 1.312



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 1

อัตราการไหลของของเหลว : 3,850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

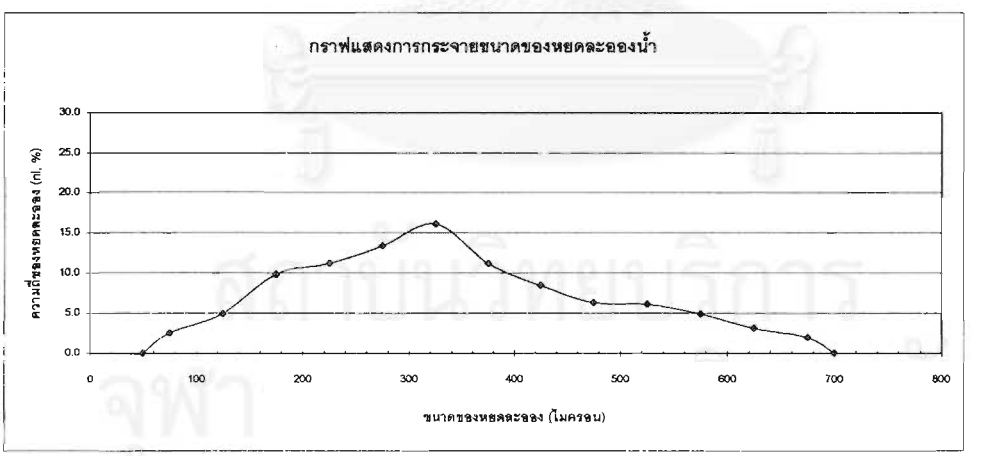
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<50	50	0	0.000	0.000	0.0	290.422	0	1.699	0.000	0.78946	0.000
50 - 100	75	13	2.554	2.554	191.6	265.422	179929	1.875	4.789	0.61337	0.961
100 - 150	125	25	4.912	7.466	613.9	215.422	227931	2.097	10.299	0.39152	0.753
150 - 200	175	50	9.823	17.289	1719.1	165.422	268807	2.243	22.034	0.24539	0.592
200 - 250	225	57	11.198	28.487	2519.6	115.422	149189	2.352	26.341	0.13625	0.208
250 - 300	275	68	13.360	41.847	3673.9	65.422	57180	2.439	32.588	0.04910	0.032
300 - 350	325	82	16.110	57.957	5235.8	15.422	3832	2.512	40.466	-0.02345	0.009
350 - 400	375	57	11.198	69.155	4199.4	-34.578	13389	2.574	28.825	-0.08560	0.082
400 - 450	425	43	8.448	77.603	3590.4	-84.578	60431	2.628	22.204	-0.13996	0.165
450 - 500	475	32	6.287	83.890	2986.2	-134.578	113862	2.677	16.828	-0.18826	0.223
500 - 550	525	31	6.090	89.980	3197.4	-184.578	207492	2.720	16.567	-0.23173	0.327
550 - 600	575	25	4.912	94.892	2824.2	-234.578	270268	2.760	13.554	-0.27123	0.361
600 - 650	625	16	3.143	98.035	1964.6	-284.578	254568	2.796	8.789	-0.30745	0.297
650 - 700	675	10	1.965	100.000	1326.1	-334.578	219926	2.829	5.559	-0.34087	0.228
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-359.578	0	2.845	0.000	-0.35667	0.000
	Total	509	100.000		34042.2		2026804		248.843		4.238

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 340.422 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 143.083

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 307.916 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.610



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 1

อัตราการไหลของของเหลว : 3.850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

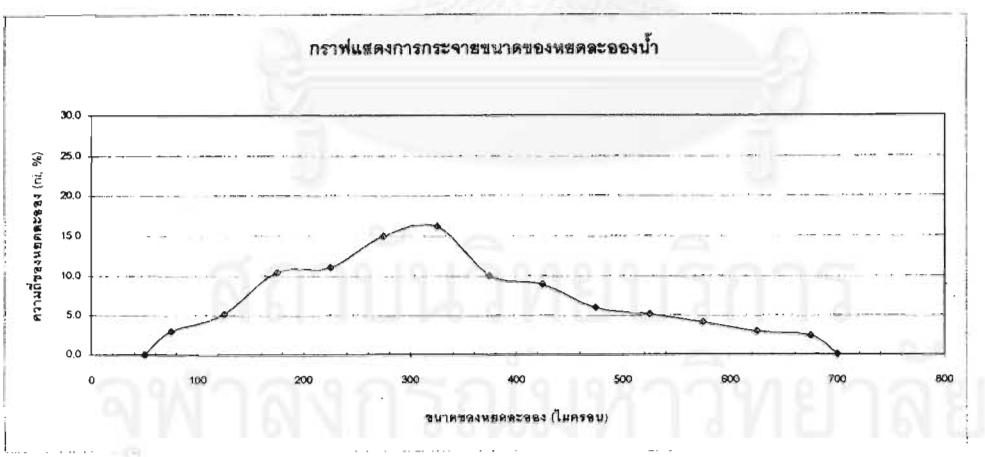
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<50	50	0	0.000	0.000	0.0	283.661	0	1.699	0.000	0.77944	0.000
50 - 100	75	15	2.953	2.953	221.5	258.661	197556	1.875	5.537	0.60335	1.075
100 - 150	125	26	5.118	8.071	639.8	208.661	222840	2.097	10.732	0.38150	0.745
150 - 200	175	53	10.433	18.504	1825.8	158.661	262630	2.243	23.402	0.23537	0.578
200 - 250	225	56	11.024	29.528	2480.3	108.661	130159	2.352	25.930	0.12623	0.176
250 - 300	275	76	14.961	44.488	4114.2	58.661	51482	2.439	36.494	0.03908	0.023
300 - 350	325	82	16.142	60.630	5246.1	8.661	1211	2.512	40.546	-0.03347	0.018
350 - 400	375	51	10.039	70.669	3764.8	-41.339	17156	2.574	25.842	-0.09562	0.092
400 - 450	425	45	8.858	79.528	3764.8	-91.339	73902	2.628	23.283	-0.14998	0.199
450 - 500	475	30	5.906	85.433	2805.1	-141.339	117972	2.677	15.807	-0.19828	0.232
500 - 550	525	26	5.118	90.551	2687.0	-191.339	187376	2.720	13.922	-0.24175	0.299
550 - 600	575	21	4.134	94.685	2377.0	-241.339	240774	2.760	11.408	-0.28126	0.327
600 - 650	625	15	2.953	97.638	1845.5	-291.339	250625	2.796	8.256	-0.31747	0.298
650 - 700	675	12	2.362	100.000	1594.5	-341.339	275225	2.829	6.683	-0.35089	0.291
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-366.339	0	2.845	0.000	-0.36669	0.000
	Total	508	100.000		33366.1		2028915		247.841		4.352

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 333.661 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 143.158

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 300.893 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.621



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 2

อัตราการไหลของของเหลว : 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที (46,667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

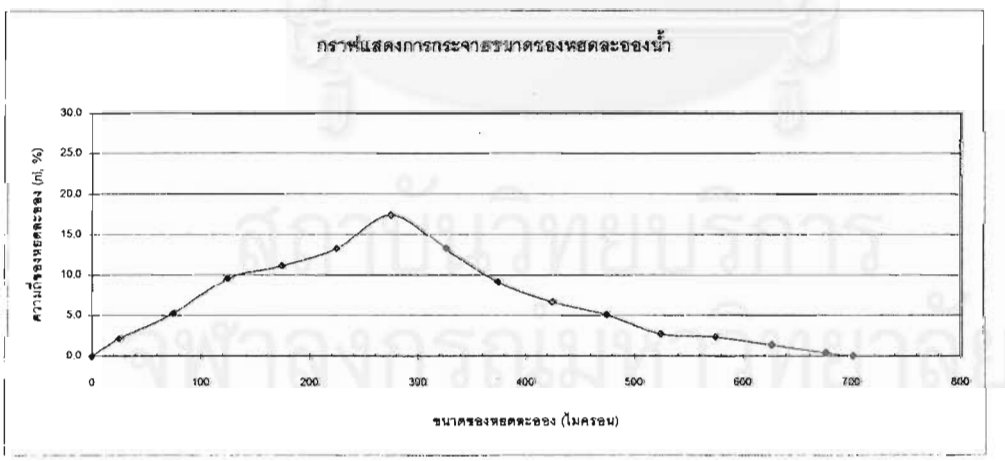
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	283.121	0	0.000	0.000	2.38910	0.000
0 - 50	25	11	2.153	2.153	53.8	258.121	143423	1.398	3.009	0.99116	2.115
50 - 100	75	27	5.284	7.436	396.3	208.121	228863	1.875	9.907	0.51404	1.396
100 - 150	125	49	9.589	17.025	1198.6	158.121	239749	2.097	20.107	0.29219	0.819
150 - 200	175	57	11.155	28.180	1952.1	108.121	130400	2.243	25.020	0.14606	0.238
200 - 250	225	68	13.307	41.487	2994.1	58.121	44953	2.352	31.301	0.03692	0.018
250 - 300	275	89	17.417	58.904	4789.6	8.121	1149	2.439	42.485	-0.05023	0.044
300 - 350	325	68	13.307	72.211	4324.9	-41.879	23339	2.512	33.426	-0.12278	0.201
350 - 400	375	47	9.198	81.409	3449.1	-91.879	77644	2.574	23.675	-0.18493	0.315
400 - 450	425	34	6.654	88.063	2827.8	-141.879	133934	2.628	17.488	-0.23929	0.381
450 - 500	475	26	5.088	93.151	2416.8	-191.879	187329	2.677	13.619	-0.28759	0.421
500 - 550	525	14	2.740	95.890	1438.4	-241.879	160288	2.720	7.452	-0.33106	0.300
550 - 600	575	12	2.348	98.239	1350.3	-291.879	200062	2.760	6.481	-0.37057	0.322
600 - 650	625	7	1.370	99.609	856.2	-341.879	160111	2.796	3.830	-0.40678	0.227
650 - 700	675	2	0.391	100.000	264.2	-391.879	60105	2.829	1.107	-0.44020	0.076
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-416.879	0	2.845	0.000	-0.45600	0.000
	Total	511	100.000		28312.1		1791350		238.910		6.872

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 283.121 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 134.516

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 244.962 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.834



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 2

อัตราการไหลของของเหลว : 2.800 มิลลิลิตรต่อนาที (46.667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

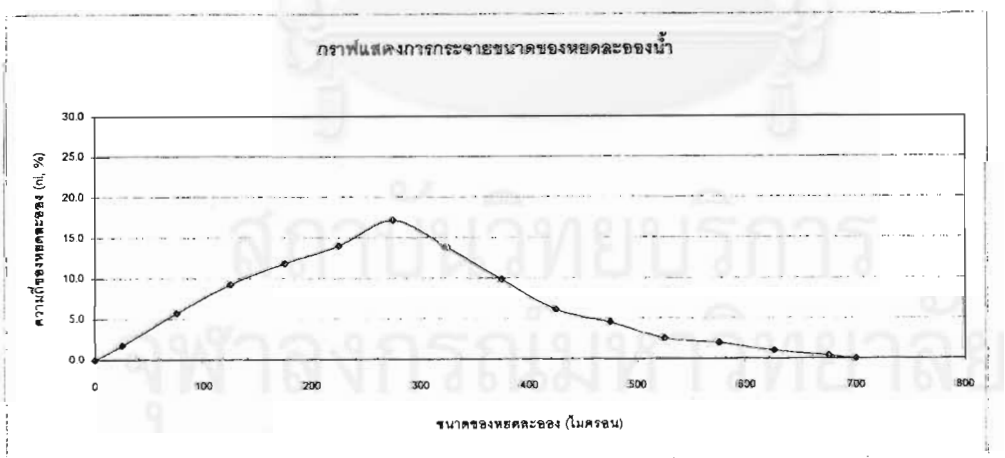
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน f_i	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	278.748	0	0.000	0.000	2.38559	0.000
0 - 50	25	9	1.775	1.775	44.4	253.748	114298	1.398	2.482	0.98766	1.732
50 - 100	75	29	5.720	7.495	429.0	203.748	237451	1.875	10.725	0.51053	1.491
100 - 150	125	47	9.270	16.765	1158.8	153.748	219132	2.097	19.439	0.28868	0.773
150 - 200	175	60	11.834	28.600	2071.0	103.748	127379	2.243	26.545	0.14256	0.241
200 - 250	225	71	14.004	42.604	3150.9	53.748	40455	2.352	32.940	0.03341	0.016
250 - 300	275	87	17.160	59.763	4718.9	3.748	241	2.439	41.858	-0.05374	0.050
300 - 350	325	70	13.807	73.570	4487.2	-46.252	29537	2.512	34.681	-0.12629	0.220
350 - 400	375	50	9.862	83.432	3698.2	-96.252	91366	2.574	25.385	-0.18844	0.350
400 - 450	425	31	6.114	89.546	2598.6	-146.252	130786	2.628	16.071	-0.24279	0.360
450 - 500	475	23	4.536	94.083	2154.8	-196.252	174723	2.677	12.143	-0.29110	0.384
500 - 550	525	13	2.564	96.647	1346.2	-246.252	155488	2.720	6.975	-0.33456	0.287
550 - 600	575	10	1.972	98.619	1134.1	-296.252	173108	2.760	5.443	-0.37407	0.276
600 - 650	625	5	0.986	99.606	616.4	-346.252	118235	2.796	2.757	-0.41029	0.166
650 - 700	675	2	0.394	100.000	266.3	-396.252	61939	2.829	1.116	-0.44371	0.078
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-421.252	0	2.845	0.000	-0.45950	0.000
	Total	507	100.000		27874.8		1674138		238.559		6.423

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 278.748 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - n_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 180.040

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 242.993 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.798



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 2

อัตราการไหลของของเหลว : 3.850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

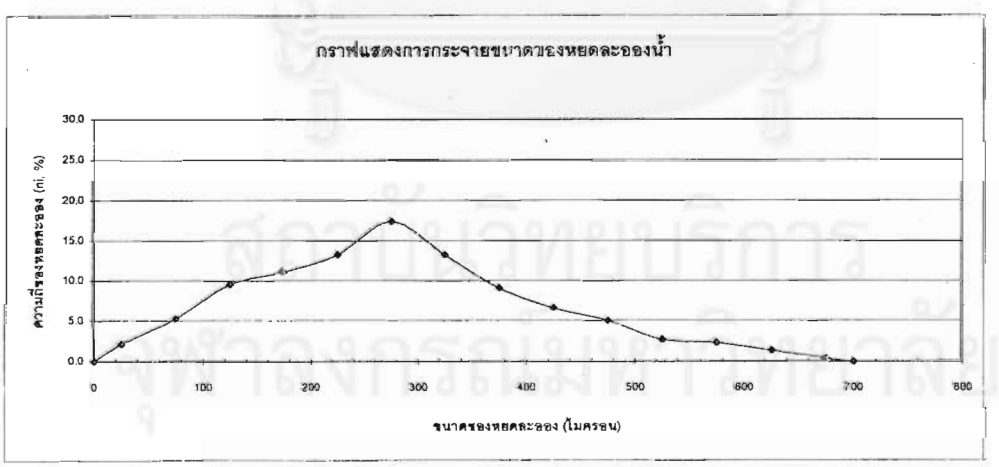
Interval, μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	307.540	0	0.000	0.000	2.43411	0.000
0 - 50	25	5	0.992	0.992	24.8	282.540	79195	1.398	1.387	1.03617	1.065
50 - 100	75	16	3.175	4.167	238.1	232.540	171666	1.875	5.953	0.55905	0.992
100 - 150	125	39	7.738	11.905	967.3	182.540	257839	2.097	16.226	0.33720	0.880
150 - 200	175	59	11.706	23.611	2048.6	132.540	205643	2.243	26.258	0.19107	0.427
200 - 250	225	73	14.484	38.095	3258.9	82.540	98677	2.352	34.069	0.08192	0.097
250 - 300	275	78	15.476	53.571	4256.0	32.540	16387	2.439	37.752	-0.00523	0.000
300 - 350	325	67	13.294	66.865	4320.4	-17.460	4053	2.512	33.392	-0.07778	0.080
350 - 400	375	45	8.929	75.794	3348.2	-67.460	40633	2.574	22.982	-0.13992	0.175
400 - 450	425	34	6.746	82.540	2867.1	-117.460	93075	2.628	17.731	-0.19428	0.255
450 - 500	475	28	5.556	88.095	2638.9	-167.460	155794	2.677	14.871	-0.24259	0.327
500 - 550	525	26	5.159	93.254	2708.3	-217.460	243951	2.720	14.033	-0.28605	0.422
550 - 600	575	19	3.770	97.024	2167.7	-267.460	269676	2.760	10.404	-0.32556	0.400
600 - 650	625	10	1.984	99.008	1240.1	-317.460	199962	2.796	5.547	-0.36177	0.260
650 - 700	675	5	0.992	100.000	669.6	-367.460	133955	2.829	2.807	-0.39520	0.155
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-392.460	0	2.845	0.000	-0.41099	0.000
	Total	504	100.000		30754.0		1970506		243.411		5.535

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 307.540 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 141.082

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 271.711 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.724



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 2

อัตราการไหลของของเหลว : 3.850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

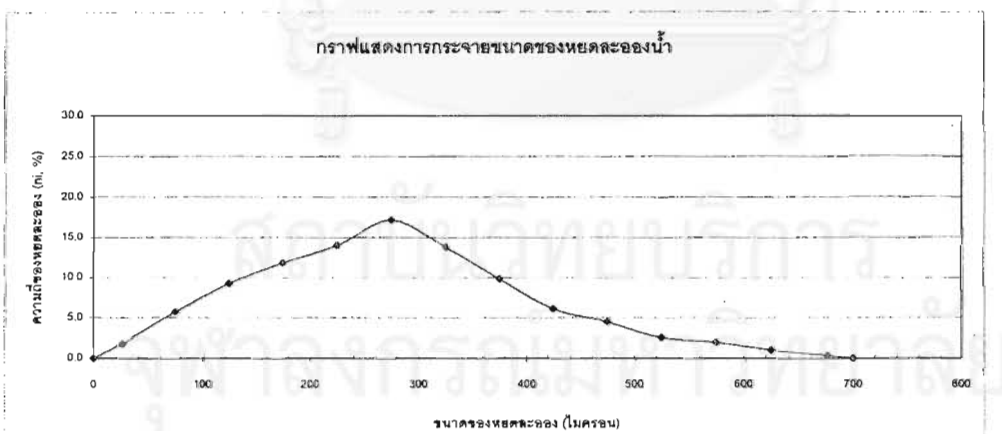
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	301.424	0	0.000	0.000	2.42498	0.000
0 - 50	25	8	1.572	1.572	39.3	276.424	120095	1.398	2.197	1.02704	1.658
50 - 100	75	12	2.358	3.929	176.8	226.424	120868	1.875	4.421	0.54991	0.713
100 - 150	125	42	8.251	12.181	1031.4	176.424	256832	2.097	17.303	0.32807	0.888
150 - 200	175	57	11.198	23.379	1959.7	126.424	178986	2.243	25.119	0.18194	0.371
200 - 250	225	78	15.324	38.703	3447.9	76.424	89504	2.352	36.045	0.07279	0.081
250 - 300	275	83	16.306	55.010	4484.3	26.424	11386	2.439	39.777	-0.01436	0.003
300 - 350	325	72	14.145	69.155	4597.2	-23.576	7862	2.512	35.532	-0.08691	0.107
350 - 400	375	50	9.823	78.978	3683.7	-73.576	53177	2.574	25.285	-0.14906	0.218
400 - 450	425	31	6.090	85.069	2588.4	-123.576	93006	2.628	16.006	-0.20341	0.252
450 - 500	475	24	4.715	89.784	2239.7	-173.576	142060	2.677	12.621	-0.25172	0.299
500 - 550	525	20	3.929	93.713	2062.9	-223.576	196409	2.720	10.688	-0.29518	0.342
550 - 600	575	16	3.143	96.857	1807.5	-273.576	235265	2.760	8.675	-0.33469	0.352
600 - 650	625	10	1.965	98.821	1227.9	-323.576	205700	2.796	5.493	-0.37090	0.270
650 - 700	675	5	1.179	100.000	795.7	-373.576	164509	2.829	3.335	-0.40433	0.193
> 700	700	0	0.000	100.000	0.0	-398.576	0	2.845	0.000	-0.42012	0.000
	Total	509	100.000		30142.4		1875657		242.498		5.747

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 301.424 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 137.645

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 266.058 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.742



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 3

อัตราการไหลของของเหลว : 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที (46.667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

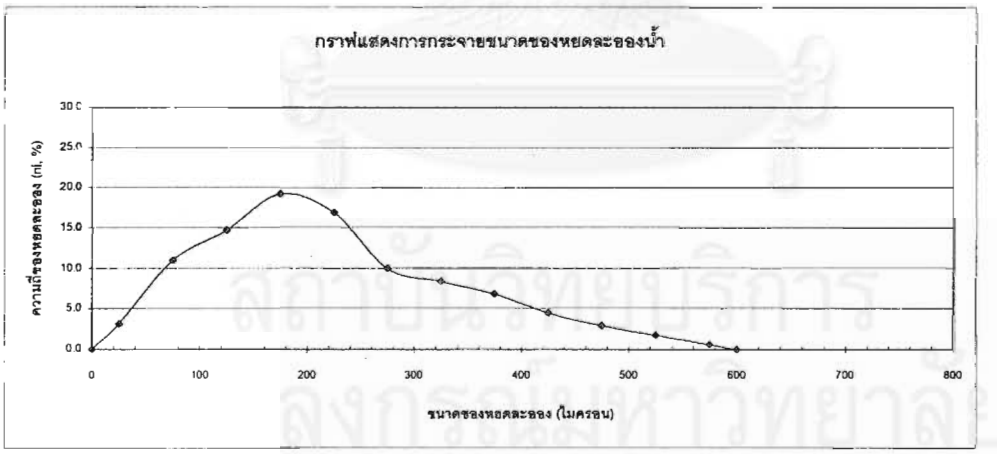
Interval, µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	225.392	0	0.000	0.000	2.27964	0.000
0 - 50	25	16	3.137	3.137	78.4	200.392	125983	1.398	4.386	0.88170	2.439
50 - 100	75	56	10.980	14.118	823.5	150.392	248352	1.875	20.589	0.40458	1.797
100 - 150	125	75	14.706	28.824	1838.2	100.392	148214	2.097	30.837	0.18273	0.491
150 - 200	175	98	19.216	48.039	3362.7	50.392	48796	2.243	43.102	0.03660	0.026
200 - 250	225	86	16.863	64.902	3794.1	0.392	3	2.352	39.664	-0.07254	0.089
250 - 300	275	51	10.000	74.902	2750.0	-49.608	24609	2.439	24.393	-0.15969	0.255
300 - 350	325	43	8.431	83.333	2740.2	-99.608	83654	2.512	21.179	-0.23224	0.455
350 - 400	375	35	6.863	90.196	2573.5	-149.608	153605	2.574	17.665	-0.29439	0.595
400 - 450	425	23	4.510	94.706	1916.7	-199.608	179685	2.628	11.854	-0.34875	0.549
450 - 500	475	15	2.941	97.647	1397.1	-249.608	183247	2.677	7.873	-0.39705	0.464
500 - 550	525	9	1.765	99.412	926.5	-299.608	158409	2.720	4.800	-0.44052	0.342
550 - 600	575	3	0.588	100.000	338.2	-349.608	71697	2.760	1.623	-0.48003	0.136
>600	600	0	0.000	100.000	0.0	-374.608	0	2.778	0.000	-0.49851	0.000
	Total	510	100.000		22539.2		1426455		227.964		7.636

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 225.392 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 120.036

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 190.388 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.896



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 3

อัตราการไหลของของเหลว : 2.800 มิลลิลิตรต่อนาที (46.667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

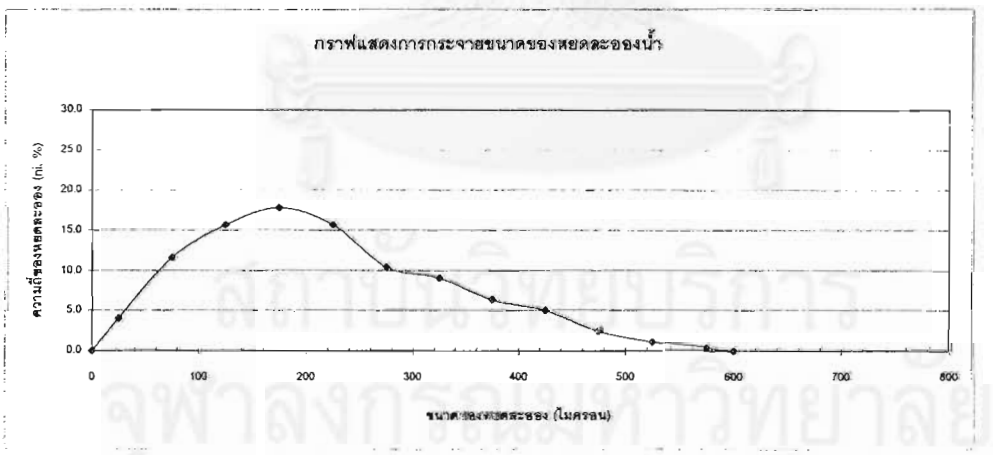
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	219.961	0	0.000	0.000	2.26414	0.000
0 - 50	25	21	4.070	4.070	101.7	194.961	154691	1.398	5.689	0.86620	3.054
50 - 100	75	60	11.628	15.698	872.1	144.961	244346	1.875	21.803	0.38908	1.760
100 - 150	125	81	15.698	31.395	1962.2	94.961	141556	2.097	32.917	0.16723	0.439
150 - 200	175	92	17.829	49.225	3120.2	44.961	36042	2.243	39.992	0.02110	0.008
200 - 250	225	81	15.698	64.922	3532.0	-5.039	399	2.352	36.924	-0.08804	0.122
250 - 300	275	54	10.465	75.388	2877.9	-55.039	31702	2.439	25.528	-0.17519	0.321
300 - 350	325	47	9.109	84.496	2960.3	-105.039	100496	2.512	22.880	-0.24774	0.559
350 - 400	375	33	6.395	90.891	2398.3	-155.039	153725	2.574	16.462	-0.30989	0.614
400 - 450	425	26	5.039	95.930	2141.5	-205.039	211834	2.628	13.244	-0.36425	0.669
450 - 500	475	13	2.519	98.450	1196.7	-255.039	163872	2.677	6.744	-0.41255	0.429
500 - 550	525	6	1.163	99.612	610.5	-305.039	108196	2.720	3.163	-0.45602	0.242
550 - 600	575	2	0.388	100.000	222.9	-355.039	48858	2.760	1.070	-0.49553	0.095
>600	600	0	0.000	100.000	0.0	-380.039	0	2.778	0.000	-0.51401	0.000
	Total	516	100.000		21996.1		1395717		226.414		8.311

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 219.961 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 118.736

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 183.714 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / [(\Sigma n_i - 1)]\}$ = 1.949



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 3

อัตราการไหลของของเหลว : 3,850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

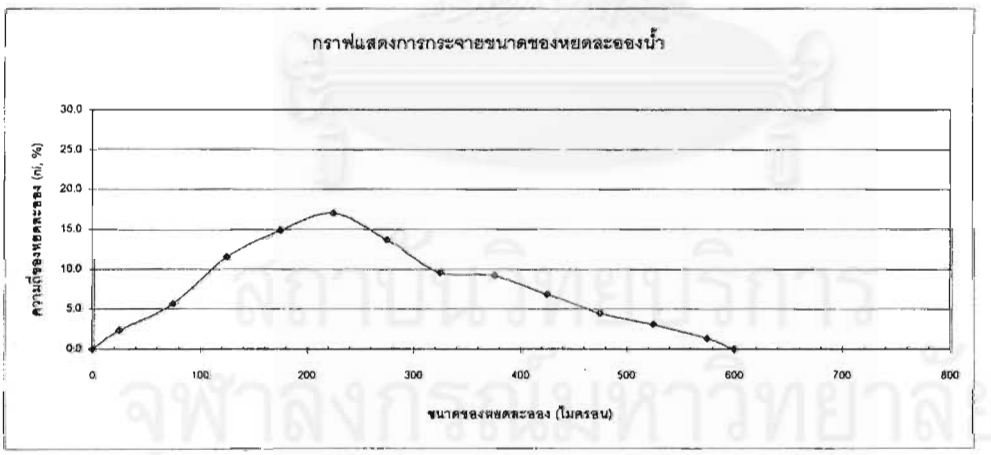
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	262.255	0	0.000	0.000	2.35528	0.000
0 - 50	25	12	2.353	2.353	58.8	237.255	132447	1.398	3.289	0.95734	2.156
50 - 100	75	29	5.686	8.039	426.5	187.255	199386	1.875	10.662	0.48022	1.311
100 - 150	125	59	11.569	19.608	1446.1	137.255	217940	2.097	24.258	0.25837	0.772
150 - 200	175	76	14.902	34.510	2607.8	87.255	113455	2.243	33.426	0.11224	0.188
200 - 250	225	87	17.059	51.569	3838.2	37.255	23676	2.352	40.125	0.00310	0.000
250 - 300	275	70	13.725	65.294	3774.5	-12.745	2230	2.439	33.481	-0.08405	0.097
300 - 350	325	49	9.608	74.902	3122.5	-62.745	37826	2.512	24.134	-0.15660	0.236
350 - 400	375	47	9.216	84.118	3455.9	-112.745	117145	2.574	23.721	-0.21875	0.441
400 - 450	425	35	6.863	90.980	2916.7	-162.745	181766	2.628	18.038	-0.27311	0.512
450 - 500	475	23	4.510	95.490	2142.2	-212.745	204116	2.677	12.071	-0.32141	0.466
500 - 550	525	16	3.137	98.627	1647.1	-262.745	216580	2.720	8.534	-0.36488	0.418
550 - 600	575	7	1.373	100.000	789.2	-312.745	134248	2.760	3.788	-0.40439	0.224
>600	600	0	0.000	100.000	0.0	-337.745	0	2.778	0.000	-0.42287	0.000
	Total	510	100.000		26225.5		1580615		235.528		6.821

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 262.255 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 126.364

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 226.611 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.830



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 3

อัตราการไหลของของเหลว : 3,850 มิลลิลิตรต่อนาที (64,167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

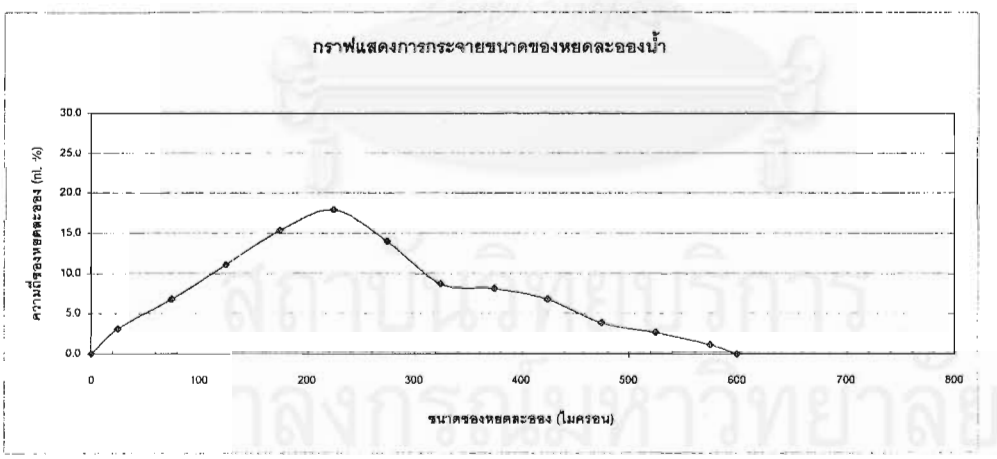
Interval µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	253.460	0	0.000	0.000	2.33540	0.000
0 - 50	25	16	3.119	3.119	78.0	228.460	162788	1.398	4.360	0.93746	2.741
50 - 100	75	35	6.823	9.942	511.7	178.460	217286	1.875	12.793	0.46034	1.446
100 - 150	125	57	11.111	21.053	1388.9	128.460	183355	2.097	23.299	0.23849	0.632
150 - 200	175	79	15.400	36.452	2694.9	78.460	94800	2.243	34.542	0.09237	0.131
200 - 250	225	92	17.934	54.386	4035.1	28.460	14526	2.352	42.183	-0.01678	0.005
250 - 300	275	72	14.035	68.421	3859.6	-21.540	6512	2.439	34.236	-0.10393	0.152
300 - 350	325	45	8.772	77.193	2850.9	-71.540	44894	2.512	22.034	-0.17648	0.273
350 - 400	375	42	8.187	85.380	3070.2	-121.540	120940	2.574	21.074	-0.23863	0.466
400 - 450	425	35	6.823	92.203	2899.6	-171.540	200762	2.628	17.932	-0.29298	0.586
450 - 500	475	20	3.899	96.101	1851.9	-221.540	191345	2.677	10.435	-0.34129	0.454
500 - 550	525	14	2.729	98.830	1432.7	-271.540	201223	2.720	7.423	-0.38475	0.404
550 - 600	575	6	1.170	100.000	672.5	-321.540	120922	2.760	3.228	-0.42426	0.211
>600	600	0	0.000	100.000	0.0	-346.540	0	2.778	0.000	-0.44275	0.000
	Total	513	100.000		26346.0		1559353		233.540		7.501

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 253.460 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 125.503

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 216.473 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.885



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 4

อัตราการไหลของของเหลว : 2,800 มิลลิลิตรต่อนาที (46,667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

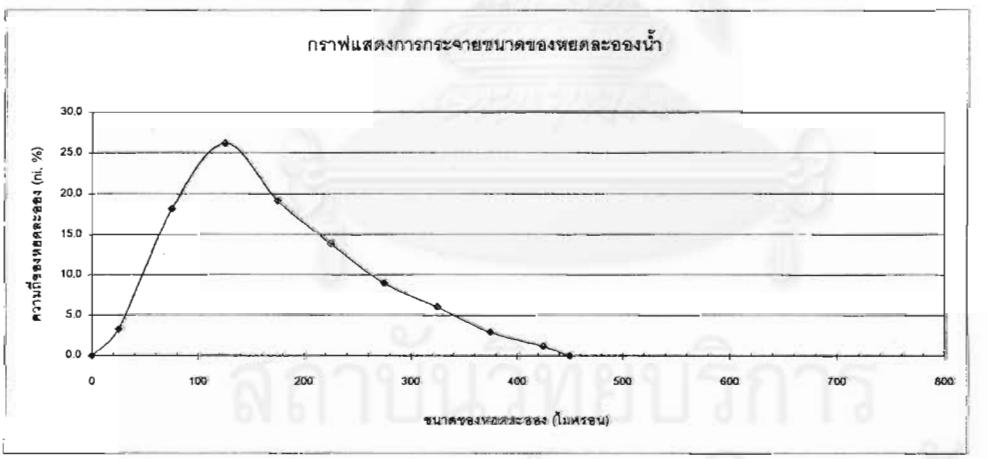
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	172.554	0	0.000	0.000	2.17302	0.000
0 - 50	25	17	3.327	3.327	83.2	147.554	72432	1.398	4.651	0.77508	1.999
50 - 100	75	93	18.200	21.526	1365.0	97.554	173201	1.875	34.125	0.29796	1.616
100 - 150	125	134	26.223	47.750	3277.9	47.554	59300	2.097	54.987	0.07611	0.152
150 - 200	175	98	19.178	66.928	3356.2	-2.446	115	2.243	43.017	-0.07002	0.094
200 - 250	225	71	13.894	80.822	3126.2	-52.446	38218	2.352	32.682	-0.17916	0.446
250 - 300	275	46	9.002	89.824	2475.5	-102.446	94478	2.439	21.959	-0.26631	0.638
300 - 350	325	31	6.067	86.888	1971.6	-152.446	140985	2.512	15.238	-0.33886	0.697
350 - 400	375	15	2.935	92.759	1100.8	-202.446	120307	2.574	7.556	-0.40101	0.472
400 - 450	425	6	1.174	93.933	499.0	-252.446	74829	2.628	3.086	-0.45537	0.243
>450	450	0	0.000	93.933	0.0	-277.446	0	2.653	0.000	-0.48019	0.000
	Total	511	100.000		17255.4		773863		217.302		6.357

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 172.554 ไมครอน

standard deviation σ = $[\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]^{1/2}$ = 88.413

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 148.943 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}[\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)]$ = 1.792



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 4

อัตราการไหลของของเหลว : 2.800 มิลลิลิตรต่อนาที (46.667 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

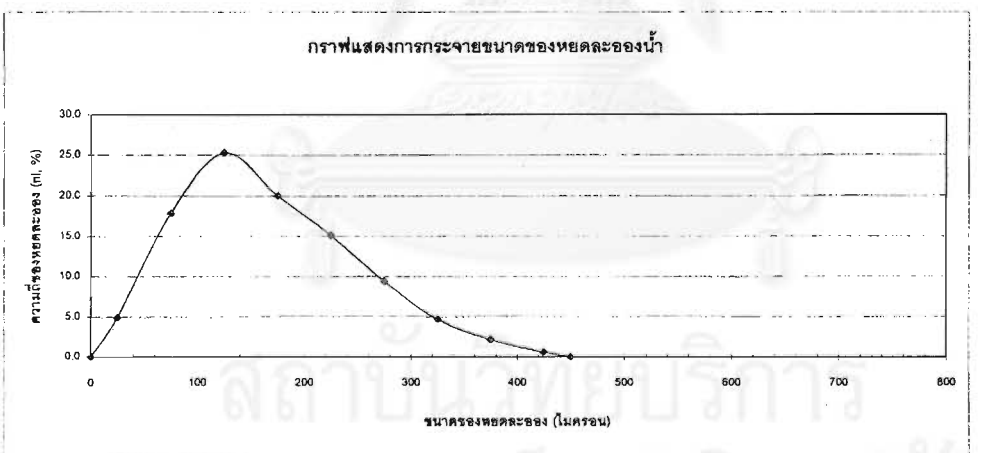
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
0	0	0	0.000	0.000	0.0	166.961	0	0.000	0.000	2.15600	0.000
0 - 50	25	25	4.902	4.902	122.5	141.961	98789	1.398	6.853	0.75806	2.817
50 - 100	75	91	17.843	22.745	1338.2	91.961	150896	1.875	33.457	0.28094	1.408
100 - 150	125	129	25.294	48.039	3161.8	41.961	44536	2.097	53.039	0.05909	0.088
150 - 200	175	102	20.000	68.039	3500.0	-8.039	1293	2.243	44.861	-0.08704	0.152
200 - 250	225	77	15.098	83.137	3397.1	-58.039	50859	2.352	35.513	-0.19618	0.581
250 - 300	275	48	9.412	92.549	2588.2	-108.039	109859	2.439	22.958	-0.28333	0.756
300 - 350	325	24	4.706	97.843	1529.4	-158.039	117536	2.512	11.821	-0.35588	0.596
350 - 400	375	11	2.157	94.706	808.8	-208.039	93350	2.574	5.552	-0.41803	0.377
400 - 450	425	3	0.588	95.294	250.0	-258.039	39167	2.628	1.546	-0.47239	0.131
>450	450	0	0.000	95.294	0.0	-283.039	0	2.653	0.000	-0.49721	0.000
	Total	510	100.000		16696.1		706282		215.600		6.906

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 166.961 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 84.464

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 143.219 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.837



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงโม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 4

อัตราการไหลของของเหลว : 3.850 มิลลิลิตรต่อนาที (64,167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 1

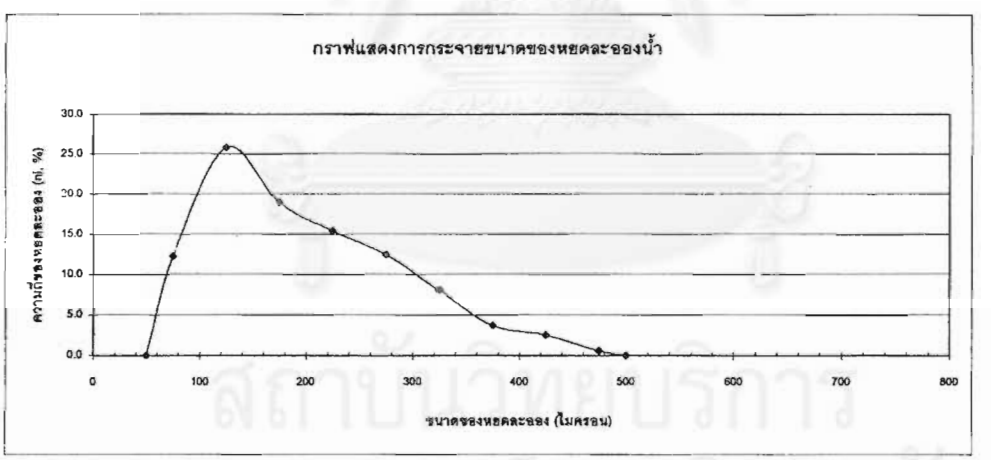
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (ni)	n_i(%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<50	50	0	0.000	0.000	0.0	147.603	0	1.699	0.000	0.54864	0.000
50 - 100	75	63	12.329	12.329	924.7	122.603	185319	1.875	23.117	0.37255	1.711
100 - 150	125	132	25.832	38.160	3229.0	72.603	136163	2.097	54.167	0.15070	0.587
150 - 200	175	97	18.982	57.143	3321.9	22.603	9698	2.243	42.578	0.00457	0.000
200 - 250	225	79	15.460	72.603	3478.5	-27.397	11604	2.352	36.364	-0.10457	0.169
250 - 300	275	64	12.524	85.127	3444.2	-77.397	75026	2.439	30.551	-0.19172	0.460
300 - 350	325	41	8.023	93.151	2607.6	-127.397	130222	2.512	20.154	-0.26427	0.560
350 - 400	375	19	3.718	88.845	1394.3	-177.397	117011	2.574	9.571	-0.32642	0.396
400 - 450	425	13	2.544	95.695	1081.2	-227.397	131551	2.628	6.687	-0.38078	0.369
450 - 500	475	3	0.587	96.282	278.9	-277.397	45176	2.677	1.571	-0.42908	0.108
>500	500	0	0.000	96.282	0.0	-302.397	0	2.699	0.000	-0.45136	0.000
	Total	511	100.000		19760.3		841769		224.761		4.361

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 197.603 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 92.210

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 176.852 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}$ = 1.621



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดที่ใช้งานจริงในโรงไม่หิน

หมายเลขของหัวฉีด : 4

อัตราการไหลของของเหลว : 3.850 มิลลิลิตรต่อนาที (64.167 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ครั้งที่ทำการวัด : 2

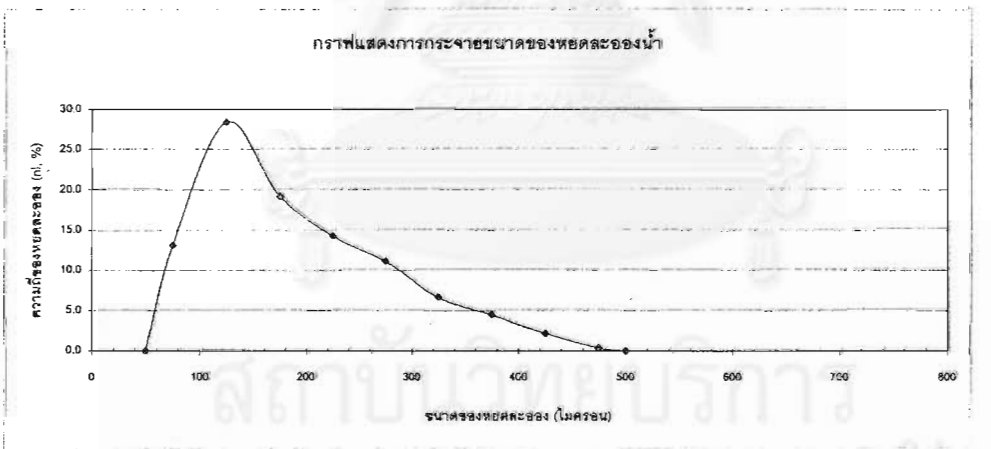
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i (%)	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
<50	50	0	0.000	0.000	0.0	141.569	0	1.699	0.000	0.53460	0.000
50 - 100	75	67	13.137	13.137	985.3	116.569	178512	1.875	24.633	0.35851	1.689
100 - 150	125	145	28.431	41.569	3553.9	66.569	125980	2.097	59.618	0.13666	0.531
150 - 200	175	98	19.216	60.784	3362.7	16.569	5275	2.243	43.102	-0.00946	0.002
200 - 250	225	73	14.314	75.098	3220.6	-33.431	15998	2.352	33.668	-0.11861	0.201
250 - 300	275	57	11.176	86.275	3073.5	-83.431	77797	2.439	27.263	-0.20576	0.473
300 - 350	325	34	6.667	92.941	2166.7	-133.431	118693	2.512	16.746	-0.27831	0.516
350 - 400	375	23	4.510	90.784	1691.2	-183.431	151742	2.574	11.608	-0.34046	0.523
400 - 450	425	11	2.157	95.098	916.7	-233.431	117528	2.628	5.669	-0.39482	0.336
450 - 500	475	2	0.392	95.490	186.3	-283.431	31503	2.677	1.050	-0.44312	0.077
>500	500	0	0.000	95.490	0.0	-308.431	0	2.699	0.000	-0.46540	0.000
	Total	510	100.000		19156.9		823038		223.357		4.348

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 191.569 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 91.178

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 171.227 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.620



ผลการวัดการกระจายขนาดของหยดละอองน้ำที่ได้จากหัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ทดลองในโรงโม่หิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

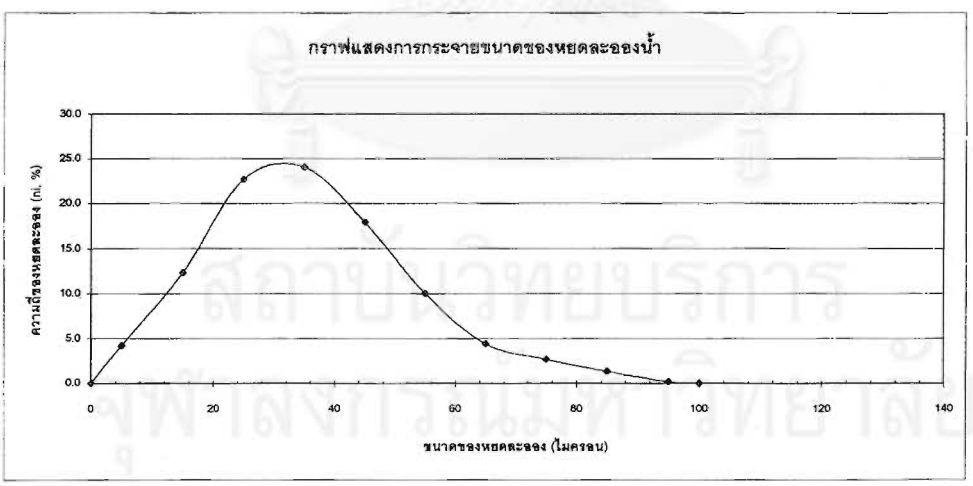
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	35.983	0	0.000	0.000	1.49575	0.000
0 - 10	5	22	4.239	4.239	21.2	30.983	4069	0.699	2.963	0.79678	2.691
10 - 20	15	64	12.331	16.570	185.0	20.983	5429	1.176	14.503	0.31965	1.260
20 - 30	25	118	22.736	39.306	568.4	10.983	2742	1.398	31.784	0.09781	0.217
30 - 40	35	125	24.085	63.391	843.0	0.983	23	1.544	37.189	-0.04832	0.056
40 -50	45	93	17.919	81.310	806.4	-9.017	1457	1.653	29.624	-0.15747	0.444
50 - 60	55	52	10.019	91.329	551.1	-19.017	3624	1.740	17.437	-0.24462	0.600
60 - 70	65	23	4.432	95.761	288.1	-29.017	3731	1.813	8.034	-0.31717	0.446
70 - 80	75	14	2.697	98.459	202.3	-39.017	4107	1.875	5.058	-0.37932	0.388
80 - 90	85	7	1.349	99.807	114.6	-49.017	3241	1.929	2.602	-0.43367	0.254
90 - 100	95	1	0.193	100.000	18.3	-59.017	671	1.978	0.381	-0.48198	0.045
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-64.017	0	2.000	0.000	-0.50425	0.000
	Total	519	100.000		3598.3		29094		149.575		6.401

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 35.983 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1])^{1/2}$ = 17.143

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.314 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.796



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

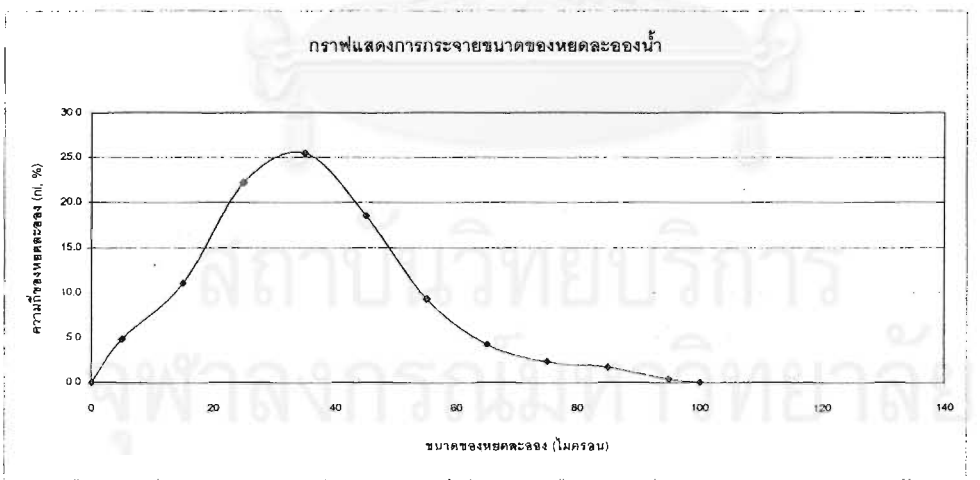
Interval, μm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	36.139	0	0.000	0.000	1.49622	0.000
0 - 10	5	25	4.826	4.826	24.1	31.139	4680	0.699	3.373	0.79725	3.068
10 - 20	15	57	11.004	15.830	165.1	21.139	4917	1.176	12.942	0.32013	1.128
20 - 30	25	115	22.201	38.031	555.0	11.139	2755	1.398	31.035	0.09828	0.214
30 - 40	35	132	25.483	63.514	891.9	1.139	33	1.544	39.347	-0.04785	0.058
40 -50	45	96	18.533	82.046	834.0	-8.861	1455	1.653	30.639	-0.15699	0.457
50 - 60	55	48	9.266	91.313	509.7	-18.861	3296	1.740	16.127	-0.24414	0.552
60 - 70	65	22	4.247	95.560	276.1	-28.861	3538	1.813	7.700	-0.31669	0.426
70 - 80	75	12	2.317	97.876	173.7	-38.861	3498	1.875	4.344	-0.37884	0.332
80 - 90	85	9	1.737	99.614	147.7	-48.861	4148	1.929	3.352	-0.43320	0.326
90 - 100	95	2	0.386	100.000	36.7	-58.861	1338	1.978	0.764	-0.48150	0.090
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-63.861	0	2.000	0.000	-0.50378	0.000
	Total	518	100.000		3613.9		29658		149.622		6.651

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 36.139 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}^{1/2}$ = 17.308

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 31.349 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.816



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

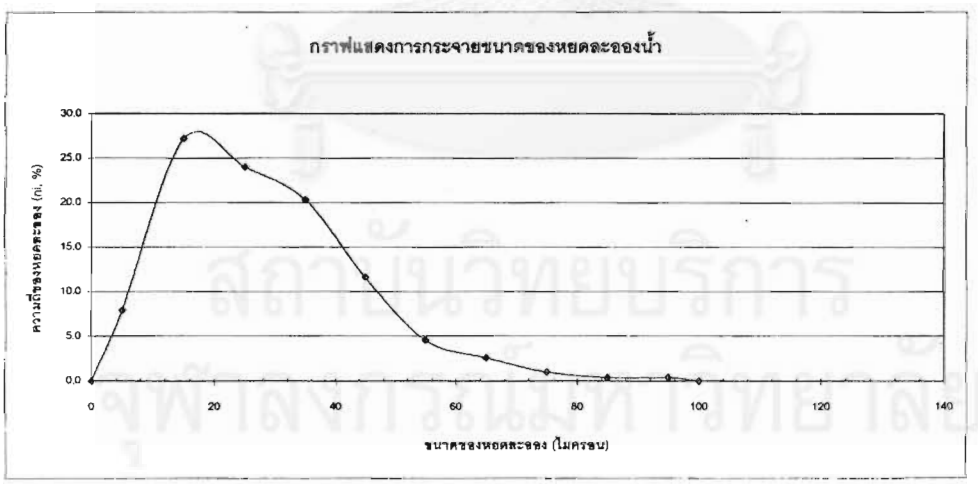
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	28.452	0	0.000	0.000	1.37707	0.000
0 - 10	5	40	7.890	7.890	39.4	23.452	4339	0.699	5.515	0.67810	3.628
10 - 20	15	138	27.219	35.108	408.3	13.452	4925	1.176	32.012	0.20097	1.099
20 - 30	25	122	24.063	59.172	601.6	3.452	287	1.398	33.639	-0.02087	0.010
30 - 40	35	103	20.316	79.487	711.0	-6.548	871	1.544	31.369	-0.16700	0.567
40 -50	45	59	11.637	91.124	523.7	-16.548	3187	1.653	19.239	-0.27615	0.887
50 - 60	55	23	4.536	95.661	249.5	-26.548	3197	1.740	7.895	-0.36330	0.599
60 - 70	65	13	2.564	98.225	166.7	-36.548	3425	1.813	4.648	-0.43585	0.487
70 - 80	75	5	0.986	99.211	74.0	-46.548	2137	1.875	1.849	-0.49800	0.245
80 - 90	85	2	0.394	99.606	33.5	-56.548	1261	1.929	0.761	-0.55235	0.120
90 - 100	95	2	0.394	100.000	37.5	-66.548	1747	1.978	0.780	-0.60066	0.142
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-71.548	0	2.000	0.000	-0.62293	0.000
	Total	507	100.000		2845.2		25377		137.707		7.785

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 28.452 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1))^{1/2}$ = 16.010

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 23.827 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.907



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

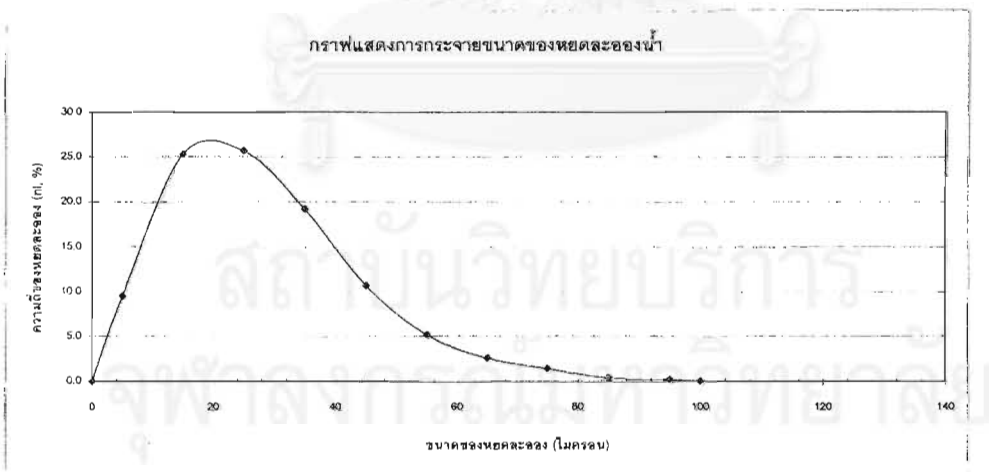
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 0	0	0	0.000	0.000	0.0	28.261	0	0.000	0.000	1.36887	0.000
0 - 10	5	48	9.486	9.486	47.4	23.261	5133	0.699	6.631	0.66990	4.257
10 - 20	15	128	25.296	34.783	379.4	13.261	4448	1.176	29.751	0.19278	0.940
20 - 30	25	130	25.692	60.474	642.3	3.261	273	1.398	35.915	-0.02907	0.022
30 - 40	35	97	19.170	79.644	670.9	-6.739	871	1.544	29.600	-0.17519	0.588
40 -50	45	54	10.672	90.316	480.2	-16.739	2990	1.653	17.643	-0.28434	0.863
50 - 60	55	26	5.138	95.455	282.6	-26.739	3674	1.740	8.943	-0.37149	0.709
60 - 70	65	13	2.569	98.024	167.0	-36.739	3468	1.813	4.658	-0.44404	0.507
70 - 80	75	7	1.383	99.407	103.8	-46.739	3022	1.875	2.594	-0.50619	0.354
80 - 90	85	2	0.395	99.802	33.6	-56.739	1272	1.929	0.763	-0.56055	0.124
90 - 100	95	1	0.198	100.000	18.8	-66.739	880	1.978	0.391	-0.60885	0.073
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-71.739	0	2.000	0.000	-0.63113	0.000
	Total	506	100.000		2826.1		26032		136.887		8.438

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 28.261 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.216

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 23.382 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.959



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

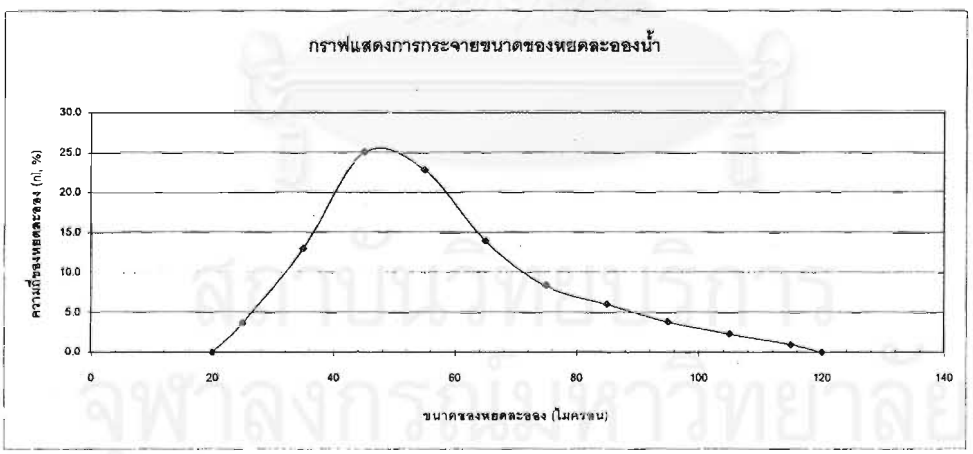
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	36.957	0	1.301	0.000	0.43099	0.000
20 - 30	25	19	3.682	3.682	92.1	31.957	3761	1.398	5.147	0.33408	0.411
30 - 40	35	67	12.984	16.667	454.5	21.957	6260	1.544	20.049	0.18795	0.459
40 -50	45	129	25.000	41.667	1125.0	11.957	3574	1.653	41.330	0.07881	0.155
50 - 60	55	118	22.868	64.535	1257.8	1.957	88	1.740	39.799	-0.00834	0.002
60 - 70	65	72	13.953	78.488	907.0	-8.043	903	1.813	25.296	-0.08089	0.091
70 - 80	75	43	8.333	86.822	625.0	-18.043	2713	1.875	15.626	-0.14304	0.171
80 - 90	85	31	6.008	92.829	510.7	-28.043	4724	1.929	11.591	-0.19740	0.234
90 - 100	95	20	3.876	96.705	368.2	-38.043	5609	1.978	7.666	-0.24570	0.234
100 - 110	105	12	2.326	99.031	244.2	-48.043	5368	2.021	4.700	-0.28917	0.194
110 -120	115	5	0.969	100.000	111.4	-58.043	3264	2.061	1.997	-0.32868	0.105
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-63.043	0	2.079	0.000	-0.34716	0.000
	Total	516	100.000		5695.7		36264		173.202		2.056

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 56.957 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 19.139

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 53.954 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.393



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด : 1

ความถี่ของหัวฉีด : 33.30 กิโลเฮิร์ซ

อัตราการไหลของของเหลว : 1380 มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)

ของเหลวที่ใช้ : น้ำ

ความดันของอากาศ : 2.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ครั้งที่ทำการวัด : 2

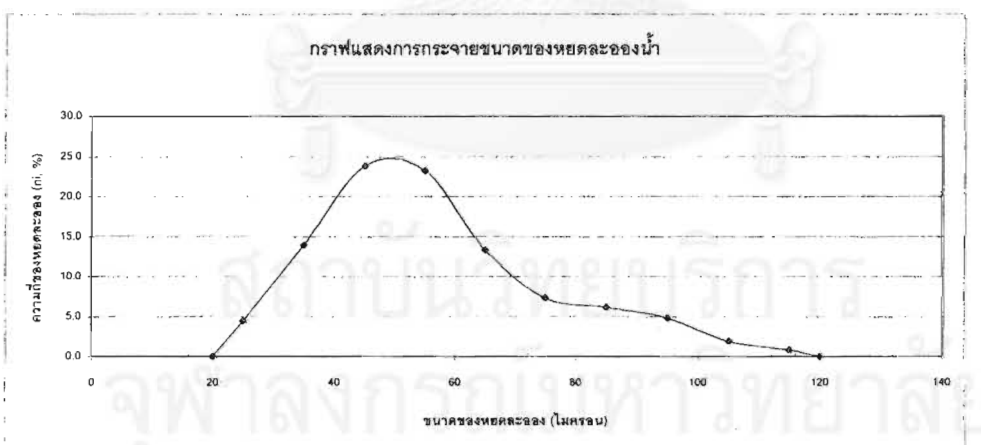
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	36.531	0	1.301	0.000	0.42668	0.000
20 - 30	25	23	4.457	4.457	111.4	31.531	4432	1.398	6.231	0.32977	0.485
30 - 40	35	72	13.953	18.411	488.4	21.531	6469	1.544	21.545	0.18364	0.471
40 -50	45	123	23.837	42.248	1072.7	11.531	3169	1.653	39.408	0.07449	0.132
50 - 60	55	120	23.256	65.504	1279.1	1.531	55	1.740	40.474	-0.01266	0.004
60 - 70	65	69	13.372	78.876	869.2	-8.469	959	1.813	24.242	-0.08521	0.097
70 - 80	75	38	7.364	86.240	552.3	-18.469	2512	1.875	13.809	-0.14735	0.160
80 - 90	85	32	6.202	92.442	527.1	-28.469	5026	1.929	11.965	-0.20171	0.252
90 - 100	95	25	4.845	97.287	460.3	-38.469	7170	1.978	9.582	-0.25002	0.303
100 - 110	105	10	1.938	99.225	203.5	-48.469	4553	2.021	3.917	-0.29348	0.167
110 -120	115	4	0.775	100.000	89.1	-58.469	2650	2.061	1.597	-0.33299	0.086
> 120	120	0	0.000	100.000	0.0	-63.469	0	2.079	0.000	-0.35147	0.000
	Total	516	100.000		5653.1		36994		172.771		2.156

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 56.531 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 19.331

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 53.420 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.405



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

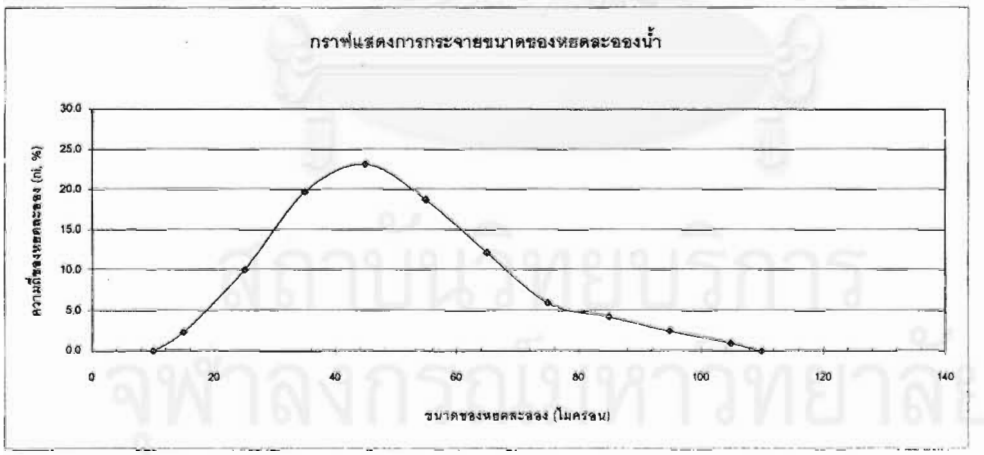
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	39.971	0	1.000	0.000	0.66752	0.000
10 - 20	15	12	2.321	2.321	34.8	34.971	2839	1.176	2.730	0.49142	0.561
20 - 30	25	52	10.058	12.379	251.5	24.971	6272	1.398	14.061	0.26958	0.731
30 - 40	35	102	19.729	32.108	690.5	14.971	4422	1.544	30.463	0.12345	0.301
40 -50	45	120	23.211	55.319	1044.5	4.971	574	1.653	38.372	0.01430	0.005
50 - 60	55	97	18.762	74.081	1031.9	-5.029	475	1.740	32.653	-0.07285	0.100
60 - 70	65	63	12.186	86.267	792.1	-15.029	2752	1.813	22.092	-0.14540	0.258
70 - 80	75	31	5.996	92.263	449.7	-25.029	3756	1.875	11.243	-0.20755	0.258
80 - 90	85	22	4.255	96.518	361.7	-35.029	5221	1.929	8.210	-0.26190	0.292
90 - 100	95	13	2.515	99.033	238.9	-45.029	5098	1.978	4.973	-0.31021	0.242
100 - 110	105	5	0.967	100.000	101.5	-55.029	2929	2.021	1.955	-0.35367	0.121
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-60.029	0	2.041	0.000	-0.37388	0.000
	Total	517	100.000		4997.1		34337		166.752		2.867

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 49.971 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.624

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 46.507 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.480



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	1	
ความถี่ของหัวฉีด	:	33.30	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

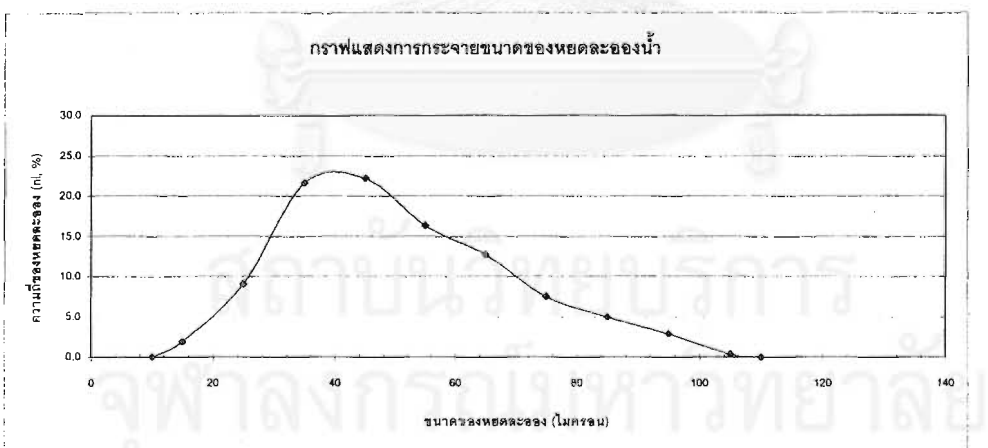
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	40.590	0	1.000	0.000	0.67331	0.000
10 - 20	15	10	1.934	1.934	29.0	35.590	2450	1.176	2.275	0.49722	0.478
20 - 30	25	47	9.091	11.025	227.3	25.590	5953	1.398	12.709	0.27537	0.689
30 - 40	35	112	21.663	32.689	758.2	15.590	5265	1.544	33.450	0.12924	0.362
40 -50	45	115	22.244	54.932	1001.0	5.590	695	1.653	36.774	0.02010	0.009
50 - 60	55	85	16.441	71.373	904.3	-4.410	320	1.740	28.613	-0.06705	0.074
60 - 70	65	66	12.766	84.139	829.8	-14.410	2651	1.813	23.144	-0.13960	0.249
70 - 80	75	39	7.544	91.683	565.8	-24.410	4495	1.875	14.145	-0.20175	0.307
80 - 90	85	26	5.029	96.712	427.5	-34.410	5955	1.929	9.703	-0.25611	0.330
90 - 100	95	15	2.901	99.613	275.6	-44.410	5722	1.978	5.738	-0.30441	0.269
100 - 110	105	2	0.387	100.000	40.6	-54.410	1145	2.021	0.782	-0.34788	0.047
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-59.410	0	2.041	0.000	-0.36808	0.000
	Total	517	100.000		5059.0		34651		167.331		2.814

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 50.590 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.709

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 47.132 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.474



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

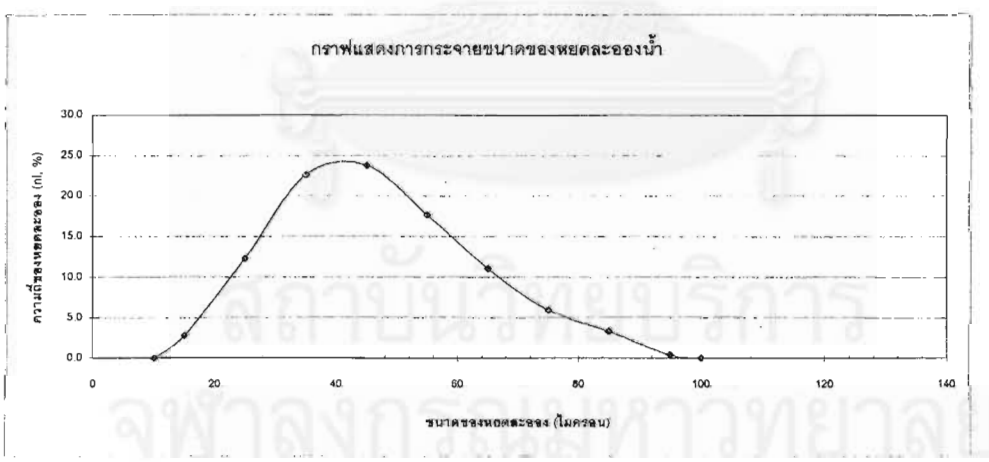
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	36.766	0	1.000	0.000	0.64081	0.000
10 - 20	15	14	2.778	2.778	41.7	31.766	2803	1.176	3.267	0.46472	0.600
20 - 30	25	62	12.302	15.079	307.5	21.766	5028	1.398	17.197	0.24287	0.726
30 - 40	35	114	22.619	37.698	791.7	11.766	3131	1.544	34.925	0.09674	0.212
40 -50	45	120	23.810	61.508	1071.4	1.766	74	1.653	39.362	-0.01240	0.004
50 - 60	55	89	17.659	79.167	971.2	-8.234	1197	1.740	30.733	-0.09955	0.175
60 - 70	65	56	11.111	90.278	722.2	-18.234	3694	1.813	20.143	-0.17210	0.329
70 - 80	75	30	5.952	96.230	446.4	-28.234	4745	1.875	11.161	-0.23425	0.327
80 - 90	85	17	3.373	99.603	286.7	-38.234	4931	1.929	6.508	-0.28861	0.281
90 - 100	95	2	0.397	100.000	37.7	-48.234	923	1.978	0.785	-0.33691	0.045
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-53.234	0	2.000	0.000	-0.35919	0.000
	Total	504	100.000		4676.6		27327		164.081		2.698

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 46.766 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.614

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 43.733 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.462



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

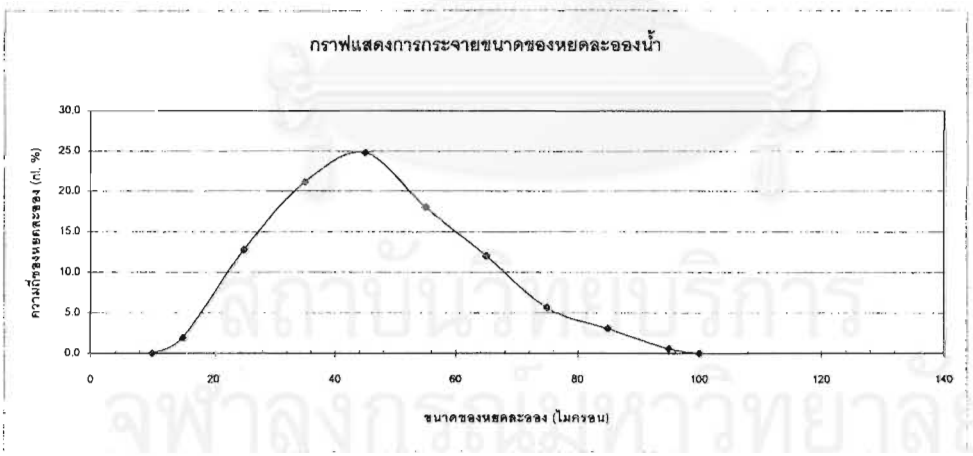
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	37.171	0	1.000	0.000	0.64607	0.000
10 - 20	15	10	1.938	1.938	29.1	32.171	2006	1.176	2.279	0.46998	0.428
20 - 30	25	66	12.791	14.729	319.8	22.171	6287	1.398	17.881	0.24813	0.788
30 - 40	35	109	21.124	35.853	739.3	12.171	3129	1.544	32.617	0.10201	0.220
40 - 50	45	128	24.806	60.659	1116.3	2.171	117	1.653	41.010	-0.00714	0.001
50 - 60	55	93	18.023	78.682	991.3	-7.829	1105	1.740	31.367	-0.09429	0.160
60 - 70	65	62	12.016	90.698	781.0	-17.829	3820	1.813	21.783	-0.16684	0.334
70 - 80	75	29	5.620	96.318	421.5	-27.829	4353	1.875	10.538	-0.22899	0.295
80 - 90	85	16	3.101	99.419	263.6	-37.829	4437	1.929	5.983	-0.28334	0.249
90 - 100	95	3	0.581	100.000	55.2	-47.829	1330	1.978	1.150	-0.33165	0.064
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-52.829	0	2.000	0.000	-0.35393	0.000
	Total	516	100.000		4717.1		26583		164.607		2.539

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 47.171 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 16.386

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 44.266 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.446



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

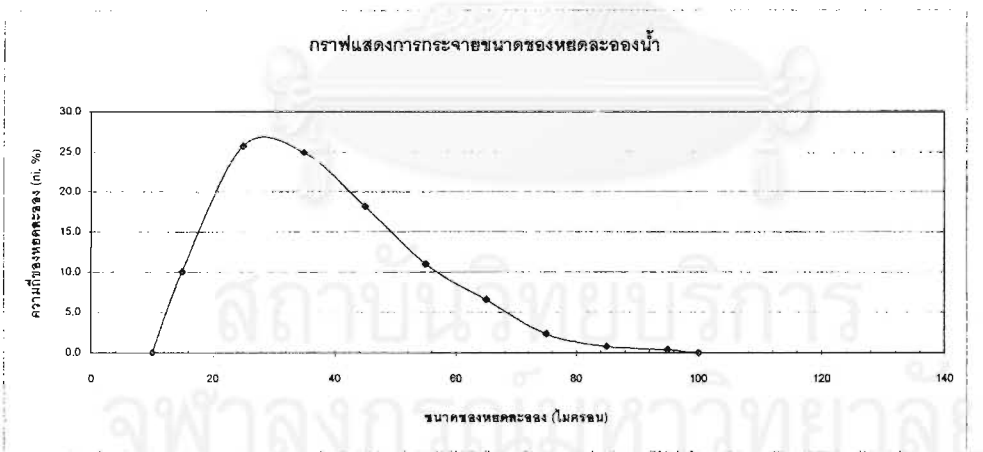
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	27.959	0	1.000	0.000	0.54097	0.000
10 - 20	15	52	10.058	10.058	150.9	22.959	5302	1.176	11.929	0.36488	1.339
20 - 30	25	133	25.725	35.783	643.1	12.959	4320	1.398	35.962	0.14303	0.526
30 - 40	35	129	24.952	60.735	873.3	2.959	219	1.544	38.527	-0.00309	0.000
40 -50	45	94	18.182	78.917	818.2	-7.041	901	1.653	30.058	-0.11224	0.229
50 60	55	57	11.025	89.942	606.4	-17.041	3202	1.740	19.188	-0.19939	0.438
60 - 70	65	34	6.576	96.518	427.5	-27.041	4809	1.813	11.922	-0.27194	0.486
70 - 80	75	12	2.321	98.839	174.1	-37.041	3185	1.875	4.352	-0.33409	0.259
80 - 90	85	4	0.774	99.613	65.8	-47.041	1712	1.929	1.493	-0.38845	0.117
90 100	95	2	0.387	100.000	36.8	-57.041	1259	1.978	0.765	-0.43675	0.074
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-62.041	0	2.000	0.000	-0.45903	0.000
	Total	517	100.000		3795.9		24908		154.097		3.469

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 37.959 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.862

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 34.751 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.539



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	510	มิลลิลิตรต่อนาที (8,500 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

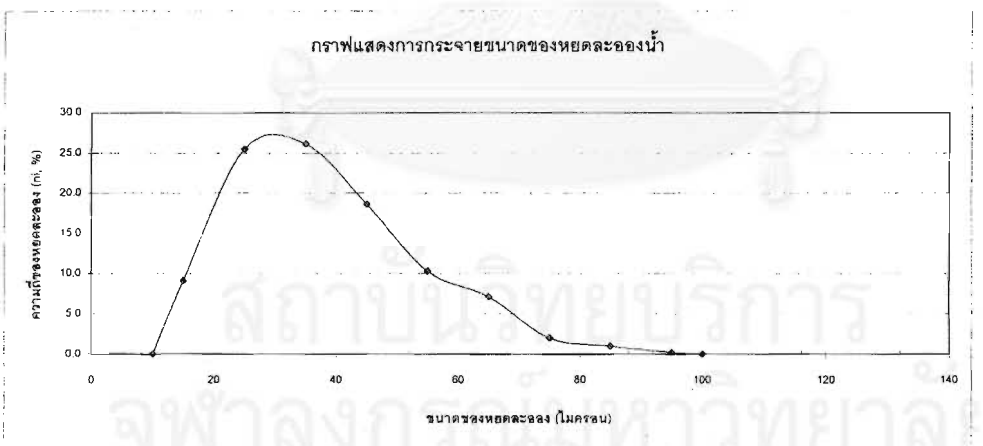
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	28.089	0	1.000	0.000	0.54414	0.000
10 - 20	15	46	9.109	9.109	136.6	23.089	4856	1.176	10.713	0.36805	1.234
20 - 30	25	129	25.545	34.653	638.6	13.089	4376	1.398	35.711	0.14520	0.546
30 - 40	35	132	26.139	60.792	914.9	3.089	249	1.544	40.360	0.00008	0.000
40 - 50	45	94	18.614	79.406	837.6	-6.911	889	1.653	30.773	-0.10907	0.221
50 - 60	55	52	10.297	89.703	566.3	-16.911	2945	1.740	17.921	-0.19622	0.396
60 - 70	65	36	7.129	96.832	463.4	-26.911	5163	1.813	12.924	-0.26877	0.515
70 - 80	75	10	1.980	98.812	148.5	-36.911	2698	1.875	3.713	-0.33092	0.217
80 - 90	85	5	0.990	99.802	84.2	-46.911	2179	1.929	1.910	-0.38528	0.147
90 - 100	95	1	0.198	100.000	18.8	-56.911	641	1.978	0.392	-0.43358	0.037
> 100	100	0	0.000	100.000	0.0	-61.911	0	2.000	0.000	-0.45586	0.000
	Total	505	100.000		3808.9		23996		154.414		3.314

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 38.089 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 15.569

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 35.006 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.524



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

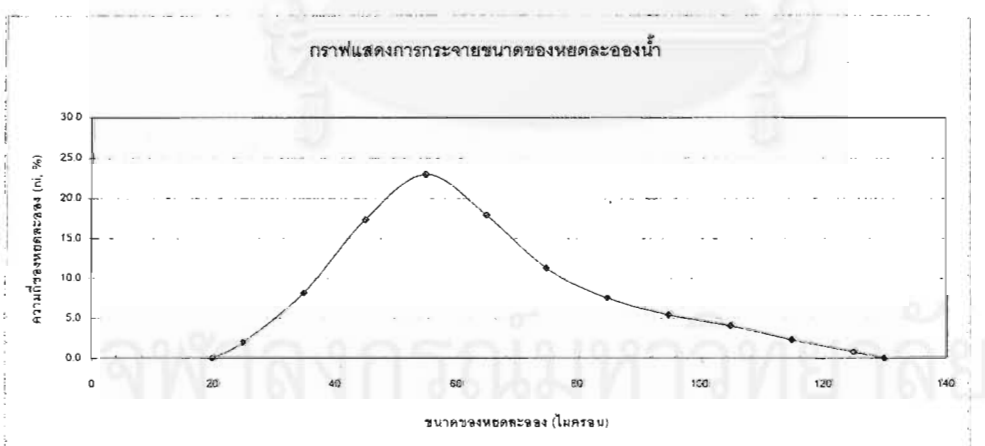
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	43.558	0	1.301	0.000	0.47880	0.000
20 - 30	25	10	1.949	1.927	48.7	38.558	2898	1.398	2.725	0.38189	0.284
30 - 40	35	42	8.187	10.114	286.5	28.558	6677	1.544	12.641	0.23577	0.455
40 - 50	45	89	17.349	27.463	780.7	18.558	5975	1.653	28.681	0.12662	0.278
50 - 60	55	118	23.002	50.465	1265.1	8.558	1684	1.740	40.032	0.03947	0.036
60 - 70	65	92	17.934	68.399	1165.7	-1.442	37	1.813	32.512	-0.03308	0.020
70 - 80	75	58	11.306	79.705	848.0	-11.442	1480	1.875	21.200	-0.09523	0.103
80 - 90	85	39	7.602	87.307	646.2	-21.442	3495	1.929	14.668	-0.14958	0.170
90 - 100	95	28	5.458	92.765	518.5	-31.442	5396	1.978	10.795	-0.19789	0.214
100 - 110	105	21	4.094	96.859	429.8	-41.442	7031	2.021	8.274	-0.24135	0.238
110 - 120	115	12	2.339	99.198	269.0	-51.442	6190	2.061	4.820	-0.28086	0.185
120 - 130	125	4	0.780	99.977	97.5	-61.442	2944	2.097	1.635	-0.31708	0.078
> 130	130	0	0.000	100.000	0.0	-66.442	0	2.114	0.000	-0.33411	0.000
	Total	513	100.000		6355.8		43808		177.983		2.061

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 63.558 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1)]\}^{1/2}$ = 21.036

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 60.233 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.394



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23.000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	2.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

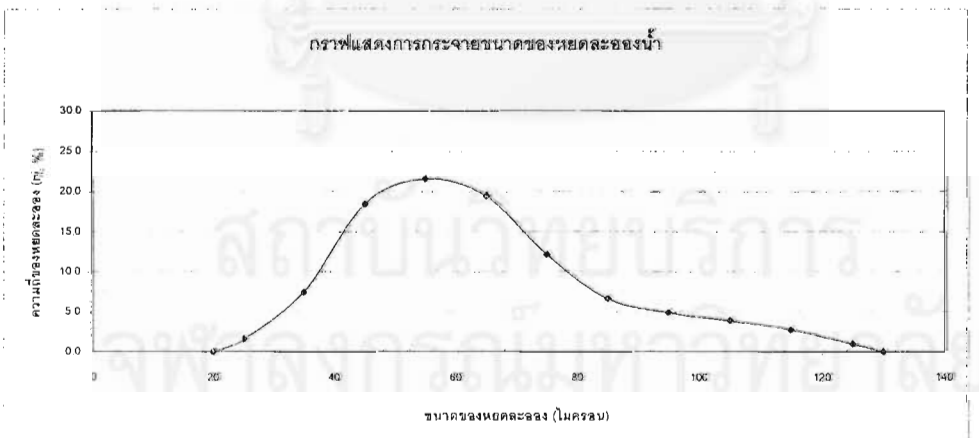
Interval,μm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 20	20	0	0.000	0.000	0.0	43.841	0	1.301	0.000	0.48135	0.000
20 - 30	25	8	1.572	1.556	39.3	38.841	2371	1.398	2.197	0.38444	0.232
30 - 40	35	38	7.466	9.022	261.3	28.841	6210	1.544	11.527	0.23832	0.424
40 - 50	45	94	18.468	27.490	831.0	18.841	6556	1.653	30.531	0.12917	0.308
50 - 60	55	110	21.611	49.101	1188.6	8.841	1689	1.740	37.611	0.04202	0.038
60 - 70	65	99	19.450	68.551	1264.2	-1.159	26	1.813	35.261	-0.03053	0.018
70 - 80	75	62	12.181	80.731	913.6	-11.159	1517	1.875	22.840	-0.09268	0.105
80 - 90	85	34	6.680	87.411	567.8	-21.159	2991	1.929	12.888	-0.14703	0.144
90 - 100	95	25	4.912	92.323	466.6	-31.159	4769	1.978	9.714	-0.19534	0.187
100 - 110	105	20	3.929	96.252	412.6	-41.159	6656	2.021	7.942	-0.23880	0.224
110 - 120	115	14	2.750	99.002	316.3	-51.159	7199	2.061	5.668	-0.27831	0.213
120 - 130	125	5	0.982	99.985	122.8	-61.159	3674	2.097	2.060	-0.31453	0.097
> 130	130	0	0.000	100.000	0.0	-66.159	0	2.114	0.000	-0.33156	0.000
	Total	509	100.000		6384.1		43657		179.238		1.991

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 63.841 ไมครอน

standard deviation σ = $(\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))^{1/2}$ = 21.009

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 60.588 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1))$ = 1.386



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	1	

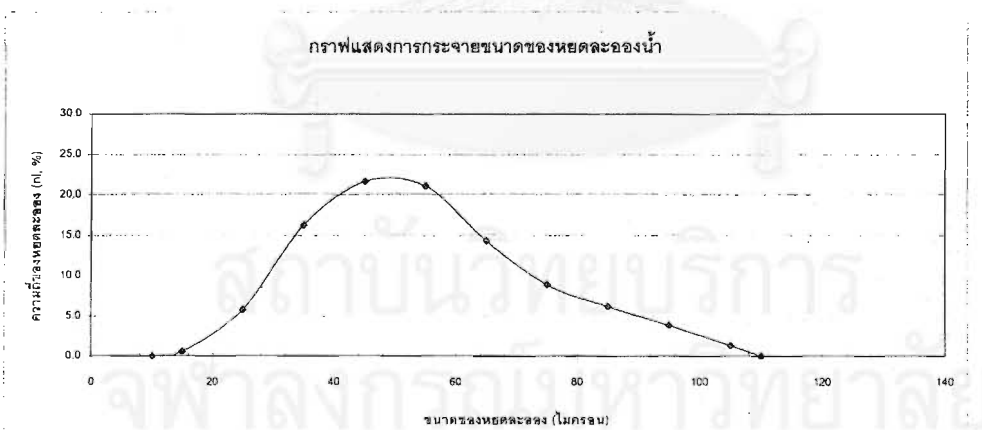
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	log d_i	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	44.903	0	1.000	0.000	0.71350	0.000
10 - 20	15	3	0.580	0.580	8.7	39.903	924	1.176	0.682	0.53741	0.168
20 - 30	25	30	5.803	6.383	145.1	29.903	5189	1.398	8.112	0.31556	0.578
30 - 40	35	84	16.248	22.631	568.7	19.903	6436	1.544	25.087	0.16943	0.466
40 -50	45	112	21.663	44.294	974.9	9.903	2125	1.653	35.814	0.06029	0.079
50 - 60	55	109	21.083	65.377	1159.6	-0.097	0	1.740	36.692	-0.02686	0.015
60 - 70	65	74	14.313	79.691	930.4	-10.097	1459	1.813	25.949	-0.09941	0.141
70 - 80	75	46	8.897	88.588	667.3	-20.097	3593	1.875	16.683	-0.16156	0.232
80 - 90	85	32	6.190	94.778	526.1	-30.097	5607	1.929	11.942	-0.21592	0.289
90 - 100	95	20	3.868	98.646	367.5	-40.097	6220	1.978	7.651	-0.26422	0.270
100 - 110	105	7	1.354	100.000	142.2	-50.097	3398	2.021	2.737	-0.30769	0.128
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-55.097	0	2.041	0.000	-0.32789	0.000
	Total	517	100.000		5490.3		34951		171.350		2.366

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d_i / \Sigma n_i$ = 54.903 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / [(\Sigma n_i) - 1]\}^{1/2}$ = 18.789

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d_i / \Sigma n_i)$ = 51.701 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.428



ชนิดหัวฉีด : หัวฉีดคลื่นเหนือเสียงชนิดที่ใช้เรโซเนเตอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

หมายเลขของหัวฉีด	:	9	
ความถี่ของหัวฉีด	:	17.10	กิโลเฮิร์ซ
อัตราการไหลของของเหลว	:	1380	มิลลิลิตรต่อนาที (23,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที)
ของเหลวที่ใช้	:	น้ำ	
ความดันของอากาศ	:	3.0	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ครั้งที่ทำการวัด	:	2	

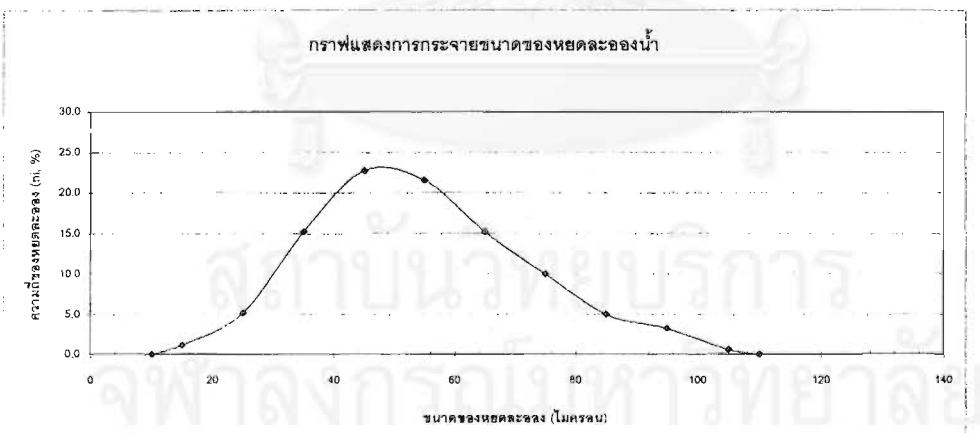
Interval,µm	Midpoint d_i	จำนวน (n_i)	n_i	% Cumulative	$d_i \times n_i$	$d_{mean} - d_i$	$(d_{mean} - d_i)^2 \times n_i$	$\log d_i$	$n_i \log d_i$	$\log d_{mean} - \log d_i$	$(\log d_{mean} - \log d_i)^2 \times n_i$
< 10	10	0	0.000	0.000	0.0	44.287	0	1.000	0.000	0.70974	0.000
10 - 20	15	6	1.156	1.156	17.3	39.287	1784	1.176	1.360	0.53365	0.329
20 - 30	25	27	5.202	6.358	130.1	29.287	4462	1.398	7.273	0.31180	0.506
30 - 40	35	79	15.222	21.580	532.8	19.287	5662	1.544	23.503	0.16567	0.418
40 -50	45	118	22.736	44.316	1023.1	9.287	1961	1.653	37.587	0.05653	0.073
50 - 60	55	112	21.580	65.896	1186.9	-0.713	11	1.740	37.557	-0.03062	0.020
60 - 70	65	79	15.222	81.118	989.4	-10.713	1747	1.813	27.595	-0.10317	0.162
70 - 80	75	52	10.019	91.137	751.4	-20.713	4299	1.875	18.787	-0.16532	0.274
80 - 90	85	26	5.010	96.146	425.8	-30.713	4726	1.929	9.666	-0.21968	0.242
90 - 100	95	17	3.276	99.422	311.2	-40.713	5429	1.978	6.478	-0.26798	0.235
100 - 110	105	3	0.578	100.000	60.7	-50.713	1487	2.021	1.168	-0.31145	0.056
> 110	110	0	0.000	100.000	0.0	-55.713	0	2.041	0.000	-0.33165	0.000
	Total	519	100.000		5428.7		31568		170.974		2.315

Arithmetic mean (d_{mean}) = $\Sigma n_i d / \Sigma n_i$ = 54.287 ไมครอน

standard deviation σ = $\{\Sigma n_i (d_{mean} - d_i)^2 / ((\Sigma n_i) - 1)\}^{1/2}$ = 17.857

geometric mean(d_g) = $\log^{-1}(\Sigma n_i \log d / \Sigma n_i)$ = 51.255 ไมครอน

gemetric standard deviation σ_g = $\log^{-1}\{\Sigma n_i (\log d_g - \log d_i)^2 / (\Sigma n_i - 1)\}$ = 1.422



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสาวิตรี แสงแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2519 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกกรมเคมี คณะวิศวกกรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย