

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอนและการ  
คำนวณประสิทธิภาพของไซโคลน



นางสาวกมลรัช เจิมศิริศักดิ์พงษ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4193-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION TYPE PARTICLE SIZE ANALYSIS  
AND CYCLONE EFFICIENCY CALCULATION



Ms. Kamarat Jermisirisakpong

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 2003

ISBN 974-17-4193-6



กรมฯ เจิมศิริศักดิ์พงษ์ : การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอนและการคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลน (COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION TYPE PARTICLE SIZE ANALYSIS AND CYCLONE EFFICIENCY CALCULATION) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล 273 หน้า. ISBN 974-17-4193-6

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและทดสอบใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคและการทำนายประสิทธิภาพของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสทั้งที่ไม่มีและมีการเป่าลง (blowdown cyclone)

Yoshida และคณะ (2541) ได้นำวิธี Twomey's nonlinear iteration มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคจากข้อมูลของกราฟการตกตะกอนที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน ซึ่งพบว่าโปรแกรมสามารถคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคได้อย่างถูกต้อง พีระพัฒน์ กฤตานุสรณ์ (2542) ได้ประดิษฐ์เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการการตกตะกอนเช่นเดียวกับเครื่องวิเคราะห์ของ Yoshiada อนึ่ง เครื่องวิเคราะห์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ประกอบด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม SEDI-2Mc ซึ่งวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยวิธี Twomey's nonlinear iteration และโปรแกรม AUTOCAL-JIS ที่วิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น อย่างไรก็ตามพบว่า ความชันของชุดข้อมูล (อัตราการเปลี่ยนน้ำหนักที่ตกตะกอนต่อเวลา) ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS บางครั้งมีค่าไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับเรียบความชันของชุดข้อมูลโดยการอาศัยการสร้างสมการถดถอยชนิดพหุนามอันดับสาม จากผลการศึกษาพบว่า วิธีการปรับปรุนี้ทำให้ได้ค่าความชันของชุดข้อมูลที่ต่อเนื่องขึ้นและได้ลักษณะฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ราบเรียบขึ้นซึ่งเหมาะกับระบบที่การกระจายขนาดของอนุภาคเป็นแบบฐานนิยมนิยมเดียว

สมการสำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนมีผู้เสนอไว้หลายสมการ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนทั้งแบบที่มีและไม่มีการเป่าลงซึ่งอาศัยชุดสมการอนุพันธ์ (Ordinary differential equation) คู่มวลสาร โดยการปรับปรุงโมเดลของ Mothes and Loffler จากผลการศึกษาพบว่า โปรแกรมสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของการทดลองได้ค่อนข้างดีแต่ยังได้ต่ำกว่าผลการทดลองในช่วงที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 6 ไมครอน เนื่องจากไม่ได้พิจารณาผลของการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) ของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งมีแนวโน้มเกาะตัวกันได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อมีความเข้มข้นฝุ่นสูงๆ งานวิจัยนี้ได้สร้างสหสัมพันธ์จากผลการทดลอง เพื่อประเมินค่าตัวชดเชยผลของการรวมตัวดังกล่าว ผลก็คือสามารถทำนายประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนทั้งแบบที่มีและไม่มีการเป่าลงได้ดีโดยมีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 5\%$

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา...2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4370204621 :MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: PARTICLE SIZE DISTRIBUTION / LIQUID-PHASE SEDIMENTATION METHOD / CUBIC REGRESSION / TANGENTIAL - INLET CYCLONE / BLOWDOWN CYCLONE.

KAMARAT JERMSIRISAKPONG: COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT FOR SEDIMENTATION TYPE PARTICLE SIZE ANALYSIS AND CYCLONE EFFICIENCY CALCULATION. THESIS ADVISOR: PROF.WIWUT TANTHAPANICHAKOON,Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC.PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL, D.ENG., 273 pp. ISBN 974-17-4193-6.

In this thesis, a computer program for sedimentation type particle size analysis and a computer program for calculating the efficiency of tangential-inlet cyclone with and without blowdown flow have been developed and tested.

Yoshida et al. (2001) applied Twomey's nonlinear iteration method to retrieve a particle size distribution from the sedimentation curve measured with a sedimentation balance method. It was found that the program could calculate the particle size distribution accurately. Peerapat Kritanusorn (2002) developed an instrument for analyzing the particle size distribution using liquid-phase sedimentation method which was similar to Yoshida's. The instrument employed 2 programs ; Program SEDI-2Me using Twomey's nonlinear iteration method and Program AUTOCAL-JIS using the standard method decreed by the Japanese Industrial Standard. However the calculated slope of its tangential line (time rate of change of the sedimented mass) ,which is calculated from Program AUTOCAL-JIS, is sometimes discontinuous. Hence, the author is interested in smoothing the slope data by employing the cubic regression. As a result, the calculated slope and the relative size distribution of particles are more smooth, making the improved Program AUTOCAL-JIS highly suitable for unimodal particle size distributions.

At present, there are many mathematical models for predicting the cyclone grade efficiency. The author wants to develop a computer program to predict the grade efficiency of the tangential-inlet air cyclone with and without blowdown flow using the ordinary differential equations for mass balance to improve the Mothes and Loffler's model. It is found that, the predictions are quite accurate but tend to underestimate the grade efficiency for particles smaller than 6 micrometers because the model neglects the effect of agglomeration of fine particles, especially at high dust loading. Therefore, the author develops empirical correlations to include this effect. It is shown that the program can accurately predict the grade efficiency of a cyclone with and without a blowdown flow. The errors are within  $\pm 5\%$  .

Department .....Chemical.Engineering.. Student's signature .....  
 Field of study ....Chemical.Engineering... Advisor's signature .....  
 Academic year .....2003.....Co-advisor 's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะความรู้ความเข้าใจต่างๆ มากมายตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ Prof.Dr. Hideto Yoshida แห่งมหาวิทยาลัยอิโรชิมา ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคและการคำนวณค่าประสิทธิภาพของไซโคลน

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ประธานกรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก วาณิชศรี สำหรับความช่วยเหลือตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ , ทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย และทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณบริษัท National Strach and Chemical (Thailand) จำกัด, บริษัทปูนคุณภาพ จำกัด, บริษัท Dupont (Thailand) จำกัด และบริษัทเคเอ็มแอนด์เอเอ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม

ขอกราบขอบพระคุณหัวหน้าห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค Beckman Coulter LS 230 และกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัดการกระจายขนาดของอนุภาคในอัตราค่าบริการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณทีมคณาจารย์นักวิจัย และห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุ ที่ได้ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้าศึกษา และทำงานวิจัย รวมทั้งช่วยเหลือจัดหาเงินทุนสำหรับการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการทำงาน รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าต่อไปในอนาคต และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุ และกลุ่มวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ได้คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ตลอดเวลาสี่ปีที่ศึกษาอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่มีความเข้าใจ ให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณ ก้าก้วย เปี้ยกและ จู๊บ ที่ให้กำลังใจ คำแนะนำและความช่วยเหลืออยู่ตลอดเวลา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญรูป .....	ณ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 วัตถุประสงค์ .....	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย .....	6
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
<b>ส่วนที่ 1 : การปรับเทียบค่าความชันของชุดข้อมูลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค</b>	
2. ความรู้เบื้องต้น .....	8
2.1 คำศัพท์และความหมาย .....	8
2.2 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีการตกตะกอน .....	10
2.2.1 สมการของสโตกส์ .....	10
2.2.2 หลักการและวิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีการตกตะกอน .....	14
2.2.3 การตกตะกอนแบบสะสมภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก .....	19
2.2.4 การคำนวณและการแสดงค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปของกราฟ .....	21
2.2.4.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาค .....	22
2.2.4.2 การแสดงค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปของกราฟ .....	24
2.3 ความรู้พื้นฐานของการคำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน .....	26
2.3.1 ชนิดของไซโคลน .....	27
2.3.2 ลักษณะการไหลในไซโคลน .....	27
2.4 ประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน .....	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30

## สารบัญญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3. การปรับเทียบค่าความชื้นของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS .....	37
3.1 การสร้างเส้นสัมผัส .....	38
3.1.2 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง .....	38
3.1.3 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสาม .....	40
3.1.4 การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง .....	42
3.2 การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค .....	43
3.2.1 สมการคำนวณขนาดอนุภาคใหญ่สุด .....	43
3.2.2 สมการคำนวณขนาดอนุภาคเล็กสุด .....	45
3.2.3 สมการคำนวณหาขนาดของอนุภาคที่ %oversize ที่กำหนด .....	45
3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม .....	47
3.3.1 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input operation) .....	47
3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล .....	49
3.3.3 ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล (Output operation) .....	52
4. วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	54
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	54
4.1.1 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค .....	54
4.1.2 เครื่อง Homogenizer .....	54
4.1.3 เครื่องผสมรูปตัววี .....	54
4.1.4 เครื่องผสมรูปตัววีชนิดโปร่งใส .....	54
4.2 สภาพที่ใช้ในการทดลอง .....	58
4.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาด .....	58
4.2.2 การเตรียมสารแขวนลอย .....	63
4.2.3 การทำให้อนุภาคกระจายตัวในตัวกลาง .....	64
4.2.4 การคำนวณน้ำหนักของอนุภาคในส่วนที่ไม่ตกตะกอน .....	64
4.2.4.1 การคำนวณสำหรับกรณีที่ทราบค่าน้ำหนักของอนุภาคตัวอย่างเริ่มต้น .....	64
4.2.4.2 การคำนวณสำหรับกรณีที่ไมทราบค่าน้ำหนักของอนุภาคตัวอย่างเริ่มต้น .....	65



สารบัญ (ต่อ)		ฉ
บทที่		หน้า
	4.2.5 สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง .....	65
	4.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	66
5.	ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ปรับเทียบค่าความชื้นของชุดข้อมูล .....	68
	5.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ .....	68
	5.2 สารช่วยในการกระจายตัว .....	71
	5.3 ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม .....	72
	5.3.1 ลักษณะของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง .....	72
	5.3.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการปรับเทียบเส้น ความชื้นกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง และค่าการกระจายขนาดของ อนุภาคที่คำนวณด้วยโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรม SEDI-2Me .....	78
	5.3.2.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะ การกระจายขนาดแบบแคบ .....	80
	5.3.2.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะ การกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ .....	103
	5.3.2.3 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะ การกระจายขนาดแบบช่วงกว้าง .....	126
	5.3.3 เปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการปรับ เทียบเส้น ความชื้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้หลักการเดียวกัน ...	135
6.	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคในภาคอุตสาหกรรม .....	144
	6.1 อนุภาคในภาคอุตสาหกรรม .....	144
	6.2 สารช่วยในการกระจายตัว .....	148
	6.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ .....	149
	6.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการโปรแกรม ประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 เปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดที่คำนวณได้จาก โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, โปรแกรมวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่อาศัยหลักการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลาง Det- Ferret และค่าการกระจายขนาดที่ได้จากเครื่องมือที่ใช้ เทคนิคกระเจิงแสง (Laser diffraction) .....	150

บทที่	หน้า
6.4.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A.	154
6.4.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T.....	163
6.4.3 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตตัวอย่างที่ 1.....	172
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	180
7.1 สรุปผลการวิจัย .....	180
7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม .....	184
<b>ส่วนที่ II :โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน</b>	
8. โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน .....	185
8.1 การทำนายค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นด้วยโมเดลของ Mothes และ Loffler	185
8.1.1 ลักษณะโมเดล .....	185
8.1.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของไหล (fluid – mechanical parameters) ...	186
8.1.3 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคภายในไซโคลน .....	192
8.1.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมของ Mothes และ Loffler กับข้อมูล การทดลอง .....	193
8.1.5 จุดอ่อนของโมเดลของ Mothes และ Loffler .....	194
8.2 โปรแกรมการทำนายค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าไป แนวสัมผัสชนิดมีและไม่มีลมเป่าลง (blowdown) .....	195
8.2.1 สมมติฐานของโมเดล .....	195
8.2.2 การคำนวณค่า fluid – mechanical parameters .....	195
8.2.3 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคภายในไซโคลน .....	196
8.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม .....	198
9. ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน .....	200
9.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ .....	200
9.2 การเลือกค่าปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านบริเวณที่ 2 และ 4 ที่เหมาะสม .....	205
9.3..การเลือกจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมในการคำนวณ .....	206
9.4 อิทธิพลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันต่อค่าประสิทธิภาพย่อย .....	219
9.5 อิทธิพลของความเร็วก๊าซขาเข้าต่อค่าประสิทธิภาพย่อย .....	229

บทที่	หน้า
10. ผลการทำนายค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลนแบบมีการเป่าลง (blowdown) .....	231
10.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ .....	231
10.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลนแบบมีการเป่าลง ที่ได้จาก โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าจากข้อมูลการทดลอง .....	235
10.3 อิทธิพลของการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) ต่อค่าประสิทธิภาพย่อย .....	242
10.4 สหสัมพันธ์สำหรับคำนวณค่าตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค....	254
10.5 อิทธิพลของความเร็วก๊าซขาเข้าต่อค่าประสิทธิภาพย่อย .....	263
10.6 อิทธิพลของ %การเป่าลง (%blowdown) ต่อค่าประสิทธิภาพย่อย .....	265
11. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	267
11.1 สรุปผลการวิจัย .....	267
11.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม .....	270
รายการอ้างอิง .....	271
ประวัติผู้เขียน .....	273

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
<u>ตารางที่ 2.1</u> ลักษณะต่างๆ ของวิธีการตกตะกอน.....	15
<u>ตารางที่ 2.2</u> เครื่องวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด.....	15
<u>ตารางที่ 5.1</u> ค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER I ที่ใช้ในงานวิจัย.....	69
<u>ตารางที่ 5.2</u> ค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II ที่ใช้ในงานวิจัย.....	70
<u>ตารางที่ 5.3</u> ส่วนประกอบของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่.....	72
<u>ตารางที่ 5.4</u> เกณฑ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ชุดของสมการพหุนามอันดับสองและสามของ.....	79
โปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีมาตรฐาน JIS สำหรับข้อมูลการทดลองแต่ละชุด	
<u>ตารางที่ 5.5</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	82
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCAL- JIS เดิม, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1	
<u>ตารางที่ 5.6</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	82
JIS TEST POWDER II, No.1	
<u>ตารางที่ 5.7</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	89
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCAL- JIS, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3	
<u>ตารางที่ 5.8</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	89
TEST POWDER II, No.3	
<u>ตารางที่ 5.9</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	96
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 กับโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิม, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4	
<u>ตารางที่ 5.10</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	96
JIS TEST POWDER II, No.4	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฐ

ตาราง	หน้า
<u>ตารางที่ 5.11</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	105
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL1	
<u>ตารางที่ 5.12</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	105
BIMODAL1	
<u>ตารางที่ 5.13</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	112
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL2	
<u>ตารางที่ 5.14</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	112
BIMODAL2	
<u>ตารางที่ 5.15</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	119
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL3	
<u>ตารางที่ 5.16</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	119
BIMODAL3	
<u>ตารางที่ 5.17</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	128
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค JIS TEST POWDER 1, No.5	
<u>ตารางที่ 5.18</u> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค.....	128
JIS TEST POWDER 1, No.5	
<u>ตารางที่ 6.1</u> ชนิดของอนุภาค ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบ และสารช่วยในการกระจายตัว.....	148
<u>ตารางที่ 6.2</u> เกณฑ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ชุดของสมการพหุนามของโปรแกรมคำนวณ.....	153
การกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS สำหรับตัวอย่างอนุภาคในภาคอุตสาหกรรมแต่ละชนิด	
<u>ตารางที่ 6.3</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	157
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A	

ตาราง	หน้า
<u>ตารางที่ 6.4</u> เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้.....	158
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแบ่ง ข้าวโพด PURITY 21A	
<u>ตารางที่ 6.5</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	166
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแบ่ง ข้าวโพด PURITY 21T	
<u>ตารางที่ 6.6</u> เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้.....	167
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแบ่ง ข้าวโพด PURITY 21T	
<u>ตารางที่ 6.7</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้.....	175
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคเคลือบ คาร์บอนด ตัวอย่างที่ 1	
<u>ตารางที่ 6.6</u> เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้.....	176
โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคเคลือบ คาร์บอนด ตัวอย่างที่ 1	
<u>ตารางที่ 8.1</u> สมการแสดงประสิทธิภาพย่อยและประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นด้วยไซโคลน.....	194
ของ Mothes และ Loffler	
<u>ตารางที่ 9.1</u> รายละเอียดข้อมูลของไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง.....	207
<u>ตารางที่ 9.2</u> ค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 21.7 m/s.....	209
<u>ตารางที่ 9.3</u> ค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 m/s.....	210
<u>ตารางที่ 9.4</u> จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละบริเวณภายในไซโคลน.....	213
<u>ตารางที่ 9.5</u> ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคเอกสารอ้างอิง 9.1.1 .....	223

สารบัญตาราง (ต่อ)

ผ

ตาราง	หน้า
<u>ตารางที่ 10.1</u> เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้....	243
จากการทดลอง ( $\alpha$ ) และที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสองของ ( $\alpha'$ ) อนุภาค $\text{CaCO}_3$ JIS No.7	
<u>ตารางที่ 10.2</u> เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้....	244
จากการทดลอง ( $\alpha$ ) และที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสองของ ( $\alpha'$ ) อนุภาค $\text{CaCO}_3$ JIS No.7	



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่อง Mastersizer..... และเครื่อง Beckman Coulter LS230 กับค่าจากเอกสารอ้างอิง	2
รูปที่ 1.2 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค..... ตกตะกอน	2
รูปที่ 1.3 ไชโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส .....	4
รูปที่ 1.4 ชุดการทดลองการจับฝุ่นด้วย ไชโคลน .....	5
รูปที่ 1.5 ไชโคลนที่ใช้ในการทดลองของ Yarmada และคณะ .....	5
รูปที่ 2.1 สมดุลของแรงที่กระทำต่อทรงกลมที่ตกตะกอนอย่างอิสระเนื่องจากแรงโน้มถ่วง... ของโลก ในตัวกลางที่อยู่นิ่งภายใต้สภาวะการไหลแบบชั้นๆ	11
รูปที่ 2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์สำหรับอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมที่มี..... ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางโดยปริมาตรเทียบเท่ากับ 204 $\mu\text{m}$	14
รูปที่ 2.3 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการการวัดแบบอินทรีเมนทัล.....	17
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้หลักการวัดแบบ..... อินทรีเมนทัล	17
รูปที่ 2.5 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการการวัดแบบสะสม .....	18
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเครื่องวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการการวัดแบบ..... สะสม	18
รูปที่ 2.7 หลักการวัดน้ำหนักของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ตกตะกอนลงบนจานรับ..... น้ำหนักซึ่งแขวนอยู่ในคอลัมน์ตกตะกอน	19
รูปที่ 2.8 การตกตะกอนแบบสะสมของอนุภาคที่แขวนลอยในสารแขวนลอยภายใต้..... แรงโน้มถ่วงของโลกน้ำหนักซึ่งแขวนอยู่ในคอลัมน์ตกตะกอน	20
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์กราฟการตกตะกอน.....	23
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของกราฟการกระจายตัวแบบสะสมและกราฟการกระจายตัวแบบ..... สัมพัทธ์ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	25
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของกราฟการกระจายตัวแบบสะสมและกราฟการกระจายตัวแบบ..... สัมพัทธ์ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	26
รูปที่ 2.12 ลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (eddy flow) .....	29
ภายใน ไชโคลนธรรมดา	
รูปที่ 2.13 แผนผัง ไชโคลนที่ใช้ในงานของ G.Ravi.....	32



	หน้า
รูปที่ 2.14 แผนผังไซโคลนที่ใช้ในการศึกษาของ Yoshida.....	33
รูปที่ 2.15 ชุดการทดลองการจับฝุ่นด้วยไซโคลน.....	35
รูปที่ 2.16 ไซโคลนที่ใช้ในการทดลองของ Yoshida และคณะ.....	36
รูปที่ 3.1 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น โดยการสร้างสามเหลี่ยมคล้าย.....	46
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยใช้ปริมาณน้ำหนัก..... ของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง	50
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการสร้างชุดข้อมูลย่อยเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง...	51
รูปที่ 3.4 ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลของโปรแกรมคำนวณการกระจาย... ขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL-JIS)	53
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค.....	55
รูปที่ 4.2 เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer).....	56
รูปที่ 4.3 เครื่องผสมรูปตัววี (V-shape Mixer).....	57
รูปที่ 4.4 เครื่องผสมรูปตัววีชนิดโปร่งใส (Transparent Micro V-Mixer).....	57
รูปที่ 4.5 ซ้อนดิ่งตัวอย่าง (Sampling spear).....	58
รูปที่ 4.6 การผสมอนุภาคตัวอย่างเบื้องต้นด้วยเครื่องผสมรูปตัววี .....	59
รูปที่ 4.7 การดึงตัวอย่างจากอนุภาคที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุโดยใช้ซ้อนดิ่งตัวอย่าง.....	59
รูปที่ 4.8 การแบ่งย่อยโดยวิธี Conical quartering method.....	61
รูปที่ 4.9 การเตรียมตัวอย่างอนุภาคสำหรับวัดการกระจายขนาด.....	62
รูปที่ 5.1 อนุภาคมาตรฐานและสารช่วยในการกระจายตัว.....	71
รูปที่ 5.2 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1.....	74
รูปที่ 5.3 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1..... (กำลังขยาย 7,500 เท่า)	74
รูปที่ 5.4 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3..... (กำลังขยาย 400 เท่า)	75
รูปที่ 5.5 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3 .....	75
(กำลังขยาย 1,500 เท่า)	
รูปที่ 5.6 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 .....	76
(กำลังขยาย 220 เท่า)	
รูปที่ 5.7 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 .....	76

(กำลังขยาย 600 เท่า)	
<u>รูปที่ 5.8</u> รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5.....	77
(กำลังขยาย 450 เท่า)	
<u>รูปที่ 5.9</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จาก.....	83
โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
<u>รูปที่ 5.10</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จาก.....	84
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
<u>รูปที่ 5.11</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จาก.....	85
โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
<u>รูปที่ 5.12</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จาก.....	86
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
<u>รูปที่ 5.13</u> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST.....	87
POWDER II, No. 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม	
ประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่	
วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME	
และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
<u>รูปที่ 5.14</u> เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II,.....	88
No. 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล	
AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก	
โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2MEและค่าจากออก	
สารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	
<u>รูปที่ 5.15</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จาก.....	90
โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
<u>รูปที่ 5.16</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จาก.....	91
โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
<u>รูปที่ 5.17</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จาก.....	92
โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
<u>รูปที่ 5.18</u> แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จาก.....	93

	โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.19	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST POWDER..... II,No. 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2MEและค่าจากอก สารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	94
รูปที่ 5.20	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II,..... No. 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2MEและค่าจาก เอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	95
รูปที่ 5.21	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จาก..... โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	97
รูปที่ 5.22	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จาก..... โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	98
รูปที่ 5.23	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จาก..... โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	99
รูปที่ 5.24	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จาก..... โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	100
รูปที่ 5.25	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST..... POWDER II,No.4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม ประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	101

รูปที่ 5.26	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II,.....	102
	No. 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจาก เอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้ semi-log	
รูปที่ 5.27	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม.....	106
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.28	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม.....	107
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.29	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม.....	108
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.30	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม.....	109
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.31	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL1.....	110
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS- SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.32	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL1.....	111
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS- SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.33	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม.....	113
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.34	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม.....	114
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.35	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม.....	115
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.36	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม.....	116
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	

รูปที่ 5.37	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL2.....	117
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.38	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL2.....	118
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.39	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม.....	120
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.40	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม.....	121
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.41	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม.....	122
	AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.42	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม.....	123
	AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.43	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL3.....	124
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.44	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL3.....	125
	ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.45	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จาก.....	129
	โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	
รูปที่ 5.46	แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จาก.....	130
	โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2	

รูปที่ 5.47	แสดงค่าความชื้นของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จาก.....	131
	โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.48	แสดงค่าความชื้นของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จาก.....	132
	โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3	
รูปที่ 5.49	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST.....	133
	POWDER I, No.5 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม ประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	
รูปที่ 5.50	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER I,.....	134
	No. 5 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจาก เอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้ semi-log	
รูปที่ 5.51	หลักการวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาคของเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A...	135
รูปที่ 5.52	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	137
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นและเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิง ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 1	
รูปที่ 5.53	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	138
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นและเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิง ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 3	
รูปที่ 5.54	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	139
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นและเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิง ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 4	
รูปที่ 5.55	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	140
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A ของ อนุภาค BIMODAL 1	

<u>รูปที่ 5.56</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	141
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A ของ	
	อนุภาค BIMODAL 2	
<u>รูปที่ 5.57</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	142
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A ของ	
	อนุภาค BIMODAL 3	
<u>รูปที่ 5.58</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาด.....	143
	อนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นและเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิง	
	ของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No. 5	
<u>รูปที่ 6.1</u>	รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A .....	146
	(กำลังขยาย 100 เท่า)	
<u>รูปที่ 6.2</u>	รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T .....	146
	(กำลังขยาย 100 เท่า)	
<u>รูปที่ 6.3</u>	รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1.....	147
	(กำลังขยาย 100 เท่า)	
<u>รูปที่ 6.4</u>	หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเทคนิคกระเจิงแสง (Laser Diffraction).....	151
<u>รูปที่ 6.5</u>	วิธีการวัดค่าการกระจายขนาดด้วยโปรแกรม DET-FERET.....	152
<u>รูปที่ 6.6</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการ..	159
	วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับ	
	เทียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS,	
	โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ	
	กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	
<u>รูปที่ 6.7</u>	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการ.....	160
	วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับ	
	เทียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS,	
	โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ	
	กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	

<p><b>รูปที่ 6.8</b> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการ.. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับ เรียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลsemi-log</p>	161
<p><b>รูปที่ 6.9</b> เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการ..... วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับ เรียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลsemi-log</p>	162
<p><b>รูปที่ 6.10</b> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้.. จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มี การปรับเรียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผลAUTOCAL- JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัย หลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล ปกติ</p>	168
<p><b>รูปที่ 6.11</b> เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการ. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับ เรียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการ กระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ</p>	169
<p><b>รูปที่ 6.12</b> เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้.. จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มีการปรับเรียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่อง วิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ใน กรณีที่ใช้สเกล semi-log</p>	170



<u>รูปที่ 6.13</u>	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ที่มี การเปรียบเทียบความชัน กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่ อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	171
<u>รูปที่ 6.14</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต... ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการเปรียบเทียบความชันและไม่มีและ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	177
<u>รูปที่ 6.15</u>	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต..... ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการเปรียบเทียบความชันและไม่มีและ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ	178
<u>รูปที่ 6.16</u>	เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต..... ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการเปรียบเทียบความชันและไม่มี และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	179
<u>รูปที่ 6.17</u>	เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต..... ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการเปรียบเทียบความชันและไม่มี และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log	180
<u>รูปที่ 8.1</u>	ไซโคลนที่ใช้ใน โมเดล.....	196
<u>รูปที่ 8.2</u>	แสดงการแบ่งบริเวณภายใน โมเดล.....	197
<u>รูปที่ 8.3</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นที่ความเร็ว 11 เมตร/วินาที ของไซโคลน. ที่คำนวณได้จาก โมเดล Mothes และ Loffler กับค่าจากผลการทดลอง	198

	หน้า
<u>รูปที่ 8.4</u> ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยการจับฝุ่นของ..... ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสชนิดมีและไม่มีหารเป่าลงที่ประดิษฐ์ขึ้น	206
<u>รูปที่ 9.1</u> ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ใช้ในการทดลองของ G.Ravi และคณะ.....	208
<u>รูปที่ 9.2</u> เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จาก... ผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่า ร้อยละอัตราการไหลของก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ที่ความเร็ว ก๊าซเข้า 11 เมตร/วินาที และใช้จำนวนถังในการคำนวณทั้งหมดเป็น 251 ถัง	215
<u>รูปที่ 9.3</u> เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จาก... ผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่า จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251 และ 101 ถัง ที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 เมตร/ วินาที และร้อยละอัตราการไหลของก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มี ค่าเท่ากับ 100	216
<u>รูปที่ 9.4</u> เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จาก... ผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่า จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251 และ 101 ถัง ที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 เมตร/ วินาที และร้อยละอัตราการไหลของก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มี ค่าเท่ากับ 90	217
<u>รูปที่ 9.5</u> เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จาก... ผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่า จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251, 101 และ 26 ถัง ที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 เมตร/วินาที และร้อยละอัตราการไหลของก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากับ 5	218
<u>รูปที่ 9.6</u> ตัวอย่างของผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพการ..... เก็บ อนุภาคฝุ่นของไซโคลน	219
<u>รูปที่ 9.7</u> เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้..... จากการทดลองสุ่มค่า ( $\alpha$ ) และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	224

<u>รูปที่ 9.8</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ.....	225
	G. Ravi ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 เมตร/วินาทีของไซโคลน ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการค่า $\alpha$ และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ	
<u>รูปที่ 9.9</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ.....	226
	G. Ravi ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 21.7 เมตร/วินาทีของไซโคลน ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการค่า $\alpha$ และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ	
<u>รูปที่ 9.10</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ.....	227
	Mothes ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 16 เมตร/วินาทีของไซโคลน ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการค่า $\alpha$ และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ	
<u>รูปที่ 9.11</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ.....	228
	Mothes ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 16 เมตร/วินาทีของไซโคลน ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการค่า $\alpha$ และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ	
<u>รูปที่ 9.12</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ.....	230
	G.Ravi ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 และ 21.7 เมตร/วินาทีของไซโคลน ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการค่า $\alpha$	
<u>รูปที่ 10.1</u>	ชุดการทดลองไซโคลนสำหรับจับฝุ่นระดับไมครอน.....	231
<u>รูปที่ 10.2</u>	ไซโคลนขนาด 70 mm.....	232
<u>รูปที่ 10.3</u>	ไซโคลนขนาด 150 mm.....	233

<u>รูปที่ 10.4</u>	เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $Al_2O_3$ # 8000 ของไซโคลน... กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม โดยมีค่าความเร็วก๊าซขาเข้า = 30 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15	236
<u>รูปที่ 10.5</u>	เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัด $Al_2O_3$ #8000 ของไซโคลน... กรณี Type II ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและ โปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 20 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15	237
<u>รูปที่ 10.6</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $CaCO_3$ ของไซโคลน..... กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown)= 0	238
<u>รูปที่ 10.7</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $CaCO_3$ ของไซโคลน..... กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและ โปรแกรมโดยมีความเร็วขาเข้า = 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown)= 10	239
<u>รูปที่ 10.8</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $CaCO_3$ ของไซโคลน.... กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและ โปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15	240
<u>รูปที่ 10.9</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $CaCO_3$ ของไซโคลน.... กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและ โปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 20 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15	241
<u>รูปที่ 10.10</u>	แสดงค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค $Al_2O_3$ # 8000... ที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ )	245
<u>รูปที่ 10.11</u>	แสดงค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค $CaCO_3$ ..... ที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ )	246
<u>รูปที่ 10.12</u>	เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค $CaCO_3$ ... JIS No.7 และ $Al_2O_3$ #8000 ที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) เมื่อความเร็วก๊าซขาเข้ามี ค่า 20 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15	247

	หน้า
<p><u>รูปที่10.13</u> เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค <math>Al_2O_3</math> #8000 ของไซโคลน....                      กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้                      จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการ                      ทดลองสุ่ม (<math>\alpha</math>) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 30 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง                      มีค่าเท่ากับ 15</p>	248
<p><u>รูปที่10.14</u> เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค <math>Al_2O_3</math> #8000 ของไซโคลน....                      กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้                      จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการ                      ทดลองสุ่ม (<math>\alpha</math>) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง                      มีค่าเท่ากับ 15</p>	249
<p><u>รูปที่10.15</u> เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค <math>CaCO_3</math> ของไซโคลน.....                      กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้                      จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการ                      ทดลองสุ่ม (<math>\alpha</math>) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง                      มีค่าเท่ากับ 0</p>	250
<p><u>รูปที่10.16</u> เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค <math>CaCO_3</math> ของไซโคลน.....                      กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้                      จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการ                      ทดลองสุ่ม (<math>\alpha</math>) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง                      มีค่าเท่ากับ 10</p>	251
<p><u>รูปที่10.17</u> เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค <math>CaCO_3</math> ของไซโคลน.....                      กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้                      จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการ                      ทดลองสุ่ม (<math>\alpha</math>) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง                      มีค่าเท่ากับ 15</p>	252

<u>รูปที่ 10.18</u>	เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $\text{CaCO}_3$ ของไซโคลน.....	253
	กรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15	
<u>รูปที่ 10.19</u>	เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค $\text{CaCO}_3$ ...	254
	JIS No.7 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	
<u>รูปที่ 10.20</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค $\text{CaCO}_3$ JIS No.7 ระหว่างค่า .....	258
	ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	
<u>รูปที่ 10.21</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค $\text{CaCO}_3$ JIS No.7 ที่ร้อยละ .....	259
	อัตราการเป่าลงมีค่า 15 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	
<u>รูปที่ 10.22</u>	เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค .....	260
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ # 8000 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ )และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	
<u>รูปที่ 10.23</u>	เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค .....	261
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ # 8000 และ $\text{CaCO}_3$ JIS No.7 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ )และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่า 20 เมตร/วินาที และร้อยละอัตราการเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15	
<u>รูปที่ 10.24</u>	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค $\text{Al}_2\text{O}_3$ # 8000 ที่ร้อยละ .....	262
	อัตราการเป่าลงมีค่า 15 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )	

รูปที่ 10.25	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค $\text{CaCO}_3$ JIS No.7 ที่ ..... ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิง ประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ ) โดยมี % การเป่าลง (%blowdown) = 15 เมื่อเปลี่ยนความเร็วก๊าซขาเข้า	264
--------------	---	-----



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

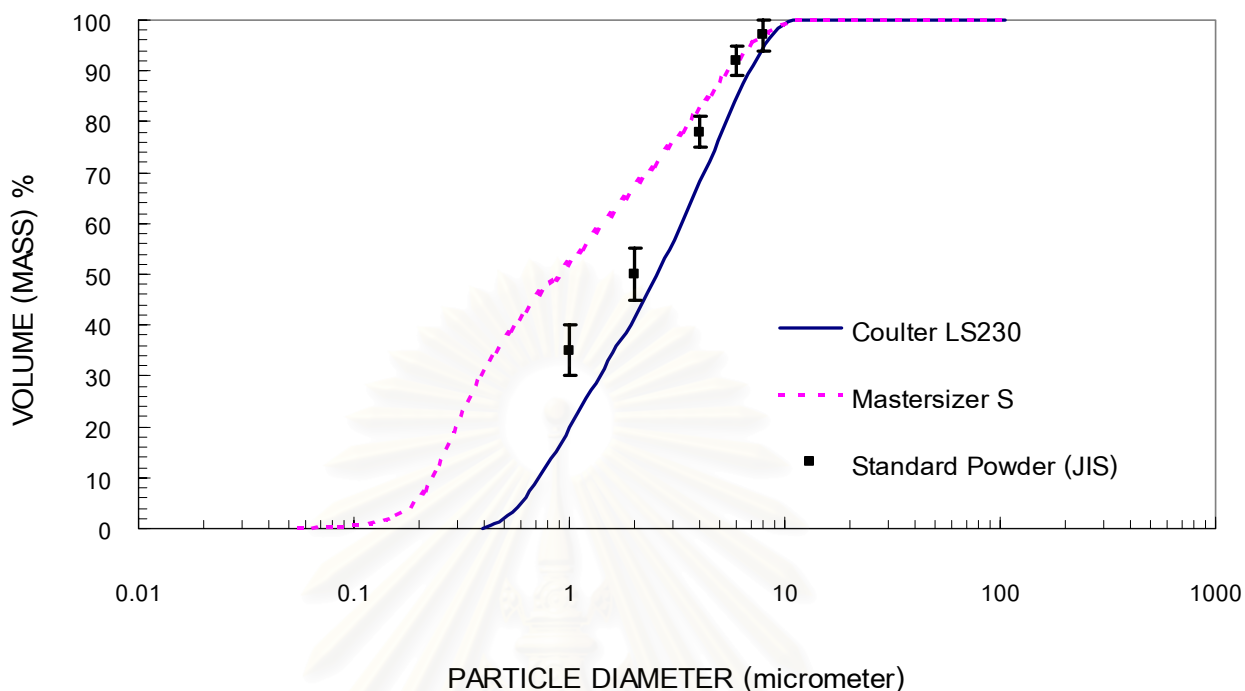
## บทที่ 1

### บทนำ

ในงานอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอนุภาค (ผง, แป้ง ฯลฯ) การวิเคราะห์หาการกระจายขนาดของอนุภาคนับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะค่าดังกล่าวสามารถนำมาใช้ชี้ความยากง่ายในการผลิตหรือจัดเก็บของอนุภาค นำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ตลอดจนนำไปใช้ในการวิจัยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอนุภาค ในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการนำหลักการและเทคนิคใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้ในการวัดขนาดของวัสดุอนุภาค เช่น เทคนิค Laser diffraction / light scattering, Image analysis และ Photo-extinction centrifugal sedimentation แต่เครื่องมือที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เหล่านี้ล้วนเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพงมากในท้องตลาด นอกจากนี้ที่ระพีพัฒน์ กฤตานุสรณ์ (23) ได้ทดสอบวิจัยพบว่าค่าการกระจายขนาดของอนุภาคชนิดเดียวกันที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้หลักการในการวัดที่แตกต่างกันจะมีค่าแตกต่างกัน และยังพบว่าแม้ว่าจะใช้เครื่องมือที่ใช้หลักการในการวัดอย่างเดียวกันแต่ถ้าเครื่องมือเหล่านั้นผลิตจากคนละบริษัทกัน ค่าการกระจายขนาดที่วัดได้ก็จะแตกต่างกัน ดังตัวอย่างการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐาน JIS TEST POWDER I, No.11 ด้วยเครื่อง Mastersizer S และเครื่อง Beckman Coulter ดังแสดงในรูปที่ 1.1

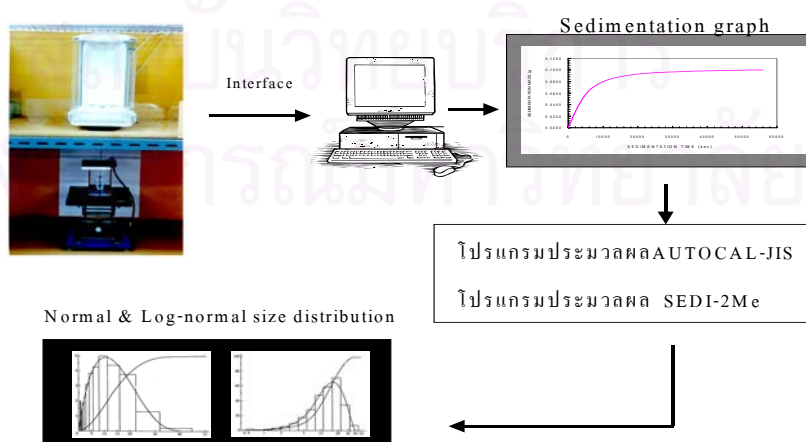
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 1.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่อง Mastersizer S และเครื่อง Beckman Coulter LS230 กับค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.11

พีระพัฒน์ กฤตานุสรณ์ (23) จึงได้ทำการสร้างเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้วิธีการตกตะกอน (รูปที่ 1.2) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการหาการกระจายขนาดของอนุภาคที่กำหนดโดยมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard)



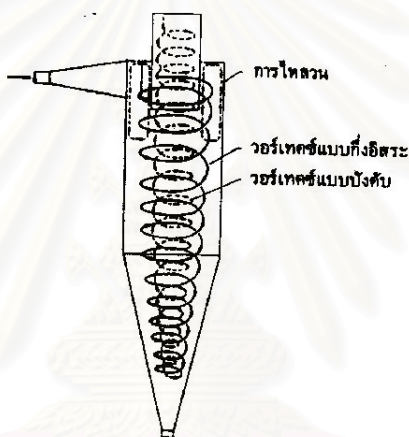
รูปที่ 1.2 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิคตกตะกอน

การคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) สำหรับการวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนแบบสะสม เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการวิเคราะห์ผล เนื่องจากจะต้องทำการลากเส้นสัมผัสจากกราฟการตกตะกอนเพื่อหาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคต่อไป ในขั้นตอนการลากเส้นสัมผัสหากเราทำการลากเส้นสัมผัสโดยการประมาณจากสายตา บุคคลต่างกันก็จะลากเส้นที่ต่างกัน ดังนั้นวิธีลากเส้นสัมผัสด้วยมือจะไม่ให้เส้นสัมผัสที่เป็นมาตรฐานจากข้อมูลชุดเดียวกันที่กำหนดมาให้ ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่มีความแน่นอน และไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นพีระพัทธ์ กฤตบุตรณ์ จึงได้ทำการประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐาน JIS ขึ้น โดยตั้งชื่อว่าโปรแกรม AUTOCAL-JIS ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีความเที่ยงตรง และน่าเชื่อถือมากกว่า อย่างไรก็ตาม ปรากฏว่าแม้ว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับน้ำหนักที่ตกตะกอนของอนุภาคจะมีค่าต่อเนื่องแต่ความชันของชุดข้อมูลที่ได้นั้นอาจมีค่าไม่ต่อเนื่องกันหรือเหลื่อมกันเล็กน้อยที่บางจุดรอยต่อของช่วงเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มเทคนิคฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline function) ในโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับใช้ในการประมาณหาค่าความชันของข้อมูลการทดลองเพื่อนำมาหาค่าการกระจายขนาดของอนุภาค แล้ววิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของตัวอย่างอนุภาคฝุ่นชนิดต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นๆ

อนึ่งเนื่องจากปัจจุบันมีการตระหนักถึงปัญหามลภาวะอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์กำจัดฝุ่นที่เหมาะสมเพื่อกำจัดมลสารที่เกิดขึ้นก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเพิ่มความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น ไซโคลนที่ใช้เป็นอุปกรณ์กำจัดฝุ่นจากกระแสดำในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อเด่นของไซโคลนคือมีโครงสร้างง่าย บำรุงรักษาง่าย และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย สามารถปล่อยอนุภาคฝุ่นที่เก็บได้ออกอย่างต่อเนื่อง ความดันสูญเสียไม่สูงเกินไป เหมาะกับก๊าซที่มีระของอนุภาคฝุ่นสูง สามารถนำมาใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ความดันสูงได้นอกจากนี้ประสิทธิภาพการบำบัดฝุ่นของไซโคลนก็ไม่ต่ำมาก คือประมาณร้อยละ 50-95 โดยมวล ดังนั้นไซโคลนจึงเป็นเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

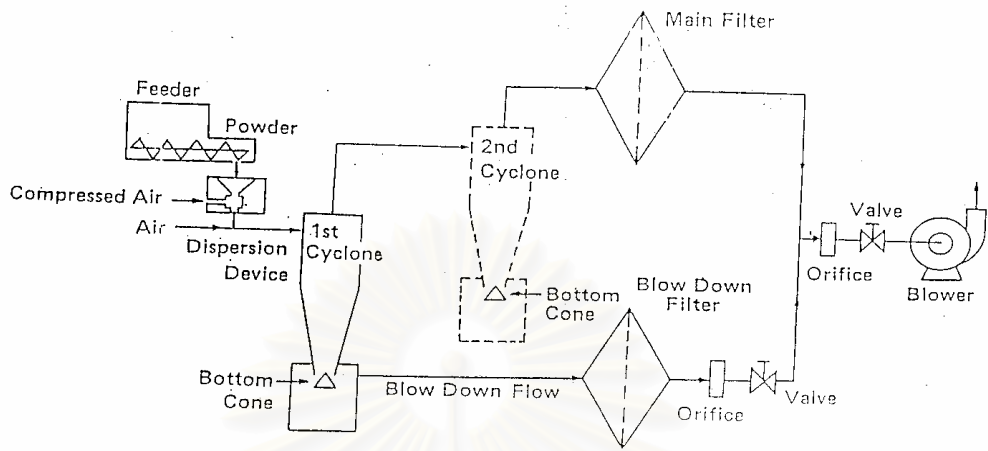
เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบไซโคลนมีหลายชนิด แต่ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสจัดเป็นไซโคลนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีผู้เสนอสมการคำนวณหา

ประสิทธิภาพของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสไว้มากมาย ยกตัวอย่างเช่น สมการของ Stairmand (1951), Lapple (1951), Barth (1956), Leith and Licht (1972), Dietz (1981), Dirgo and Leith (1985), Mothes and Loffler (1988), Li Enliang and Wang Yingmin (1989), Clift และคณะ (1991) และ W.S. Kim and J.W. Lee (1997) เนื่องจากสมการเหล่านี้ค่อนข้างแตกต่างกันและยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะคัดเลือกชุดสมการคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลนที่มีผู้รายงานว่าให้ผลที่น่าเชื่อถือมา 2-3 ชุด แล้วสร้างโปรแกรมเพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนที่บำบัดฝุ่นที่สนใจได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากขึ้น

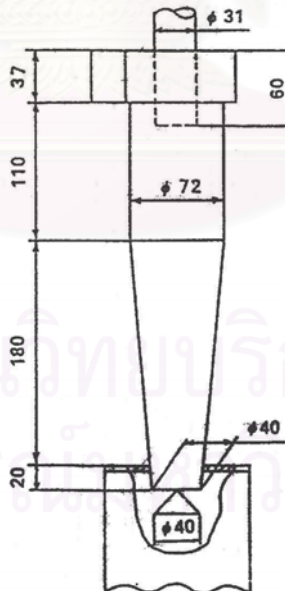
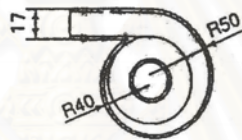


รูปที่ 1.3 ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส

เนื่องจากไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ใช้กันทั่วไป (รูปที่ 1.3) มีข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพต่ำในการเก็บฝุ่นละเอียด ดังนั้น Yamada และคณะ (21) ได้ทำการทดลองจับฝุ่นด้วยไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส โดยสร้างชุดการทดลองที่ประกอบด้วยไซโคลน 2 ตัว โดยตัวแรกจะมีการดึง blowdown ที่กล่องเก็บฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งไซโคลนทั้ง 2 ตัวนี้ประกอบด้วย bottom cone ดังแสดงในรูปที่ 5 อนุภาคที่ใช้ในการทดลองได้แก่  $Al_2O_3$  และอนุภาคมาตรฐาน  $CaCO_3$  JIS No. 17 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถจับและคัดแยกฝุ่นในระดับ sub-micron ได้ค่อนข้างดี



รูปที่ 1.4 ชุดการทดลองการจับฝุ่นด้วยไซโคลน



รูปที่ 1.5 ไซโคลนที่ใช้ในการทดลองของ Yamada และคณะ

อนึ่ง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มี การเสนอสมการคำนวณหาประสิทธิภาพย่อยของ ไซโคลนแบบที่มีการเป่าลง (blowdown) มาก่อน ดังนั้นในงานวิจัยนอกจากจะศึกษาการสร้างโปรแกรม คำนวณประสิทธิภาพของไซโคลนแบบทั่วไปแล้ว โดยเลือกใช้ชุดสมการที่มีผู้เสนอและรายงาน ว่า น่าเชื่อถือดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ยังมีวัตถุประสงค์ที่จะเสนอสมการประเมินประสิทธิภาพย่อยของ ไซโคลนแบบที่มีการเป่าลงอีกด้วย

โดยสรุปแล้วการศึกษานี้ นอกจากจะพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์การกระจาย ขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอน โดยการเพิ่มเทคนิคฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline function) สำหรับใช้ในการประมาณหาค่าความชันของข้อมูลการทดลองเพื่อนำมาหาค่าการกระจาย ขนาดของอนุภาค แล้ว ยังจะพัฒนาโปรแกรมการคำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนแบบไหลเข้าใน แนวสัมผัส (ไม่มี blowdown) โดยเลือกใช้สมการที่มีผู้เสนอไว้ และมีรายงานผลที่น่าเชื่อถือและสร้าง สมการคำนวณประสิทธิภาพย่อยสำหรับไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสที่มีการเป่าลง (blowdown) อีกด้วย

## 1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการ ตกตะกอน โดยการประยุกต์ใช้ เทคนิคฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline function) และ โปรแกรม สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส

## 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การปรับปรุงการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคในโปรแกรมการคำนวณค่าการกระจาย ขนาดของอนุภาค โดยวิธีมาตรฐาน JIS จะประยุกต์ใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม
2. ความเหมาะสมถูกต้องของโปรแกรมที่ปรับปรุงจะประเมิน โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การ กระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐาน, ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคจากโปรแกรม ประมวลผลเดิม (AUTOCAL-JIS, SEDI-2Me) และ/หรือ ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของ อนุภาคที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง
3. อนุภาคในอุตสาหกรรมที่สนใจจะศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาค ได้แก่ แป้งข้าวโพด, แป้งมันสำปะหลัง, แคลเซียมคาร์บอเนต และตัวอย่างฝุ่นจากโรงงานอุตสาหกรรม

4. สมการที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพย่อย (grade efficiency) ของไซโคลนจะจำกัดเฉพาะสมการ 2-3 ชุดที่มีผู้รายงานที่น่าเชื่อถือ เช่น สมการของ H. Mothes และ F. Löffler และสมการของ P.W. Dietz ที่ปรับปรุงโดย Clift และคณะ
5. นอกจากจะประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนที่ไม่มีการเป่าลงแล้ว จะทำการคัดเลือก และ/หรือ สร้างสมการการทดลองสำหรับคำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนแบบที่มีการเป่าลง (blowdown) ด้วย
6. ในกรณีไซโคลนที่มีการเป่าลง (blowdown) จะสนใจการคัดแยกอนุภาคระดับไมโครเมตรเป็นหลัก

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ จะได้เทคนิคฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline function) สำหรับใช้กับโปรแกรมวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยวิธีตกตะกอนและจะได้โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพของไซโคลนเพื่อช่วยทำให้ออกแบบไซโคลนได้สะดวกขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ความรู้เบื้องต้น

ในบทที่ 2 นี้ จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค และส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่อธิบายความรู้ในด้านการจับฝุ่นด้วยไซโคลนและการคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลน

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงคำศัพท์บางคำเกี่ยวกับอนุภาคและการกระจายขนาดของอนุภาคที่มักพบบ่อยๆ เพื่อให้สื่อความหมายและความเข้าใจตรงกัน จากนั้นจึงกล่าวถึงสมการการเคลื่อนที่ของสโตกส์ ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของทรงกลมในสภาวะการไหลแบบชั้นๆ ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก รวมทั้งหลักการและวิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน ซึ่งได้ชี้แจงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1 – 2.2

นอกจากนี้ ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิธีการคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคนั้นนับเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำจัดฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นในส่วนที่ 2 ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำความรู้ในส่วนที่ 1 มาประยุกต์ใช้ โดยเลือกเอาไซโคลนซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเป็นตัวแทนของอุปกรณ์กำจัดฝุ่น มาศึกษาวิเคราะห์ ดังมีรายละเอียดที่ได้ชี้แจงในหัวข้อ 2.3 เป็นต้นไป

#### 2.1 คำศัพท์และความหมาย

มีคำศัพท์เกี่ยวกับอนุภาค และการกระจายขนาดของอนุภาคหลายคำที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะต้องอธิบายเพื่อให้มีความหมายและความเข้าใจตรงกัน ดังต่อไปนี้

**ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ (Stokes' diameter)** หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีค่าความหนาแน่น และค่าความเร็วในการตกตะกอนอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกในของไหลที่กำหนดเท่ากับค่าความเร็วของอนุภาคที่สนใจ

**ขนาดของอนุภาค (particle size)** หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เทียบเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ที่วัดโดยวิธีการตกตะกอน

**ความหนาแน่นของอนุภาค** (particle density) หมายถึง ค่าความหนาแน่นที่คำนวณโดยการหารค่ามวลของอนุภาคทั้งหมดด้วยปริมาตรที่แท้จริงของอนุภาคทั้งหมด (ไม่รวมปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาค)

**การกระจายขนาดของอนุภาค** (particle size distribution) หมายถึง การกระจายตัวโดยมวลที่สอดคล้องกับแต่ละขนาดของอนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของประชากรอนุภาคทั้งหมด ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การกระจายขนาดแบบสะสม (cumulative size distribution) และการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ (relative size distribution หรือเรียกว่า density distribution) (ดูรายละเอียดวิธีการคำนวณค่าการกระจายขนาดในหัวข้อ 2.2.4)

### หมายเหตุ

1. อนุภาคโดยทั่วไป รวมทั้งอนุภาคสำหรับการทดสอบไม่ได้ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเดียวกันทั้งหมด แต่จะประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่อนุภาคที่มีขนาดเส้นศูนย์กลางเล็กที่สุดจนถึงอนุภาคที่มีขนาดเส้นศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุด โดยจะผสมกันอยู่ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน
2. ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณสามารถนำมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟได้ทั้งในกรณีที่แกนนอนของกราฟเป็นสเกลปกติ (normal distribution) และในกรณีที่แกนนอนของกราฟเป็นสเกลล็อก (log - normal distribution)
3. โดยทั่วไปจะแสดงผลการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้กราฟที่แกนนอนของกราฟเป็นสเกลล็อก เพราะอนุภาคหลายชนิดรวมทั้งวัสดุอนุภาค (powders) และอนุภาคแอโรโซลที่อยู่ในบรรยากาศ จะมีลักษณะการกระจายขนาดแบบล็อก (logarithmically distributed) ดังนั้นการแสดงค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้กราฟที่มีสเกลปกติจะทำให้จุดของข้อมูลสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ เกิดการอัดตัว ทำให้สูญเสียรายละเอียดข้อมูลของอนุภาคขนาดเล็กๆ

**ขนาดเกิน (Oversize)** หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มอนุภาคในประชากรอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าที่กำหนด

**ขนาดต่ำ (Undersize)** หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มอนุภาคในประชากรอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดเล็กกว่าค่าที่กำหนด

**เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Median diameter)** หมายถึง ขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่งที่ค่าการกระจายตัวแบบสะสมมีค่าเท่ากับ 50 %



ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต (geometric standard deviation) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_g = \frac{\text{ขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่งที่ค่าการกระจายตัวแบบสะสมมีค่าเท่ากับ 84.13 \%}}{\text{ขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่งที่ค่าการกระจายตัวแบบสะสมมีค่าเท่ากับ 50 \%}}$$

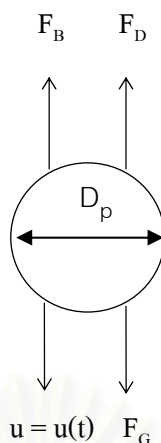
## 2.2 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนนั้นอาศัยหลักการการตกตะกอนอย่างอิสระของทรงกลมเดี่ยวในของไหลที่ไม่จำกัดขอบเขตภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้มีการทำการทดลองจำนวนมากเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วในการตกตะกอนกับขนาดของอนุภาค สโตกส์ (1819 - 1903) เป็นผู้พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (drag factor) กับค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สำหรับสถานะที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ ต่ำๆ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวมีชื่อเรียกว่าสมการของสโตกส์ (Stokes equation) ซึ่งสามารถนำมาใช้คำนวณหาขนาดเทียบเท่าของอนุภาคชนิดใดๆ ที่ทราบค่าความเร็วในการตกตะกอน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่คำนวณได้มีชื่อเรียกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์

### 2.2.1 สมการของสโตกส์ (Stokes equation)

Goerge Gabriel Stokes (1819-1903) ได้สร้างสมการเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของทรงกลมในสถานะการไหลแบบชั้นๆ ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยอาศัยสมมุติฐานสามข้อ คือ ข้อที่หนึ่ง กำหนดให้พื้นผิวของทรงกลมจะต้องแข็ง (rigid) และเรียบอย่างสมบูรณ์ ข้อที่สอง กำหนดให้ทรงกลมเคลื่อนที่อยู่ในของเหลวที่ไม่จำกัดขอบเขต และสมมุติฐานข้อสุดท้ายกำหนดให้ทรงกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่คงที่ (steady terminal velocity) จากสมมุติฐานทั้งสามข้อข้างต้น แสดงให้เห็นว่าทรงกลมจะอยู่ในสถานะสมดุลของแรงที่กระทำต่อทรงกลม

สำหรับการตกตะกอนอย่างอิสระของทรงกลมเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในตัวกลางที่อยู่นิ่งภายใต้สถานะการไหลแบบชั้นๆ จะมีแรงกระทำต่อทรงกลม 3 ชนิด คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force,  $F_G$ ) แรงลอยตัวของของไหล (Bouancy force,  $F_B$ ) และแรงเสียดทาน (Viscous drag force,  $F_D$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สมดุลของแรงที่กระทำต่อทรงกลมที่ตกตะกอนอย่างอิสระเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ในตัวกลางที่อยู่นิ่งภายใต้สภาวะการไหลแบบชั้นๆ

จากสมดุลของแรงที่กระทำต่อทรงกลมสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของทรงกลมได้ดังนี้

$$F_G - F_B - F_D = m_p \frac{du}{dt} \quad (2.1)$$

โดย  $u$  คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของทรงกลม (เมตร/วินาที)

จากสมมุติฐานข้อที่ 3 ที่กำหนดว่า ณ สภาวะสมดุล ทรงกลมจะตกตะกอนด้วยความเร็วที่แน่นอนคงที่ ซึ่งเรียกว่าความเร็วในการตกตะกอนของสโตกส์ (Stokes' settling velocity,  $V_{st}$ ) ดังนั้นค่า  $dV_{st}/dt$  มีค่าเท่ากับศูนย์ สมการการเคลื่อนที่ของทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด  $D_{pst}$  และมีความหนาแน่น  $\rho_p$  ที่เคลื่อนที่ในของไหลที่มีความหนาแน่น  $\rho_f$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_G - F_B - F_D = m_p \frac{dV_{st}}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) จะได้

$$F_D = m_p g - m_f g \quad (2.3)$$

$$F_D = \frac{\pi}{6} (\rho_p - \rho_f) g D_{pst}^3 \quad (2.4)$$

โดยที่	$V_{st}$	คือ	ความเร็วในการตกตะกอนของสโตนส์ (เมตร/วินาที)
	$m_p$	คือ	มวลของทรงกลม (กิโลกรัม)
	$m_f$	คือ	มวลของของไหลที่มีปริมาตรเท่ากับทรงกลม (กิโลกรัม)
	$g$	คือ	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที <sup>2</sup> )
	$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นของทรงกลม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	$\rho_f$	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	$D_{pst}$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

จากนิยามของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (drag coefficient) ที่กำหนดให้

$$C_D = \frac{\text{แรงเสียดทาน (drag force)}}{[\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของทรงกลม (Cross-section area of the sphere)}] * [\text{แรงเคลื่อนที่ที่กระทำต่อทรงกลม (Dynamic pressure on the sphere)}]}$$

เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F_D = C_D * \frac{\pi D_{pst}^2}{4} * \frac{\rho_f V_{st}^2}{2} \quad (2.5)$$

ในสภาวะการไหลแบบชั้นๆ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ของทรงกลมสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (2.6)$$

โดยค่าเลขเรย์โนลด์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Re_p = \frac{\rho_f D_{pst} V_{st}}{\mu} \quad (2.7)$$

โดย  $\mu$  คือ ความหนืดของของไหล (นิวตัน.วินาที/เมตร<sup>2</sup>)

แทนสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) ลงในสมการที่ (2.5) และจัดรูปของสมการใหม่จะได้

$$F_D = 3\pi D_{pst} \mu V_{st} \quad (2.8)$$

แทนสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.8) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับค่าความเร็วในการตกตะกอนของทรงกลม ซึ่งเรียกว่าสมการของ สโตกส์

$$D_{pst} = \sqrt{\frac{18\mu V_{st}}{(\rho_p - \rho_f)g}} \quad (2.9)$$

สมการของสโตกส์นี้ใช้สำหรับคำนวณขนาดของทรงกลมที่ทราบความเร็วที่มันปลาย โดยค่าความเร็วที่มันปลายสามารถหาได้จาก

$$V_{st} = \frac{h}{t} \quad (2.10)$$

โดย  $h$  คือ ระยะทาง (เมตร) ที่ทรงกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในเวลา  $t$   
 $t$  คือ เวลา (วินาที)

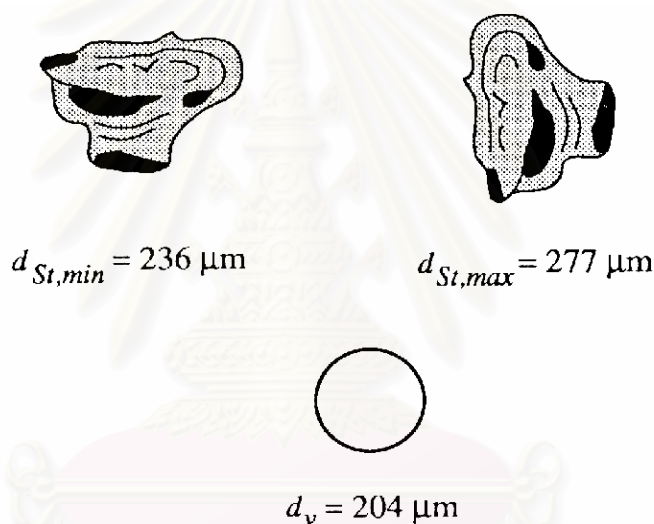
แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้

$$D_{pst} = \sqrt{\frac{18\mu h}{(\rho_p - \rho_f)gt}} \quad (2.11)$$

สมการของสโตกส์นี้ใช้ได้เฉพาะกับการตกตะกอนของอนุภาคในช่วงการไหลแบบชั้นๆ เท่านั้น (ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ) เพราะเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะเกิดสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งจะไปเพิ่มแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำให้อนุภาคตกตะกอนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วที่ทำนายโดยสมการของสโตกส์ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการ (2.11) จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แท้จริง

สำหรับอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมที่ตกตะกอนในสภาวะการไหลแบบชั้นๆ อนุภาคจะตกตะกอนโดยไม่มีรูปแบบการจัดเรียงตัวที่แน่นอน ดังนั้นค่าแรงเสียดทานของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาค อนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมที่ตกตะกอนโดยจัดให้ด้าน

ที่มีพื้นที่ตัดขวางมากที่สุดตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะตกตะกอนช้ากว่าอนุภาคแบบเดียวกันที่ตกตะกอนโดยจัดให้ส่วนที่มีพื้นที่ตัดขวางน้อยที่สุดตั้งฉากกับทิศของไหล ดังนั้นอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมที่ตกตะกอนในสภาวะการไหลแบบชั้นๆ จะมีช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แตกต่างกันช่วงหนึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาค ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2 อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยปริมาตรเท่ากับ  $204 \mu\text{m}$  ในกรณีที่อนุภาคจัดเรียงตัวในลักษณะที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานมากที่สุด อนุภาคจะตกตะกอนด้วยความเร็วเดียวกับอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $236 \mu\text{m}$  ในทางตรงกันข้ามถ้าอนุภาคจัดเรียงตัวในลักษณะที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานน้อยที่สุด อนุภาคจะตกตะกอนด้วยความเร็วเดียวกับอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $277 \mu\text{m}$



รูปที่ 2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์สำหรับอนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางโดยปริมาตรเทียบเท่ากับ  $204 \mu\text{m}$

### 2.2.2 หลักการและวิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนสามารถจำแนกออกตามหลักการได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากหลักการชนิดต่างๆ ข้างต้นได้มีการนำมาพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดขนาดของอนุภาคหลายชนิดดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เท่านั้น

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จะอาศัยการวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการวัด ออกได้เป็น 2 แบบ คือ การวัดแบบอินครีเมนทัล (Incremental) และการวัดแบบสะสม (Cumulative)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะต่างๆ ของวิธีการตกตะกอน

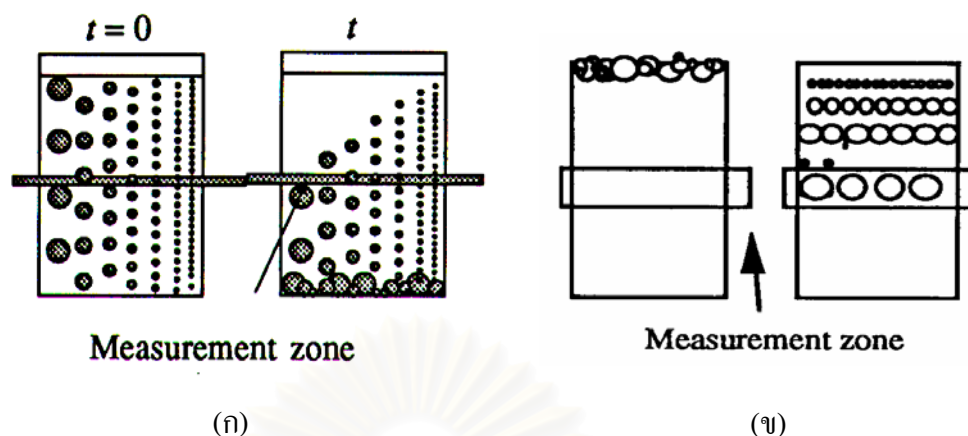
ชนิดสารแขวนลอย	หลักการวัด	แรงที่กระทำ
สารเนื้อเดียว (Homogeneous)	อินครีเมนทัล (Incremental)	แรงโน้มถ่วงโลก (Gravitational)
ไลน์สตาร์ท (Line start)	สะสม (Cumulative)	แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal)

ตารางที่ 2.2 เครื่องวัดขนาดของอนุภาค โดยวิธีการตกตะกอนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

การตกตะกอนแบบอินครีเมนทัล ชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Homogeneous, incremental gravitational sedimentation)	การตกตะกอนแบบสะสมชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Homogeneous, cumulative gravitational sedimentation)
Andreasen pipette	Oden balance
Leschonski pipette	Svedberg and Rinde automatic recording
Fixed depth pipette	Sedimentation beam balance
Side-arm pipette	Cahn balance
Wagner photosedimentation	Gallenkamp balance
EEL photosedimentometer	Mettler H20E balance
Bound Brook photosedimentometer	Sartorius Recording Sedibel balance
Seishin Photomicrosizer	Palik torsion balance
Ladal wide angle scanning	Kiffer continuous weighting chain link balance
Photosedimentometer	Rabatin and Gale spring balance
Micromeritics Sedigraphs 5000&5100	Shimadzu balance
Quantachrome Microscan	ICI sedimentation column
X-ray sedimentometer	BCURA sedimentation column
Hydrometer	Fishers Dotts apparatus
Diver	Decanting
Suito specific gravity balance	

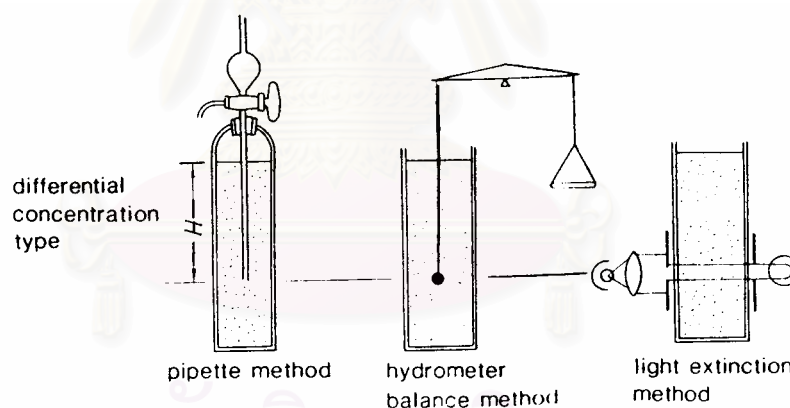
## ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

<p><b><u>การตกตะกอนแบบอินทรีย์เมทัลชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ทภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก</u></b> <b><u>(Line-start, incremental, gravitational sedimentation)</u></b></p> <p>MSA analyzer</p>	<p><b><u>การตกตะกอนแบบสะสมชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ทภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก</u></b> <b><u>(Line-start, cumulative, gravitational sedimentation)</u></b></p> <p>Werner and Travis method Granometer Micromerograph MSA analyzer</p>
<p><b><u>การตกตะกอนแบบอินทรีย์เมทัล ชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง</u></b> <b><u>(Homogeneous, incremental, centrifugal sedimentation)</u></b></p> <p>Simcar centrifuge Ladal pipette centrifuge Ladal x-ray centrifuge Brookhaven scanning x-ray centrifuge Brookhaven BI-DCP,disc photocentrifuge Kaye disc photocentrifuge Coulter photofuge Technord photocentrifuge Horiba cuvette photocentrifuges Seishin cuvette photocentrifuge Shimadzu cuvette photocentrifuge</p>	<p><b><u>การตกตะกอนแบบสะสม ชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง</u></b> <b><u>(Homogeneous, cumulative, centrifugal sedimentation)</u></b></p> <p>Alpine centrifuge Hosokawa Mikropul Sedimentation</p>
<p><b><u>การตกตะกอนแบบอินทรีย์เมทัลชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ทภายใต้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง</u></b> <b><u>(Line-start, incremental, centrifugal sedimentation)</u></b></p> <p>Joyce-Loebl disc photocentrifuge Brookhaven BI-DCP, disc photocentrifuge</p>	<p><b><u>การตกตะกอนแบบสะสม ชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ทภายใต้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง</u></b> <b><u>(Line-start, cumulative, centrifugal sedimentation)</u></b></p> <p>MSA analyzer</p>



รูปที่ 2.3 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการการวัดแบบอินคริเมนทัล

- ก. การตกตะกอนแบบอินคริเมนทัล ชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียว ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Homogeneous, incremental, gravitational sedimentation)
- ข. การตกตะกอนแบบอินคริเมนทัล ชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ท ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Line-start, incremental, gravitational sedimentation)

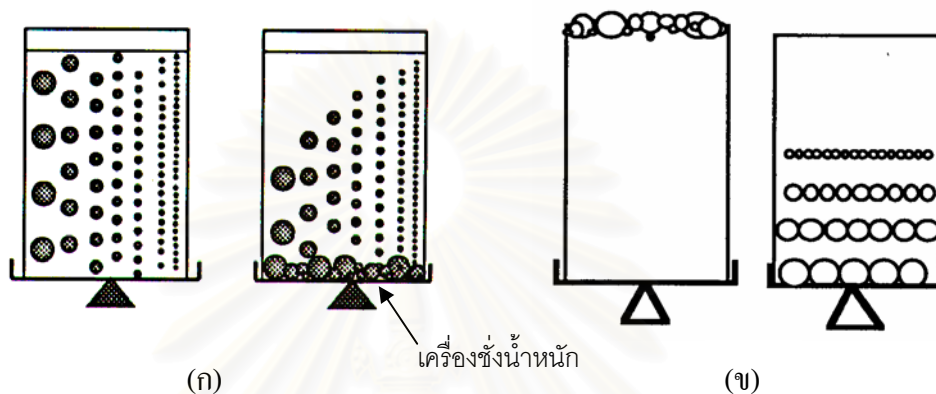


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้หลักการวัดแบบอินคริเมนทัล

การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการวัดแบบอินคริเมนทัล จะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ ระดับที่ทำกรวัด โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านระดับที่ทำกรวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ค่าความเข้มข้นของอนุภาค ณ ระดับที่ทำกรวัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลของอนุภาคตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสโตกส์ ที่คำนวณจากค่า

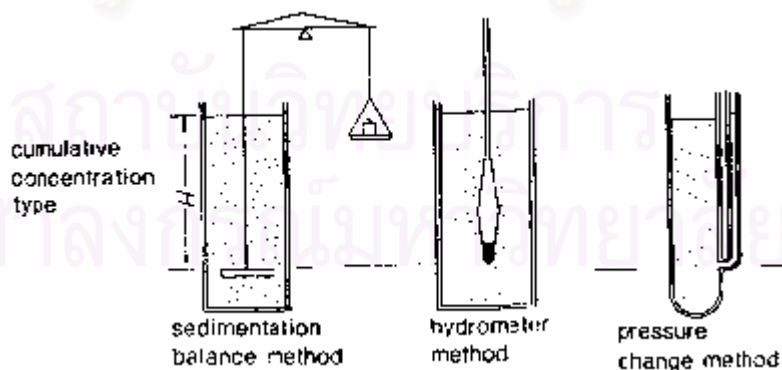


ความเร็วในการตกตะกอน ณ เวลาที่ทำกรวัด โดย ณ เวลาศูนย์ค่าความเข้มข้นจะมีค่าเท่ากับ 100% เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ (เทียบกับค่าความเข้มข้นที่เวลาเท่ากับศูนย์) มีค่าเท่ากับค่าสัดส่วนของมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคแบบอินทรีย์เมทัล ได้แก่ Pipette method, Hydrometer balance method และ Light extinction method ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 การวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการการวัดแบบสะสม

- ก. การตกตะกอนแบบสะสม ชนิดสารแขวนลอยแบบเนื้อเดียว ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Homogeneous, cumulative, gravitational sedimentation)
- ข. การตกตะกอนแบบสะสม ชนิดสารแขวนลอยแบบไลน์สตาร์ท ภายใต้แรงโน้มถ่วงโลก (Line-start, cumulative, gravitational sedimentation)

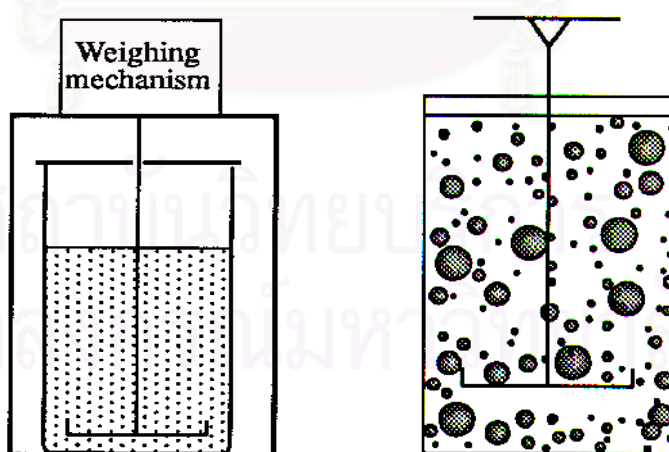


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้หลักการวัดแบบสะสม

สำหรับวิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคแบบสะสม จะวัดค่าความเข้มข้นของอนุภาค ตัวอย่างทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นวิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป ตัวอย่างของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้หลักการวัดแบบสะสม ได้แก่ Sedimentation balance method, Hydrometer method และ Pressure change method ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

### 2.2.3 การตกตะกอนแบบสะสมภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (Homogeneous cumulative gravitational sedimentation)

เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่พัฒนาขึ้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีการตกตะกอนแบบสะสมของอนุภาคภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยหลักการการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคของวิธีนี้คือการวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาคในสารแขวนลอยเนื้อเดียว (Homogeneous suspension) ซึ่งทำโดยการวัดน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนักที่แขวนอยู่ในสารแขวนลอย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนัก เวลาใดๆ จะประกอบด้วยอนุภาคสองส่วนคือ อนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ และสัดส่วนของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์



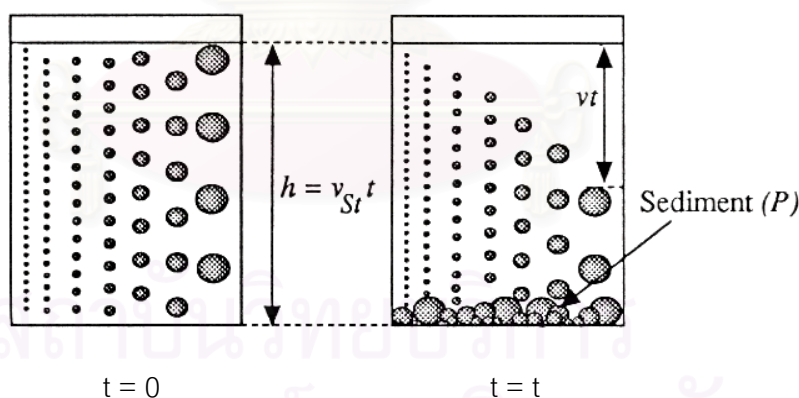
รูปที่ 2.7 หลักการวัดน้ำหนักของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนักซึ่งแขวนอยู่ในคอลัมน์ตกตะกอน

ทฤษฎีในการหาค่าการกระจายแบบสะสมขนาดของอนุภาค (mass oversize distribution) สำหรับวิธีการตกตะกอนแบบสะสมนี้คิดค้นโดย Oden และพัฒนาต่อโดย Coutts, Crowthers และ Bostock ก่อนอื่น นิยามค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปของสมการต่อไปนี้

$$W(D_{pst}) = \int_{D_{pst}}^{D_{p \max}} f(D_p) dD_p \quad (2.12)$$

โดย  $f(D_p)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค (% /  $\mu\text{m}$ )

$W$  คือค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ (weight percentage) ที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ( $D_{pst}$ ) ส่วนค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ ( $P$ ) ของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ จะประกอบด้วยค่าน้ำหนักสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่มีความเร็วในการตกตะกอนมากกว่าหรือเท่ากับ  $V_{st}$  โดยที่  $V_{st} = h/t$  และส่วนที่เหลือเป็นน้ำหนักของอนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนน้อยกว่า  $V_{st}$  แต่ตกตะกอนลงมาเนื่องจากอนุภาคเหล่านี้แขวนลอยอยู่ที่ความสูงระหว่างกลางใด ๆ ในคอลัมน์ของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การตกตะกอนแบบสะสมของอนุภาคที่แขวนลอยในสารแขวนลอยภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีของอนุภาคขนาดหนึ่งที่มีค่าความเร็วในการตกตะกอนเท่ากับ  $V$  ซึ่งน้อยกว่า  $V_{st}$  ค่าสัดส่วนของอนุภาคขนาดนี้ที่ตกตะกอนลงบนจานที่เวลา  $t$  จะมีค่าเท่ากับ  $Vt/h$  โดยที่  $h$  คือค่าความสูงของสารแขวนลอย และค่าความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคขนาดใดๆ คำนวณได้จาก

$$V = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)gD_p^2} \quad (2.13)$$

ดังนั้นค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$P(t) = \int_{D_{pst}}^{D_{pmax}} f(D_p)dD_p + \int_{D_{pmin}}^{D_{pst}} \frac{V(D_p)t}{h} f(D_p)dD_p \quad (2.14)$$

ทำการอนุพันธ์สมการที่ (2.14) เทียบกับเวลา และคูณด้วย  $t$  จะได้

$$t \frac{dP(t)}{dt} = \int_{D_{pmin}}^{D_{pst}} \frac{V(D_p)t}{h} f(D_p)dD_p \quad (2.15)$$

สมการที่ (2.14) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$P(t) = W(D_{pst}) + t \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.16)$$

เนื่องจากค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่ตกตะกอนบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ( $P$ ) และค่าเวลาในการตกตะกอน ( $t$ ) เป็นข้อมูลที่ทราบค่า ดังนั้นจึงสามารถหาค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์  $W(D_{pst})$  ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสต็อกส์ ได้โดยการสร้างกราฟระหว่างค่า  $P(t)$  กับ  $t$  และลากเส้นสัมผัสจากจุด  $(P, t)$  ใดๆ มาตัดกับแกนตั้ง โดยเส้นสัมผัสที่ลากจากจุด  $(P_{Dp}, t_{Dp})$  จะตัดแกนตั้งที่  $W(D_{pst})$  ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า  $D_{pst}$

#### 2.2.4 การคำนวณและการแสดงค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปของกราฟ

ข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญที่สามารถบอกถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุอนุภาค (particulate material) นอกเหนือจากข้อมูลทางด้านคุณลักษณะ เช่น รูปร่าง หรือองค์ประกอบของอนุภาค ดังนั้นการแสดงความการกระจายขนาดของอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะคำนวณและแสดงค่าการ

กระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

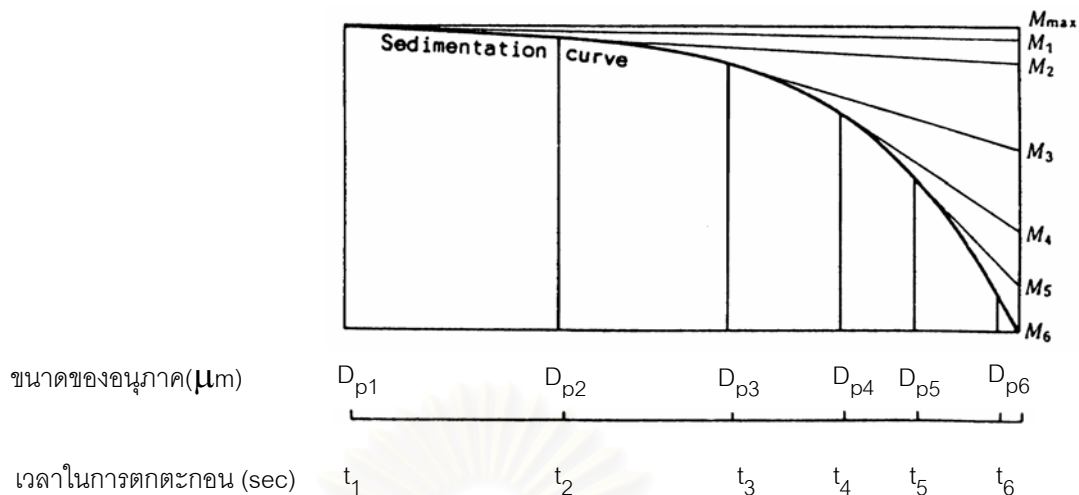
#### 2.2.4.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาค

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขนาดของอนุภาค  $D_{p1}, D_{p2}, \dots, D_{pi}$  ที่สอดคล้องกับเวลาในการตกตะกอน  $t_1, t_2, \dots, t_i$  โดยใช้สมการของสโตกส์

$$D_{pi} = \sqrt{\frac{18\mu h}{(\rho_p - \rho_f)g t_i}} * 10^{12} \quad (2.17)$$

โดยที่	$D_{pi}$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมโครเมตร)
	$t_i$	คือ	เวลาในการตกตะกอน (วินาที)
	$h$	คือ	ความสูงจากผิวของสารแขวนลอยถึงผิวจานรับน้ำหนัก (เมตร)
	$\mu$	คือ	ความหนืดของตัวกลาง (นิวตัน.วินาที/เมตร <sup>2</sup> ) หรือ (กิโลกรัม/เมตร.วินาที)
	$g$	คือ	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที <sup>2</sup> )
	$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	$\rho_f$	คือ	ความหนาแน่นของตัวกลาง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ณ เวลา ใดๆ โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าเวลาในการตกตะกอนกับค่าน้ำหนักอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก และทำการลากเส้นสัมผัส ณ จุดของเวลา  $t_1, t_2, \dots, t_i$  ที่สอดคล้องกับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค  $D_{p1}, D_{p2}, \dots, D_{pi}$  โดยค่า  $M_1, M_2, \dots, M_i$  ที่อ่านได้จากจุดที่เส้นสัมผัสตัดกับแกนตั้ง คือ ค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาด  $D_{p1}, D_{p2}, \dots, D_{pi}$  ตามลำดับ ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์กราฟการตกตะกอน

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคสำหรับอนุภาคที่มีขนาด  
ใหญ่กว่า  $D_{pi}$  โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q_i = \frac{M_i}{M_{max}} \quad (2.18)$$

โดยที่  $Q_i$  คือ การกระจายขนาดสะสมแบบเกินของอนุภาค (-)  
(oversize distribution, on mass basis)

$M_i$  คือ น้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  
ใหญ่กว่า  $D_{pi}$  ที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก (กรัม)

$M_{max}$  คือ น้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก  
ณ เวลาที่อนุภาคตกตะกอนหมดแล้ว (กรัม)

### 2.2.4.2 การแสดงค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปของกราฟ

การกระจายขนาดของอนุภาคสามารถแสดงด้วยกราฟ ทั้งในรูปกราฟการกระจายตัวแบบสะสม และกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ โดยสามารถแสดงผลได้ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติ และในกรณีที่ใช้สเกลล็อก ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาค ในรูปของกราฟการกระจายตัวแบบสะสม และกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติและในกรณีที่ใช้สเกลล็อก โดยรายละเอียดในการคำนวณสำหรับการแสดงผลดังต่อไปนี้

#### (1) กราฟการกระจายตัวแบบสะสม (cumulative size distribution)

แกนนอนของกราฟชนิดนี้จะแสดงค่าขนาดของอนุภาค ในขณะที่แกนตั้งของกราฟแสดงค่าการกระจายตัวแบบสะสม ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติและสเกลล็อก

#### (2) กราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ (relative size distribution)

การคำนวณหาการกระจายขนาดของอนุภาคแบบสัมพัทธ์จากผลการทดลอง จะมีสูตรในการคำนวณที่แตกต่างกันสำหรับกรณีที่ใช้แกนนอนของกราฟเป็นสเกลปกติและสเกลล็อก โดยมีรายละเอียดดังนี้

(2.1) ในกรณีที่ใช้แกนนอนของกราฟเป็นสเกลปกติ ค่าระยะห่างระหว่างอนุภาคขนาด  $D_{p_i}$  และ  $D_{p_{i+1}}$  คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\Delta D_{p_i} = D_{p_{i+1}} - D_{p_i} \quad (2.19)$$

โดยที่  $\Delta D_{p_i}$  คือ ระยะห่างระหว่างขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)  
 $D_{p_{i+1}}, D_{p_i}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมโครเมตร)

ค่าความสูงของคอลัมน์ระหว่างอนุภาคขนาด  $D_{p_i}$  และ  $D_{p_{i+1}}$  คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$q(D_{p_i}, D_{p_{i+1}}) = \frac{\Delta Q(D_{p_i}, D_{p_{i+1}})}{\Delta D_{p_i}} \quad (2.20)$$

$$\Delta Q(D_{p_i}, D_{p_{i+1}}) = Q(D_{p_i}) - Q(D_{p_{i+1}}) \quad (2.21)$$

โดยที่  $q(D_{p_i}, D_{p_{i+1}})$  คือ ค่าความสูงของคอลัมน์ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง  $D_{p_i}$  และ  $D_{p_{i+1}}$  (% /  $\mu\text{m}$ )

$Q(D_{pi})$  คือ ค่าการกระจายขนาดสะสมของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า  $D_{pi}$  (% oversize)

2.2) ในกรณีที่แกนนอนของกราฟเป็นสเกลแบบล็อก ค่าระยะห่างระหว่างขนาดของอนุภาค ( $\Delta \log D_{pi}$ ) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

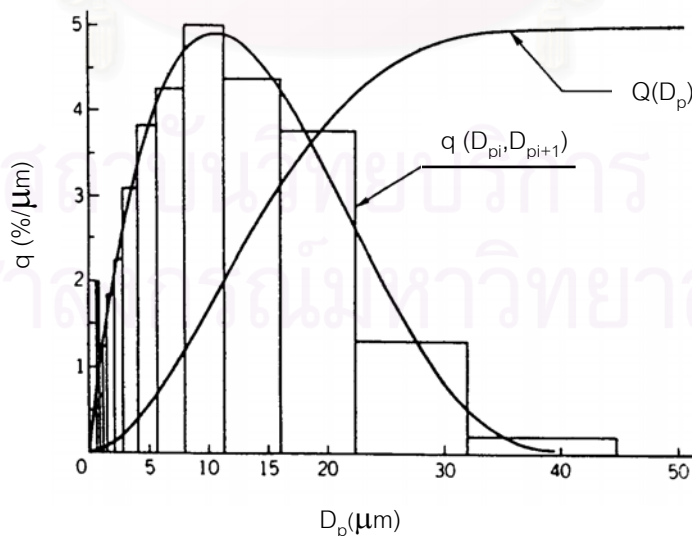
$$\Delta \log D_{pi} = \log \left( \frac{D_{pi+1}}{D_{pi}} \right) \tag{2.22}$$

ค่าความสูงของคอลัมน์ของอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง  $D_{pi}$  และ  $D_{pi+1}$  คำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$q^* (\log D_{pi}, \log D_{pi+1}) = \frac{\Delta Q(D_{pi}, D_{pi+1})}{\Delta \log D_{pi}} \tag{2.23}$$

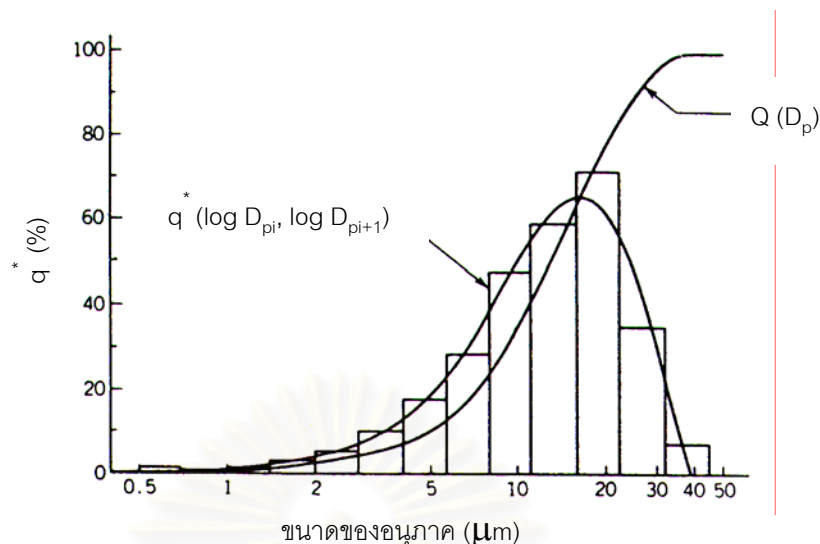
โดย  $q^* (\log D_{pi}, \log D_{pi+1})$  คือ ค่าความสูงของคอลัมน์ของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง  $D_{pi}$  และ  $D_{pi+1}$

รูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการแสดงผลการกระจายขนาดของอนุภาคในรูปแบบของกราฟจากข้อมูลการทดลองที่วัดได้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของกราฟการกระจายตัวแบบสะสมและกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ





รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของกราฟการกระจายตัวแบบสะสมและกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

### 2.3 ความรู้พื้นฐานของการคำนวณประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน

ปัจจุบันมีการตระหนักถึงปัญหามลภาวะอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์กำจัดฝุ่นที่เหมาะสมเพื่อกำจัดมลสารที่เกิดขึ้นก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเพิ่มความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น ไซโคลนที่ใช้เป็นอุปกรณ์กำจัดฝุ่นจากกระแสก๊าซในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อเด่นของไซโคลนคือมีโครงสร้างง่าย บำรุงรักษาง่าย และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย สามารถปล่อยอนุภาคฝุ่นที่เก็บได้ออกอย่างต่อเนื่อง ความดันสูญเสียไม่สูงเกินไป เหมาะกับก๊าซที่มีภาระของอนุภาคฝุ่นสูง สามารถนำมาใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ความดันสูงได้ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการบำบัดฝุ่นของไซโคลนก็ไม่ต่ำมาก คือประมาณร้อยละ 50-95 โดยมวล ดังนั้นไซโคลนจึงเป็นเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

### 2.3.1 ชนิดของไซโคลน

ไซโคลนแบ่งได้หลายชนิดได้แก่ แบบไหลเข้าในแนวสัมผัส, แบบไหลเข้าในแนวแกน, มัลติ-ไซโคลน, แบบเป่าลง, เจ็ตโคลน และเครื่องแยกอนุภาคฝุ่นแบบหมุน ในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส, แบบไหลเข้าในแนวแกน และมัลติ-ไซโคลน

#### 1. แบบไหลเข้าในแนวสัมผัส

ไซโคลนแบบนี้ยังแบ่งได้อีก 2 ประเภท คือ ชนิดปากทางเข้าในแนวสัมผัส และชนิดมีห้องวงแหวนเพื่อให้ไหลวนเข้าตลอดเส้นรอบวง โดยทั่วไปก๊าซสกปรกจะไหลเข้าด้วยความเร็วประมาณ 10-20 เมตร/วินาที ซึ่งความเร็วในช่วงนี้มีผลน้อยต่อประสิทธิภาพการเก็บฝุ่น แต่ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไป ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นก็อาจลดลงได้

#### 2. แบบไหลเข้าในแนวแกน

ไซโคลนแบบนี้แบ่งได้เป็น แบบไหลย้อนออก และแบบไหลตรงออก ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกนเกือบทั้งหมดจะเป็นชนิดไหลย้อนออกซึ่งสามารถบำบัดก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงถึงสามเท่าของแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสโดยที่ความดันสูญเสียมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงมักวางขนานกันหลายๆ ลูก (มัลติ-ไซโคลน) ความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซประมาณ 12 เมตร/วินาที และความดันสูญเสียประมาณ 80 มิลลิเมตรน้ำ

#### 3. มัลติ-ไซโคลน

ไซโคลนจะยิ่งจับอนุภาคได้ละเอียดมากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทรงกระบอกมีขนาดเล็กพอ แต่เมื่อไซโคลนมีขนาดเรียวยาวก็จะต้องบำบัดก๊าซได้ปริมาณน้อยลง ดังนั้นในกรณีที่ต้องการบำบัดก๊าซปริมาณมากและมีประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นสูง จึงต้องติดตั้งไซโคลนรูปเรียวยาวขนานกันหลายลูก ผลที่ได้คือไซโคลนที่มีชื่อเรียกว่า มัลติ-ไซโคลน หรือมัลติ-โคลน เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของแบบมัลติ-โคลนคือ 100 มิลลิเมตร ในกรณีบำบัดอนุภาคฝุ่นทั่วไป

### 2.3.2 ลักษณะการไหลในไซโคลน

ชิ้นส่วนสำคัญของโครงสร้างของไซโคลนคือ ทางเข้าของก๊าซที่ช่วยก่อให้เกิดวอร์เทกซ์ (vortex), ทางออกในแนวแกน (axial outlet) และช่องเปิดสำหรับปล่อยฝุ่นออก ซึ่งมีวิธีจัดวางทางเข้าของก๊าซและช่องปล่อยฝุ่นออกได้หลายวิธี

ลักษณะการไหลในไซโคลนแบบทั่วไป ก๊าซที่ไหลเข้าในแนวสัมผัสใกล้ด้านบนของตัวทรงกระบอกจะชักนำให้เกิดวอร์เทกซ์ หรือการไหลเวียนแบบก้นหอยในย่านระหว่างผนังของตัว

ไซโคลนและผนังของท่อทางออกของก๊าซในลักษณะที่หมุนวนลงข้างล่าง วอร์เทกซ์นี้ซึ่งเป็นวอร์เทกซ์แบบกึ่งอิสระ (semi-free vortex) จะหมุนวนและเคลื่อนลงจนต่ำกว่าผนังของท่อทางออกของก๊าซ แต่เมื่อไปถึงย่านๆ หนึ่งใกล้กับก้นของกรวย วอร์เทกซ์นี้จะกลับทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนจากเคลื่อนที่ลงเป็นเคลื่อนที่ขึ้นโดยที่ยังคงไว้ซึ่งการไหลหมุนวน นั่นคือวอร์เทกซ์จะเปลี่ยนเป็นแบบวอร์เทกซ์แบบบังคับ (forced vortex) ซึ่งเปรียบเสมือนการหมุนตัวของของแข็งในย่านระหว่างประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีของท่อทางออกของก๊าซกับแกนกลางของท่อทางออก

วอร์เทกซ์ในด้านในนี้จะเป็นย่านความดันต่ำและมีชื่อเรียกว่า แกน (core) รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะทั่วไปของวอร์เทกซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (eddy flow) ภายในไซโคลนธรรมดา สิ่งที่นำสังเกตในรูปที่ 2.12 พบว่ามีการไหลขึ้นของก๊าซเลียบผนังส่วนบนของทรงกระบอก ก๊าซที่ไหลเลียบขึ้นนี้จะพาเอาอนุภาคติดไปด้วย และไหลตัดเข้าด้านในแล้วจึงไหลลงเลียบผนังด้านนอกของท่อทางออกของก๊าซ การไหลนี้มีชื่อเรียกว่าการไหลวนย้อนกระแสหลัก (eddy flow) ในระหว่างที่ไหลเลียบลงผ่านขอบล่างของท่อทางออกของก๊าซ อนุภาคอาจหลุดออกติดไปกับก๊าซที่ไหลออกจากไซโคลนได้ ถ้าท่อทางออกของก๊าซยื่นลึกเข้าไปในทรงกระบอก การไหลวนย้อนกระแสหลักที่เกิดขึ้นจะยิ่งรุนแรง แต่ว่าการกำจัดส่วนที่ยื่นเข้านี้ให้หมดไปก็ไม่สามารถกำจัดการเกิดการไหลวนย้อนนี้ได้ ไซโคลนชั้นนำที่ผลิตขายจะมีการออกแบบพิเศษเพื่อป้องกันผลกระทบจากการไหลวนนี้

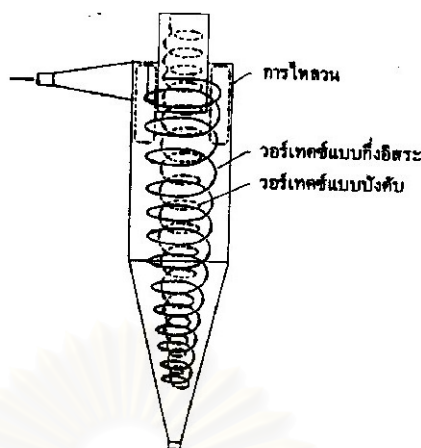
หนึ่งไซโคลนแบบก๊าซไหลเข้าในแนวแกนจะไม่เกิดการไหลวนย้อนกระแสหลัก

ความเร็วในแนวเส้นสัมผัส ( $V_t$ ) ของก๊าซในวอร์เทกซ์สามารถแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$V_t = V_{tp} \left( \frac{R_p}{R} \right)^n \quad (2.24)$$

เมื่อ	R	คือ	รัศมี (เมตร)
	$R_p$	คือ	รัศมีของตัวไซโคลน (เมตร)
	$V_t$	คือ	ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของก๊าซที่รัศมี R (เมตร/วินาที)
	$V_{tp}$	คือ	ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสของก๊าซที่มีรัศมี $R_p$ (ผนังของตัวไซโคลน) (เมตร/วินาที)
	n	คือ	ตัวเลขยกกำลัง (-)

ในกรณีของวอร์เทกซ์อิสระซึ่งไม่มีการสูญเสียความดัน n จะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนวอร์เทกซ์แบบกึ่งอิสระจะมีค่า n อยู่ในช่วง  $0 < n < 1$  แต่ในภาคปฏิบัติแล้ว n ของวอร์เทกซ์กึ่งอิสระในไซโคลนจะมีค่าระหว่าง 0.5-0.8 ส่วนในกรณีที่เป็นวอร์เทกซ์แบบบังคับ n จะมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 2.12 ลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (eddy flow) ภายในไซโคลนธรรมดา

## 2.4 ประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน

ประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลน สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\eta = \left[ 1 - \frac{W_0}{W_i} \right] * 100 \quad (2.25)$$

เมื่อ  $W_i$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในท่อที่ทางเข้าของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ( $\text{g/m}^3$ )

$W_0$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในท่อที่ทางออกของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ( $\text{g/m}^3$ )

สมการที่ (2.25) ใช้ได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่ท่อทางเข้าและทางออกมีค่าเท่ากันโดยทั่วไป อนุภาคฝุ่นที่มีอยู่ในก๊าซทิ้งจะมีอนุภาคขนาดต่างๆ กันผสมกันอยู่ในอัตราส่วนผสมต่างๆ กัน และการเก็บอนุภาคหยาบจะทำได้ง่ายกว่าอนุภาคละเอียด ดังนั้นทุกครั้งจึงต้องวัดประสิทธิภาพการเก็บสำหรับอนุภาคขนาดเล็กๆ ในช่วง  $D_p \pm \Delta D_p$  แทนการวัดประสิทธิภาพรวมของอนุภาคทุกขนาดที่มีอยู่ ค่าประสิทธิภาพเฉพาะช่วงนี้มีชื่อเรียกว่า ประสิทธิภาพย่อย (partial or grade efficiency) สำหรับช่วงขนาดอนุภาค  $D_p$  ประสิทธิภาพย่อยสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_{D_p} = \left( 1 - \frac{W_{0D_p}}{W_{iD_p}} \right) * 100 \quad (2.26)$$

ในที่นี้  $W_{iD_p}$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคในช่วง  $D_p \pm \Delta D_p$  ที่ท่อทางเข้าของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ( $g/m^3$ )

$W_{0D_p}$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคในช่วง  $D_p \pm \Delta D_p$  ที่ท่อทางออกของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น ( $g/m^3$ )

สำหรับไซโคลนนิยมหาประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นโดยใช้ขนาดตัด (cut size) ของอนุภาค,  $D_{pc}$  ในไซโคลนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu W_i}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho)}} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $D_{pc}$  คือ ขนาดตัดหรือขนาดของอนุภาค ที่ไซโคลนแยกได้ด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 50 (เมตร)

$N_e$  คือ จำนวนเชิงประสิทธิผลภายในไซโคลน  
( $N$  มีค่าประมาณ 8 สำหรับไซโคลนประสิทธิภาพสูง และมีค่าประมาณ 5 สำหรับไซโคลนทั่วไป)

$V_i$  คือ ความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซ (เมตร/วินาที)

$W_i$  คือ ความกว้างของปากทางเข้าของก๊าซ (เมตร)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

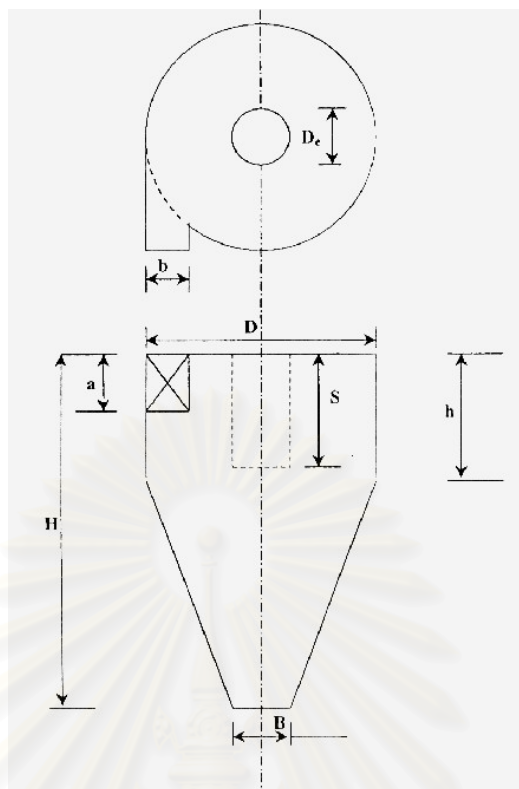
## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hideto Yoshida และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนาวิธีการวัดขนาดของอนุภาคที่นำเชื้อถ่าน โดยทำการศึกษาทั้งในแง่การทดลองและทางทฤษฎี ผลการทดลองพบว่าการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคถูกแก้วทรงกลม 3 ชนิดด้วยวิธีการตกตะกอนที่ปรับปรุงขึ้นและวิธีส่องกล้องจุลทรรศน์ (ใช้ Scanning Electron Microscope) มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ในกรณีของวิธีส่องกล้องจุลทรรศน์ พบว่าการผันแปรของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานโดยมวลของอนุภาคมีค่าลดลงเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับวิธีการตกตะกอนนั้น ผู้วิจัยได้แนะนำให้ใส่สารช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคลงในอนุภาคที่ต้องการทดสอบโดยตรง เพื่อให้ได้การ

กระจายตัวที่ดี จากนั้นจึงค่อยทำการผสมเตรียมตัวกลางภายในถังที่มีการสั่นสะเทือนแบบคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic) หนึ่งในกรณีของอนุภาคขนาดค่อนข้างใหญ่ ขนาดของอนุภาคที่วัดด้วยวิธีการตกตะกอนจะมีค่าต่ำกว่าขนาดที่วัดได้ด้วยวิธีส่องกล้องจุลทรรศน์ เนื่องจากว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรจะตกตะกอนในคอลัมน์ตกตะกอนเร็วเกินไป ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยเพิ่มระยะทางตกตะกอน

พีระพัฒน์ กฤตานุสรณ์ (2542) ได้สร้างเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยเทคนิคการตกตะกอนที่ต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกผลการทดลองอย่างออนไลน์ และประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น และโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดแบบใหม่โดยการประยุกต์วิธีการลดข้อมูลแบบนอนลิเนียร์หรือเทอเร็ทฟิอินเวอร์ชันของทูเมย์ (Twomey) จากผลวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐาน JIS พบว่า ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ (ทั้ง 2 โปรแกรม) ให้ค่าสอดคล้องกับค่ามาตรฐานจากเอกสารอ้างอิง

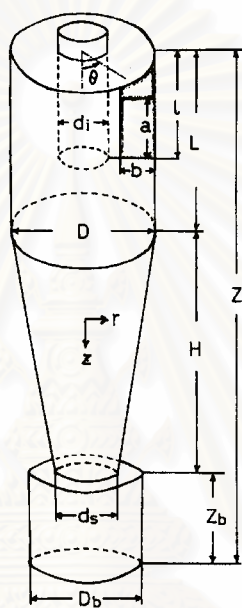
G. Ravi และคณะ (2000) ได้ใช้วิธี Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) เพื่อแก้ปัญหา multi-objective optimization โดยมีวัตถุประสงค์ให้ได้ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นสูงสุด และความดันสูญเสียต่ำสุดของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสและไหลย้อนออกที่มีขนาดเท่ากันต่อขนานกัน  $N$  ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้โมเดลของ Mothes และ Loffler ในการประเมินค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน เลือกใช้โมเดลของ Shepherd และ Lapple สำหรับประเมินค่าความดันสูญเสียของไซโคลน คณะผู้วิจัยได้เปรียบเทียบสัดส่วนเชิงเรขาคณิตที่เหมาะสม (optimal geometry) ที่ได้จากการทำออบติไมเซชัน (optimization) ณ สภาวะอ้างอิง ( $D_c/D = 0.4$ ,  $B/D = 0.325$ ,  $H/D = 4.5$ ,  $S/D = 0.4$ ,  $h/D = 1.1$ ,  $a/D = 0.4$ ,  $b/D = 0.15$ ) กับค่าของ Starimand ณ สภาวะที่ไซโคลนให้ประสิทธิภาพสูงสุด ( $D_c/D = 0.5$ ,  $B/D = 0.375$ ,  $H/D = 4.0$ ,  $S/D = 0.5$ ,  $h/D = 1.5$ ,  $a/D = 0.5$ ,  $b/D = 0.2$ ) พบว่ามีค่าสัดส่วนเหล่านี้แตกต่างกันพอสมควร จากการศึกษาพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของไซโคลนและวอร์เทกซ์ (vortex finder) และจำนวนของไซโคลนที่ถูกใช้ต่อกันในแนวขนาน เป็นตัวแปรที่สำคัญในการตัดสินใจที่ส่งผลต่อคำตอบของการทำออบติไมเซชัน (optimization solutions) งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการนำวิธี NSGA มาแก้ปัญหา multiobjective optimization ที่เกี่ยวข้องกับกาแยกก๊าซ - ของแข็ง



รูปที่ 2.13 แผนผังไซโคลนที่ใช้ในงานของ G. Ravi

Hideto Yoshida (1996) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไซโคลนที่มีการติดตั้งแผ่นเลื่อน (movable guideplate) ที่ช่องทางเข้า, กรวยที่ติดตั้งที่ฐานของไซโคลนซึ่งสามารถปรับระดับได้ (movable bottom cone) และมีการเป่าลง (blowdown) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทั้งในแง่การทดลองและทางทฤษฎี ผลจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยการใช้อสมการเนเวียร์ - สโตกส์ (Navier - Stokes) แบบสามมิติแสดงให้เห็นว่าลักษณะการไหลเปลี่ยนไปตามมุม (circumferential angle) โดยอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกจับบนผนังไซโคลนส่วนบน ส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะถูกจับบนผนังไซโคลนส่วนกรวย นอกจากนี้จากผลการจำลองยังยืนยันได้ว่าอนุภาคที่มีแรงเฉื่อยน้อยๆ จะเข้าสู่กล่องเก็บฝุ่นก่อนแต่ก็หลุดออกไปจากไซโคลนเนื่องจากองค์ประกอบความเร็วของก๊าซในทิศไหลขึ้น (upward velocity component) ค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากการทดลองจับอนุภาค monodisperse latex ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานโดยมวล = 0.33 - 2.95 ไมโครเมตร และอนุภาค Kanto Loam JIS No. 11 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานโดยมวล = 1.8 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลการคำนวณเมื่อปรับรูปแบบข้อมูลให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์อินเนเชีย (inertia parameter) นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของการเป่าลงที่ด้านบนของกล่องเก็บฝุ่น จากผลการจำลองพบว่าองค์ประกอบความเร็วทิศลงที่ใกล้กับส่วนกรวยของไซโคลนจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่มีการเป่าลง

การเป่าลง ดังนั้นอนุภาคขนาดจั่วที่ถูกจับบนผนังไซโคลอนจะเคลื่อนที่ลงใกล้กับผนังไซโคลอนส่วนกรวยและมีโอกาสเข้าสู่กล่องเก็บฝุ่นได้มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้การปรับแผ่นเลื่อน (movable guideplate) จะสามารถควบคุมขนาดตัดของอนุภาคได้ในช่วง 0.45 – 0.75 ไมโครเมตร อนึ่งเมื่อมีการปรับแผ่นเลื่อน (movable guideplate) ร่วมกับการเป่าลง (blowdown) พบว่าสามารถลดขนาดตัดของอนุภาคเหลือเพียง 0.4 ไมโครเมตร อนึ่ง การปรับระดับของกรวยที่ฐานไซโคลอน (bottom cone) เพื่อเลื่อนระยะห่างระหว่างขอบทางเข้ากล่องจับฝุ่นกับตำแหน่งของกรวยพบว่า สามารถเปลี่ยนขนาดตัดของอนุภาคจาก 0.9 เป็น 2.3 ไมโครเมตรได้



รูปที่ 2.14 ไซโคลอนที่ใช้ในการศึกษาของ Yoshida

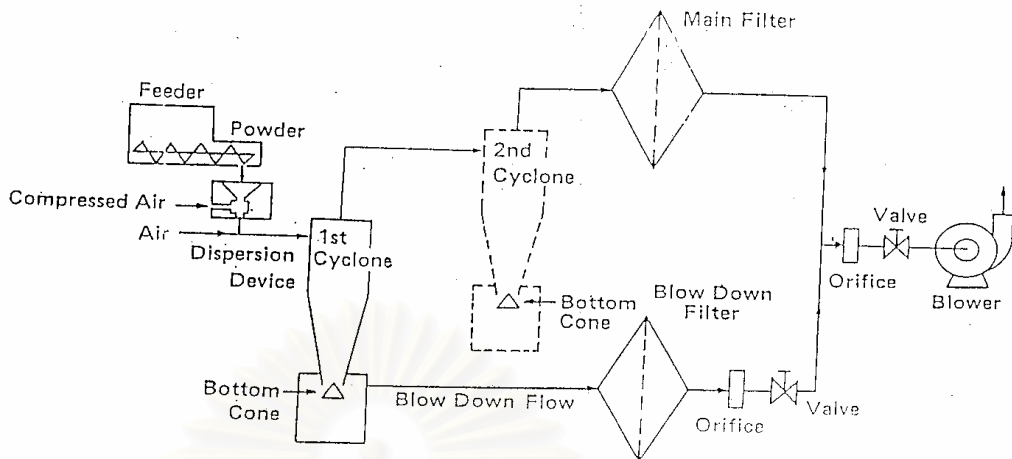
R.L. Salcedo (1993) ได้ศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นแก๊ลลอยที่ผ่านการร่อน (sieving) ขนาดรูเปิดขนาด 37 ไมโครเมตรและศึกษาการกระจายขนาดของฝุ่นแก๊ลลอยด้วยไซโคลอนแบบ Stairmand ที่มีประสิทธิภาพสูง (high-efficiency Stairmand-type cyclone) ต่ออนุกรม 3 ตัว โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยด้วยทฤษฎีของ Leith และ Licht, Dietz, Mothes และ Loffler, และ Li และ Wang จากผลการทดลองพบว่า ทฤษฎีของ Mothes และ Loffler ซึ่งแบ่งไซโคลอนออกเป็น 3 ส่วน (ส่วนที่ 4 จะจำเป็นต้องใช้เมื่อเกิดการหลุดลอยของอนุภาคกลับขึ้นมาใหม่) ร่วมกับหลักการของสัมประสิทธิ์การแพร่แบบมีขอบเขต (finite diffusivity) ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด อย่างไรก็ตามการขาดทฤษฎีที่เหมาะสมหรือสูตรที่ได้จากการทดลองเพื่อประมาณหาค่า effective turbulent diffusivity ภายใต้การไหลในไซโคลอนเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่อการใช้ทฤษฎีของ Mothes และ Loffler นอกจากนี้



อัตราการไหลที่มากขึ้นของก๊าซสกปรกที่เข้าสู่ไซโคลนและการเกิดการเกาะรวมตัวของอนุภาคขนาดจิ๋ว (agglomeration) เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองแตกต่างได้มากกว่าค่าที่ได้จากการทำนายด้วยทฤษฎี

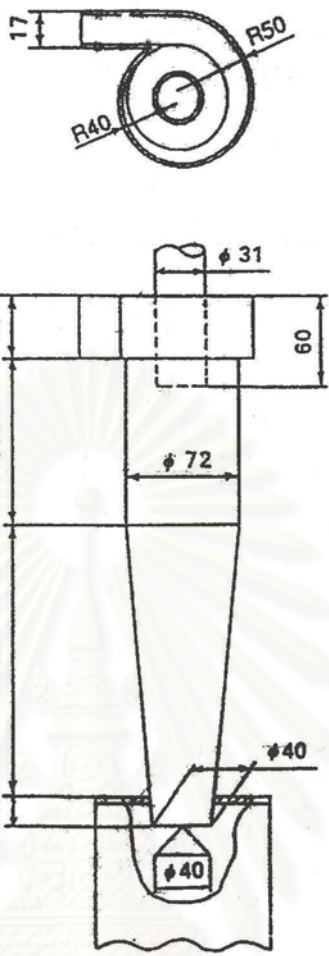
R. Clift และคณะ (1991) ได้ปรับปรุงโมเดลสำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสและก๊าซไหลออกในแนวแกนของ P.W. Dietz ซึ่งได้แบ่งบริเวณภายในไซโคลนเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนไหลเข้า (inlet region), ส่วนไหลลง (downflow region) และส่วนไหลขึ้น (upward region) โดย Dietz ได้สมมติให้ฟลักซ์สุทธิของอนุภาคที่เคลื่อนที่ลัดระหว่างบริเวณส่วนไหลลงกับส่วนไหลขึ้นเกิดขึ้นจากการดูลักษณะ 2 ชนิดคือ 1. ฟลักซ์ที่ทิศออกโดยไม่พิจารณาความเร็วของก๊าซที่ไหลเข้าไป และ 2. ฟลักซ์ที่มีทิศเข้าโดยไม่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง Dietz ได้ใช้วิธีคิดนี้เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ อย่างไรก็ตามวิธีคิดแบบนี้มีข้อด้อย 2 ข้อ คือ 1. วิธีคิดเช่นนี้เป็นการบ่งบอกว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฝุ่น ณ ขอบเขตระหว่างส่วนไหลขึ้นและส่วนไหลลง ไม่ต่อเนื่องซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริง และ 2. วิธีการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคว่าเป็นผลจากฟลักซ์สุทธิ 2 ชนิดที่มีทิศตรงข้ามกัน ไม่ได้สะท้อนถึงกระบวนการเคลื่อนที่ทางกายภาพที่ถูกต้อง ดังนั้น Clift และคณะได้แนะนำให้ใช้สมการคำนวณหาฟลักซ์ของอนุภาค ณ บริเวณขอบเขตระหว่างส่วนที่ไหลขึ้นและส่วนที่ไหลลง ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยใช้สมการของ Mothes และ Loffler เนื่องจากสมการนี้ได้อธิบายฟลักซ์สุทธิของอนุภาค ณ บริเวณรอยต่อ ว่าเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวรัศมีแบบแพร่ (radial particle dispersion) และการเคลื่อนที่ของอนุภาคอันเนื่องมาจากการพา (convective migration)

Yamada และคณะ (2545) ได้ทำการทดลองจับฝุ่นด้วยไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส โดยสร้างชุดการทดลองที่ประกอบด้วยไซโคลน 2 ตัว โดยตัวแรกจะมีการเป่าลง (blowdown) ที่กล่องเก็บฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 ซึ่งไซโคลนทั้ง 2 ตัวนี้จะมีกรวยที่ฐานของไซโคลน (bottom cone) อนุภาคที่ใช้ในการทดลองได้แก่  $Al_2O_3$  และอนุภาคมาตรฐาน  $CaCO_3$  JIS No. 17 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถจับและคัดแยกฝุ่นในระดับ sub-micron ได้ค่อนข้างดี



รูปที่ 2.15 ชุดการทดลองการจับฝุ่นด้วยไซโคลน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 ไส้โคจนที่ใช้ในการทดลองของ Yamada และคณะ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## การปรับเทียบค่าความชื้นของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS

การคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) สำหรับการวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนแบบสะสม เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการวิเคราะห์ผล เนื่องจากจะต้องทำการลากเส้นสัมผัสจากกราฟการตกตะกอนเพื่อหาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคต่อไป ในขั้นตอนการลากเส้นสัมผัสหากเราทำการลากเส้นสัมผัสโดยการประมาณจากสายตา บุคคลต่างคนก็จะลากเส้นที่ต่างกัน ซึ่งวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดเส้นสัมผัสที่เป็นมาตรฐานจากข้อมูลเพียงชุดเดียวกันที่กำหนดมาให้ ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่มีความแน่นอน และไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐาน JIS จึงถูกประดิษฐ์ขึ้น โดยมีชื่อว่าโปรแกรม AUTOCAL-JIS ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีความเที่ยงตรง และน่าเชื่อถือมากกว่า

อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความชื้น (อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ตกตะกอนต่อเวลา) ของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมนี้ บางส่วนมีค่าไม่ต่อเนื่อง ซึ่งค่าความชื้นเป็นค่าที่สำคัญมากเนื่องจากนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าการกระจายขนาดของอนุภาค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะปรับเรียบเส้นความชื้นของชุดข้อมูลโดยการใช้สมการถดถอยพหุนามอันดับสาม โดยสร้างเป็นโปรแกรมใหม่ที่มีชื่อว่าโปรแกรม AUTOCAL-JIS .v2

ในเบื้องต้นของบทที่ 3 นี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม และเนื่องจากงานนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของโปรแกรมซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

### 3.1 การสร้างเส้นสัมพันธ์

การประดิษฐ์เส้นสัมพันธ์ที่เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่กำหนดมาให้ จะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง และการหาค่าจุดตัดแกนตั้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1.2 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ในการทดลองเพื่อหาค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคตัวอย่าง คอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักที่ส่งมาจากเครื่องซังอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง ตลอดเวลาที่ทำกรทดลอง เนื่องจากค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องซังอิเล็กทรอนิกส์จะมีข้อมูลบางตำแหน่งที่มีการแกว่ง ซึ่งการแกว่งของค่าน้ำหนักนี้มาจากหลายสาเหตุ เช่น ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลอง ฯลฯ ทำให้ผลการทดลองที่ได้จะมีสัญญาณรบกวน (noise) ส่วนหนึ่งประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกไปก่อนจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

โปรแกรม AUTOCAL-JIS จะทำการขจัดสัญญาณรบกวนในข้อมูลโดยการสร้างเส้นกราฟที่แสดงแนวโน้มของข้อมูลในแต่ละช่วง โดยการลากเส้นกราฟผ่านข้อมูลเหล่านี้เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกไป โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) มาใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในที่นี้เราจะประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองในรูปของฟังก์ชัน

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \quad (3.1)$$

โดย  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่า และ  $e$  คือ ค่าความผิดพลาด (หรือค่าแตกต่าง) ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง ค่า  $e$  สามารถแสดงได้โดยการจัดรูปสมการที่ (3.1) ใหม่ ดังนี้

$$e = y - a_0 - a_1x - a_2x^2 \quad (3.2)$$

สมการที่ (3.2) แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาด (หรือค่าแตกต่าง) คือ ผลต่างระหว่างค่า  $y$  ที่ถูกต้องกับค่า  $y$  ที่ได้จากการประมาณ ( $a_0 + a_1x + a_2x^2$ ) ที่ทำนายโดยสมการพหุนามอันดับสอง

ขั้นตอนในการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองนี้ เริ่มจากการหาค่าความผิดพลาดทั้งหมด (E) ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลจำนวน n ข้อมูล ในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,\text{measured}} - y_{i,\text{model}})^2 \quad (3.3)$$

ในที่นี้เราทำการยกกำลังสองของค่าผลต่าง  $e_i$  เพื่อทำค่าที่อาจมีเครื่องหมายเป็นลบให้เป็นค่าบวก ดังนั้นสมการที่ (3.3) จะให้ความหมายของค่าความผิดพลาดทั้งหมด สมการที่ (3.3) สามารถเขียนได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2)^2 \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.4) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งไม่รู้ค่า ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) ที่ต้องการได้โดยวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาด E ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = -2 x_i \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = -2 x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \quad (3.7)$$

หลังจากนั้นกำหนดให้ค่าอนุพันธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ตามเงื่อนไขการหาค่าต่ำสุด ทำการจัดเรียงสมการเพื่อให้อยู่ในรูปแบบสมการทั่วไป จะได้

$$(na_0) + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_2 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.8)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.9)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a_1 + \left( \sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \quad (3.10)$$

สมการทั้งสามสมการข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ ( $a_0, a_1, a_2$ ) ของสมการพหุนามอันดับสองที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถหาได้โดยการแก้ชุดสมการที่ (3.11)

### 3.1.3 การประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสาม

สำหรับอนุภาคในช่วงต่างๆของการทดลอง จะเกิดการแกว่งตัวของน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้ความชันที่ได้จากหัวข้อ 3.2 ไม่ต่อเนื่อง ในขั้นตอนนี้จึงทำการปรับเรียบความชันในช่วงบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องให้มีค่าที่ต่อเนื่องมากขึ้น โดยการสร้างสมการถดถอยพหุนามอันดับสามระหว่างค่าเวลากับน้ำหนักที่คำนวณได้จากหัวข้อ 3.2 ณ ช่วงเวลาที่กำลังสนใจ ดังมีรายละเอียดดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^N (f_{\text{exp}}(t_i) - f(t_i))^2 \quad (3.12)$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าจากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ  
 $t$  คือ เวลา (วินาที)  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

และ  $f(t_i)$  สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$f(t_i) = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + a_3 t_i^3 \quad (3.13)$$

เมื่อ  $a_0, a_1, a_2, a_3$  คือ สัมประสิทธิ์ที่ต้องการทราบค่า  
 โดยมีเงื่อนไขในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้คือ

1. ความชันของข้อมูล ณ เวลาที่  $t = t_0$  ที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสามต้องมีค่าเท่ากับค่าความชันของชุดข้อมูล ณ เวลาเดียวกันที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง

$$f'_{\text{cubic}}(t_0) = f'_{\text{quadratic}}(t_0) \quad (3.14)$$

2. ความชันของข้อมูล ณ เวลาที่  $t = t_{n+1}$  ที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสามต้องมีค่าเท่ากับค่าความชันของชุดข้อมูล ณ เวลาเดียวกันที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง

$$f'_{\text{cubic}}(t_{n+1}) = f'_{\text{quadratic}}(t_{n+1}) \quad (3.15)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดได้โดยใช้วิธี Lagrange multiplier ร่วมกับการหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาด  $E$  ซึ่งสามารถเขียนรูปสมการทั้งหมดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้



$$\begin{bmatrix} n & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & 0 & 0 \\ t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & -0.5 & -0.5 \\ t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 & -t_0 & -t_{n+1} \\ t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 & t_1^6 & -1.5t_0^2 & -1.5t_{n+1}^2 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_{n+1} & 3t_{n+1}^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n t_i y_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 y_i \\ f'_{quadratic}(t_0) \\ f'_{quadratic}(t_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

จากนั้นแก้ชุดสมการ (3.16) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , และ  $a_3$

### 3.1.4 การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าจากกราฟการตกตะกอนทำได้โดยการสร้างเส้นตรงซึ่งลากให้สัมผัสกับเส้นกราฟ ณ จุดที่สนใจ โดยในที่นี้จะประดิษฐ์สมการเส้นตรงในรูปแบบของฟังก์ชัน

$$y = mx + b \quad (3.17)$$

โดยที่  $m$  และ  $b$  คือค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงค่าความชัน และค่าจุดตัดแกนตั้งตามลำดับ เนื่องจากได้มีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนโดยการสร้างสมการพหุนามอันดับสอง ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นค่าความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่ต้องการทราบค่านี้ จะมีค่าเท่ากับค่าอนุพันธ์ของสมการพหุนามอันดับสองที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่า ดังนี้

$$m = \frac{dy}{dx} \quad (3.18)$$

$$\therefore m = a_1 + 2a_2x \quad (\text{กรณีข้อมูลในช่วงที่ 1})$$

$$\text{หรือ} \quad m = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \quad (\text{กรณีข้อมูลในช่วงที่ 2 และ 3}) \quad (3.19)$$

แทนค่าสมการที่ (3.19) ลงในสมการที่ (3.17) จะได้

$$y = (a_1 + 2a_2x)x + b \quad (3.20)$$

จัดรูปสมการที่ (3.20) ใหม่ จะได้สมการคำนวณหาค่าจุดตัดแกนตั้ง ดังนี้

$$\begin{aligned} b &= y - a_1x - 2a_2x^2 \quad (\text{กรณีข้อมูลในช่วงที่ 1}) \\ \text{หรือ} \quad b &= y - a_1x - 2a_2x^2 - 3a_3x^3 \quad (\text{กรณีข้อมูลในช่วงที่ 2 และ 3}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

ดังนั้นค่าจุดตัดแกนตั้งสามารถคำนวณได้โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ ที่ได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์สมการถดถอยพหุนามอันดับสองหรือสาม และค่าของข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า  $(x, y)$  ลงในสมการที่ (3.21) การหาค่าจุดตัดแกนตั้งโดยวิธีการสร้างเส้นสัมผัสผ่านจุดที่ต้องการทราบค่าโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์สมการถดถอยพหุนามจะก่อให้เกิดชุดเส้นสัมผัสมาตรฐานเพียงชุดเดียวจากข้อมูลที่กำหนดมาให้

### 3.2 การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค

การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคทั้งการกระจายขนาดแบบสะสมและการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์จะทำการคำนวณตามวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดในบทที่ 2 (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.4) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติมบางสมการที่ใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคของโปรแกรม AUTOCAL-JIS

#### 3.2.1 สมการคำนวณขนาดอนุภาคใหญ่สุด

เนื่องจากสมการของสโตกส์นั้นใช้ได้เฉพาะกับการไหลในช่วงการไหลแบบชั้นๆ ที่ช้ามาก (slow laminar flow) เท่านั้น ดังนั้นขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวัดได้จะถูกกำหนดโดยค่าเลขเรย์โนลด์ โดย JIS Z 8820 กำหนดให้เลขเรย์โนลด์มีค่าไม่เกิน 0.4 เพราะเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะไม่เป็นการเคลื่อนที่แบบชั้นๆ อย่างสมบูรณ์ และสถานะความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นทางด้านหลังของอนุภาคที่กำลังตกตะกอนจะทำให้อนุภาคตกตะกอนด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วที่ทำนายโดยสมการของสโตกส์

สำหรับอนุภาคที่มีรูปร่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แท้จริงสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\pi}{6}(\rho_p - \rho_f)D_p^3 = \frac{24}{Re_p} \frac{\pi D_p^2 \rho_f V_{st}^2}{4 \cdot 2} \quad (3.22)$$

จากสมการค่าเลขเรย์โนลด์สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$V_{st} = \frac{Re_p \mu}{\rho_f D_p^2} \quad (3.23)$$

แทนค่า  $V_{st}$  ลงในสมการที่ (3.22) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ดังนี้

$$D_p = \left( \frac{18 \mu^2 Re_p}{(\rho_p - \rho_f) \rho_f g} \right)^{1/3} \quad (3.24)$$

แทนค่า  $Re_p = 0.4$  ลงในสมการที่ (3.24) จะได้สมการคำนวณขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวัดได้อย่างถูกต้องโดยวิธีการตกตะกอน ดังนี้

$$D_{pmax} = \left( \frac{7.2 \mu^2}{(\rho_p - \rho_f) \rho_f g} \right)^{1/3} * 10^6 \quad (3.25)$$

โดย  $D_{pmax}$  คือ ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดที่สามารถวัดด้วยวิธีของสโตกส์ (ไมโครเมตร)

ยกตัวอย่างเช่นในกรณีการตกตะกอนของอนุภาคในตัวกลางที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง ( $\mu = 1 \text{ cp} = 0.001 \text{ kg/m.s}$ ) ค่า  $D_{pmax}$  จะเท่ากับ 90.2, 71.6, 62.6  $\mu\text{m}$  สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 2000, 3000 และ 4000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่ต้องการวัดตัวอย่างที่มีขนาด

$D_{pmax}$  โตขึ้นจะต้องใช้ของเหลวที่มีความหนืดสูงขึ้น เช่นในกรณีของของเหลวคล้ายน้ำที่มีค่า  $\mu = 100$  cp ค่า  $D_{pmax}$  จะเท่ากับ 1,944, 1543, 1348  $\mu\text{m}$  สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 2000, 3000 และ 4000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

### 3.2.2 สมการคำนวณขนาดอนุภาคเล็กสุด

ขนาดอนุภาคเล็กสุดที่สามารถวัดได้จากวิธีการตกตะกอน คือ ขนาดของอนุภาคที่เล็กสุดที่เคลื่อนที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีอิทธิพลของแพร่ (Brownian motion)

โดยทั่วไปขนาดอนุภาคเล็กสุดที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่อนุภาคจะต้องใช้ในการตกตะกอน เนื่องจากในการทดลองที่ต้องใช้เวลานานๆ มักจะเกิดปรากฏการณ์การพาตามธรรมชาติ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างไม่สม่ำเสมอของสารแขวนลอย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการระเหยของตัวกลางจากผิวบน จากเหตุผลดังกล่าววิธีวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนโดยทั่วไปจึงมักใช้วัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป

โปรแกรม AUTOCAL-JIS จะคำนวณขนาดอนุภาคเล็กสุดจากค่าเวลาสิ้นสุดของการทดลอง โดยอาศัยสมการดังนี้

$$D_{pmin} = \sqrt{\frac{18\mu h}{(\rho_p - \rho_f)gt_{final}}} * 10^{12} \quad (3.26)$$

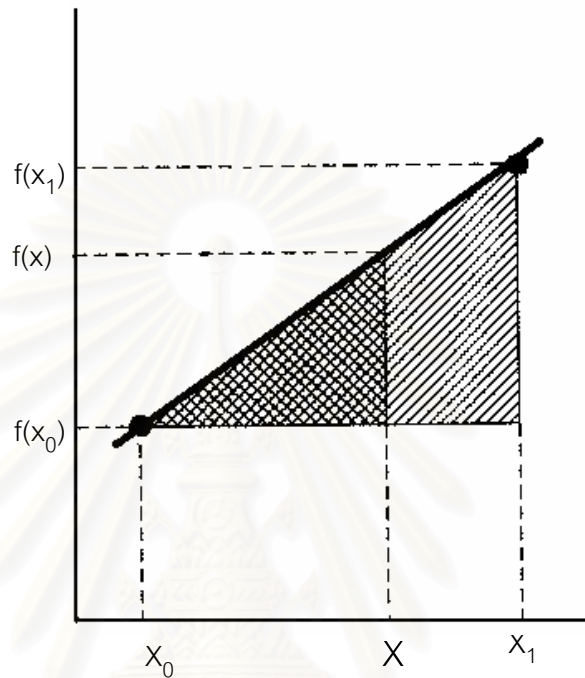
โดย  $D_{pmin}$  คือ ขนาดอนุภาคเล็กสุดของโปรแกรม AUTOCAL-JIS (ไมโครเมตร)

$t_{final}$  คือ เวลาสิ้นสุดการทดลอง (วินาที)

### 3.2.3 สมการคำนวณหาขนาดของอนุภาคที่ % oversize ที่กำหนด

เนื่องจากข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณวิเคราะห์ข้างต้นเป็นข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูง แต่จะมีข้อมูลเฉพาะตำแหน่งในจำนวนจำกัดเท่านั้น ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) มาใช้ในการประมาณค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่ต้องการหาค่า กล่าวคือจะคำนวณหาขนาดของอนุภาคที่อยู่ตามตำแหน่งต่างๆ นอกเหนือจากตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ โดยการนำข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆ

(discrete data points) มาสร้างเป็นกลุ่มของกราฟโดยใช้ฟังก์ชันต่อเนื่อง (continuous function) ซึ่งฟังก์ชันที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่เพียงแต่จะบ่งบอกค่าตามตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณเท่านั้น แต่จะบอกค่า ณ จุดใดๆ ระหว่างตำแหน่งต่างๆ ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น โดยการสร้างสามเหลี่ยมคล้าย

ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นสามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้ ดังนี้

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (3.27)$$

สมการที่ (3.27) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (3.28)$$

สมการที่ (3.28) คือ สูตรการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear-interpolation formula)

### 3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน ที่มีการปรับเรียงความชัน เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน (Compaq Visual Fortran V6.1) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input operation)
- ขั้นตอนการประมวลผล (Computation)
- ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล (Output operation)

แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input operation)

ข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคมีดังต่อไปนี้

ข้อมูลสำหรับหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

- ระยะห่างของเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลน้ำหนักแต่ละจุด (วินาที)
- จำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- จำนวนจุดของข้อมูลที่จะย้อนกลับเพื่อนำมาประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองชุดถัดไป
- จำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการหาค่า

ข้อมูลจำเพาะของการทดลอง

- ความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่าง ( $\rho_p$ , กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- ความหนาแน่นของตัวกลาง ( $\rho_f$ , กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- ความหนืดของตัวกลาง ( $\mu$ , นิวตัน.วินาที/เมตร<sup>2</sup>)
- ระยะทางในการตกตะกอน (ความสูงจากจานรองถึงผิวของตัวกลาง) (เมตร)
- มวลของอนุภาคส่วนที่ไม่ตกตะกอน (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 6.3.4) (กรัม)

### หมายเหตุ

1. โดยปกติจะบันทึกข้อมูลออนไลน์ทุกวินาที แต่ผู้วิเคราะห์สามารถสั่งให้เก็บข้อมูลทุกวินาทีที่ได้ในการทำการทดลอง
2. เพื่อให้การพิດเส้นกราฟการทดลองทำได้อย่างแม่นยำ และเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ การใส่จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง จะต้องใส่ข้อมูลแยกกันสำหรับชุดข้อมูลแต่ละชุด (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2)
3. จำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองสามารถเลือกได้ตั้งแต่จำนวน 4 จุด จนถึงจำนวนข้อมูลทั้งหมดของอนุภาคในส่วนนั้น
4. โดยปกติข้อมูลในส่วนแรกที่ได้จากการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2) จะเป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนักอย่างรวดเร็ว และเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (noise) น้อย ดังนั้นการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามของข้อมูลส่วนนี้จะใช้จำนวนจุดของข้อมูลไม่มากนัก ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของข้อมูลที่มี แต่โดยทั่วไปมักมีค่าไม่เกิน 1000 จุด ส่วนข้อมูลในส่วนที่สองเป็นข้อมูลที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เร็วมากและมีแนวโน้มที่จะคงที่ ดังนั้นในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามของข้อมูลส่วนนี้จะใช้จำนวนข้อมูลมากกว่าข้อมูลในส่วนแรก โดยขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของข้อมูลที่มี แต่ไม่เกิน 2000 จุด สำหรับข้อมูลส่วนสุดท้ายเป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้ามาก และมีจำนวนมากที่สุด ข้อมูลในส่วนนี้มักจะเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ ดังนั้นในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามจึงต้องใช้ข้อมูลจำนวนที่มากพอที่จะสามารถขจัดสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าไม่เกิน 5000 จุด
5. เพื่อให้การพิດเส้นกราฟในแต่ละช่วงมีการเชื่อมต่อกันอย่างราบรื่นจึงมีการใช้จุดข้อมูลจำนวนหนึ่งที่ซ้ำกัน (overlap) ระหว่างช่วงปัจจุบันและช่วงก่อน ซึ่งเรียกว่าจุดข้อมูลที่จะย้อนกลับ จากการทดลองแบบสุ่ม (trials and errors) ในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจำนวนจุดข้อมูลย้อนกลับควรเป็นประมาณ 50 % ของจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามในแต่ละช่วง
6. จำนวนจุดของข้อมูลที่จะย้อนกลับสามารถเลือกได้ตั้งแต่จำนวนศูนย์จุด จนถึงจำนวน 80% ของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนาม
7. จำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการประมวลค่าและสามารถป้อนให้กับโปรแกรม AUTOCAL-JIS จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 30 จุด แต่จากการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ

พบว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่เหมาะสมควรใช้ประมาณ 20 จุด เพราะการกำหนดจำนวนจุดของผลลัพธ์มากกว่านี้อาจจะก่อให้เกิดการแกว่งตัวของฟังก์ชันการกระจายขนาดและค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่คำนวณได้

### 3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล

เมื่อใส่ข้อมูลสำหรับการหาค่าจุดตัดแกนตั้ง และข้อมูลจำเพาะของการทดลองเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปโปรแกรมจะเริ่มทำการประมวลผลเพื่อคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การตรวจสอบข้อมูลในแฟ้มข้อมูล

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะนับจำนวนข้อมูลการทดลองทั้งหมดที่เก็บอยู่ในแฟ้มข้อมูลพร้อม

ทั้งตรวจสอบหาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับข้อมูลในแฟ้มข้อมูล เพราะในการทำการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักรวมที่ซึ่งได้ตามเวลาแบบ on-line ซึ่งการบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ แบบ on-line อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นระหว่างการบันทึกข้อมูลได้ ต่อจากนั้น โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าน้ำหนักสุทธิของอนุภาคที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก โดยการลบค่าน้ำหนักรวมเมื่อเริ่มทำการเก็บข้อมูล (เวลา  $t = 0$ ) ออกจากค่าน้ำหนักรวม ณ เวลา  $t$  ใดๆ หลังจากเริ่มเก็บข้อมูล

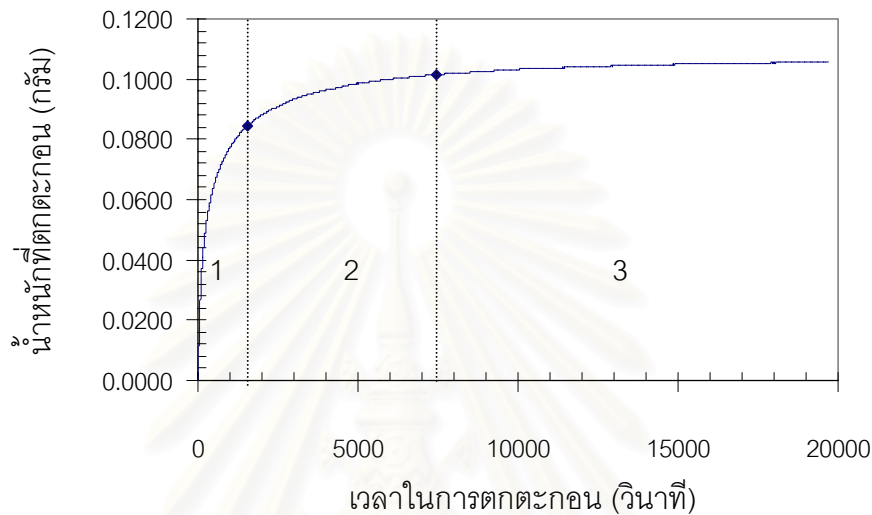
#### ขั้นตอนที่ 2 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนาม

ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง โปรแกรมจะแบ่งข้อมูลการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้ปริมาณน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการแบ่งรูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนตามค่าน้ำหนักที่กำหนดให้ (ค่ามาตรฐานของโปรแกรมคือ 80 และ 96 เปอร์เซ็นต์) โดยข้อมูลในส่วนแรกจะประกอบด้วยข้อมูลตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงข้อมูลที่มีค่าน้ำหนักเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่ตกตะกอนบนจานรับน้ำหนัก ข้อมูลส่วนที่สองจะประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าน้ำหนักของอนุภาคอยู่ระหว่าง 80 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลในส่วนสุดท้ายจะประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมดที่มีค่าน้ำหนักมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่ตกตะกอนบนจานรับน้ำหนัก



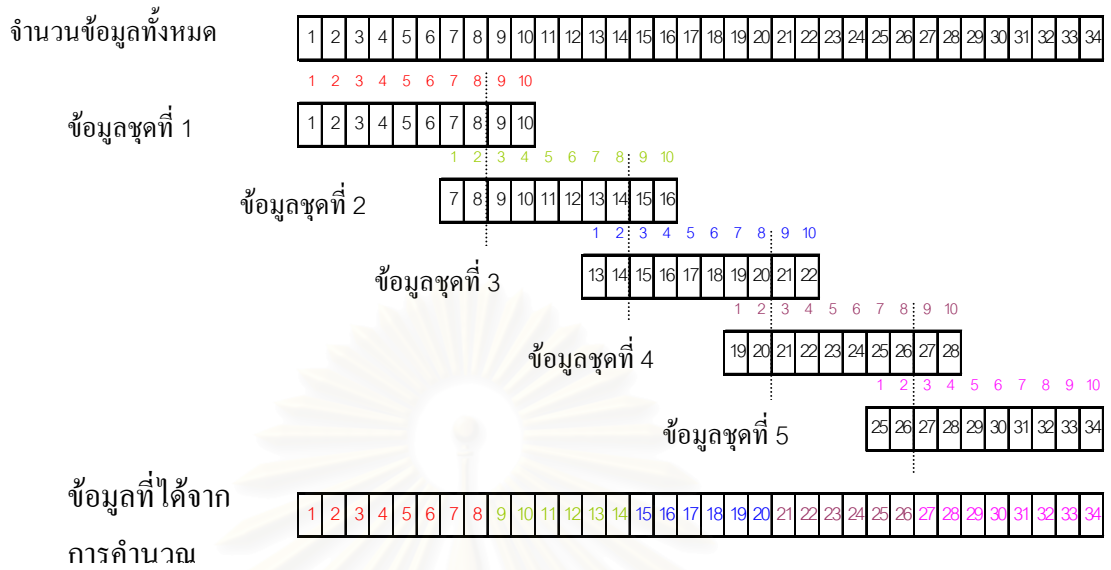
### หมายเหตุ

ในกรณีที่อนุภาคตัวอย่างมีลักษณะการกระจายขนาดแบบกว้างมาก ให้เปลี่ยนเกณฑ์น้ำหนักที่ใช้ในการแบ่งข้อมูลจาก 0.8/0.96 เป็น 0.6/0.8 จะทำให้สามารถพิงเส้นกราฟได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยใช้ปริมาณน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง

ต่อจากนั้น โปรแกรมจะทำการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองระหว่างข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอน ( $y$ ) กับข้อมูลเวลาในการตกตะกอน ( $x$ ) โดยโปรแกรมจะทำการแบ่งข้อมูลใน 3 ส่วนหลักที่แบ่งในตอนต้นออกเป็นช่วงสั้นๆ ตามจำนวนจุดของข้อมูลที่กำหนดมาให้ และทำการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของข้อมูลแต่ละชุด โดยอาศัยระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการเลือกตัวหลัก (pivoting) ในการแก้สมการที่ (3.11) เพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้จัก  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  หลังจากนั้น โปรแกรมจะทำการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองของข้อมูลชุดถัดไป โดยจะมีการนำข้อมูลของชุดข้อมูลชุดเดิมจำนวนหนึ่งมาเป็นส่วนประกอบของชุดข้อมูลชุดถัดไป เพื่อเสริมความเข้าใจ จะอธิบายโดยยกตัวอย่างให้ดู ตัวอย่างในรูปที่ 3.3 เป็นการสร้างฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของข้อมูลส่วนหนึ่งที่ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้นจำนวน 34 ข้อมูล โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 10 ข้อมูล และกำหนดให้ใช้ข้อมูลของชุดข้อมูลที่อยู่ด้านหน้าจำนวน 4 ข้อมูล ในการสร้างชุดข้อมูลชุดถัดไป จากข้อกำหนดข้างต้น ข้อมูล 1 ส่วนของข้อมูลตัวอย่างที่กำหนดมาให้จะสามารถประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองได้จำนวน 5 ฟังก์ชัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการสร้างชุดข้อมูลย่อยเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

สำหรับการประดิษฐ์สมการถดถอยพหุนามอันดับสาม จะนำข้อมูลเวลาและน้ำหนักของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2 และ 3 ดังรูปที่ 3.2 มาคำนวณหาค่าน้ำหนักและความชันใหม่โดยใช้สมการถดถอยพหุนามอันดับสาม ดังในสมการ (3.16) จากนั้นแก้ชุดสมการโดยอาศัยระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการเลือกตัวหลัก (pivoting)

### ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

ค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.21) เพราะค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ (ค่า  $y$ ) และค่าเวลาในการตกตะกอน (ค่า  $x$ ) เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ส่วนสัมประสิทธิ์  $a_1, a_2, a_3$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุนามอันดับสองหรือสามที่ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับข้อมูล ณ จุดนั้น ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา  $t$  ใดๆ ได้โดยการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (3.21)

#### ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค

ในการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค โปรแกรมจะหาค่ามวลของอนุภาคทั้งหมดที่สะสมบนจานรับน้ำหนักจากชุดของข้อมูลจุดตัดแกนตั้งที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พร้อมทั้งคำนวณค่าขนาดของอนุภาคใหญ่สุด ( $D_{pmax}$ ) และค่าขนาดของอนุภาคเล็กสุด ( $D_{pmin}$ ) จากสมการที่ (3.25) และสมการที่ (3.26) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้คำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยโปรแกรมจะคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.4)

โปรแกรม AUTOCAL- JIS จะมีการคำนวณ 2 แบบให้เลือก คือ การคำนวณสำหรับการแสดงผลด้วยกราฟโดยใช้สเกลปกติ และการคำนวณสำหรับการแสดงผลด้วยกราฟโดยใช้สเกลล็อก ซึ่งการคำนวณทั้งสองแบบจะใช้สูตรในการคำนวณที่แตกต่างกัน (ดูหัวข้อ 2.2.4)

หลังจากโปรแกรมทำการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐาน JIS เสร็จสิ้น ขั้นตอนต่อไปโปรแกรมจะคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน ( $D_{p50}$ ) และค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง %oversize ที่กำหนดโดยใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น โดยอาศัยสมการที่ (3.23) พร้อมทั้งคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค

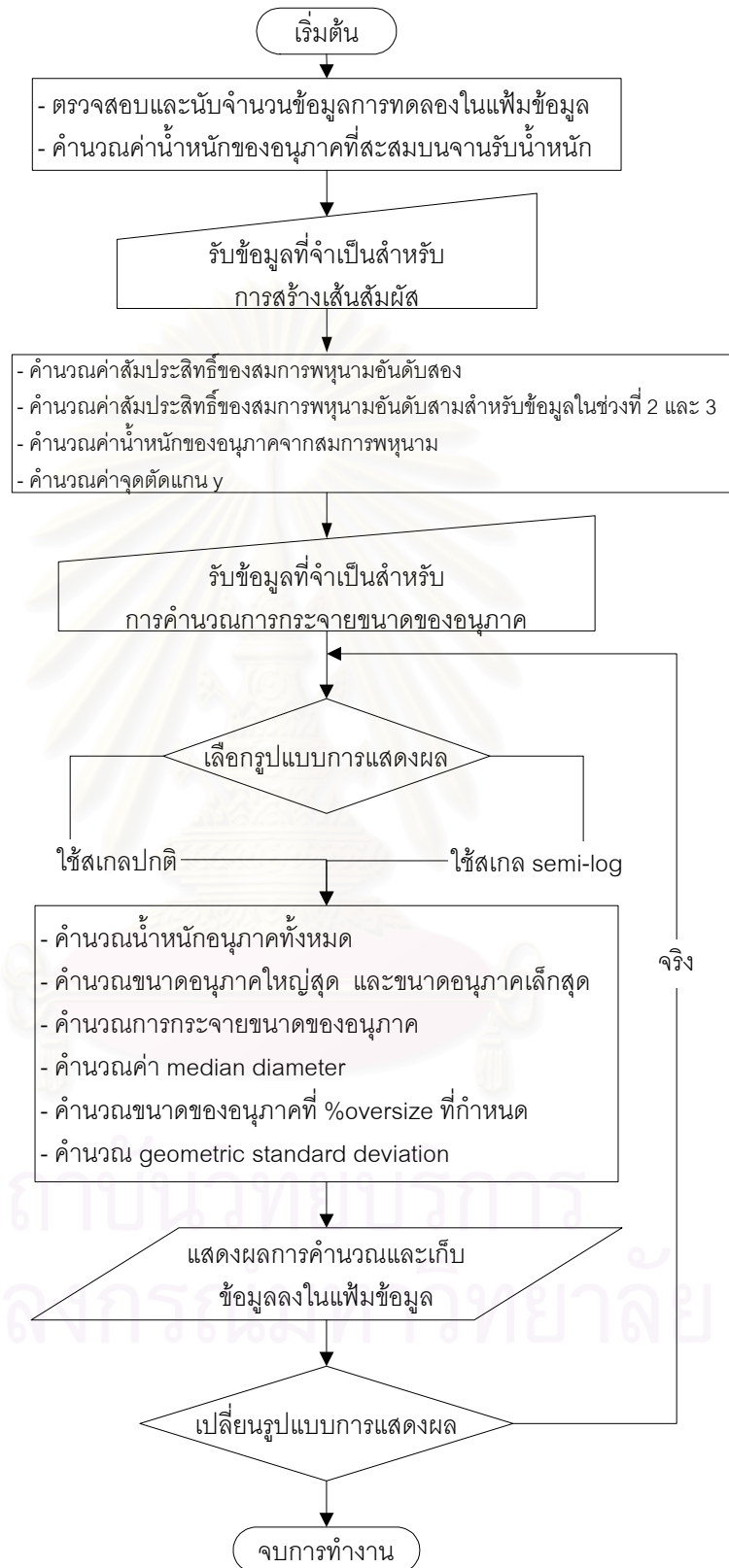
#### 3.3.3 ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล (Output operation)

เมื่อขั้นตอนการประมวลผลเสร็จสิ้นจะได้ข้อมูลทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคแบบสะสมและแบบสัมพัทธ์ สำหรับการแสดงผลโดยใช้สเกลปกติ และสำหรับการแสดงผลโดยใช้สเกลล็อก พร้อมทั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน, ข้อมูลขนาดของอนุภาคที่ % oversize ที่กำหนด และเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค

เมื่อนำข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคมาพิจารณาหรือเขียนเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรม EXCEL ก็จะได้กราฟการกระจายขนาดของอนุภาค ทั้งกราฟแบบสะสมและกราฟแบบสัมพัทธ์ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการแสดงผลการกระจายขนาดของอนุภาคตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกผลการคำนวณทั้งหมดลงในแฟ้มข้อมูลเพื่อเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบ และการนำข้อมูลมาใช้งานภายหลัง

ในการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลมาเขียนเป็นกราฟด้วยโปรแกรม EXCEL จะกำหนดให้แกนอนแสดงค่าขนาดของอนุภาค ส่วนแกนตั้งเป็นค่าการกระจายขนาด สำหรับในการแสดงผลโดยใช้สเกลล็อกจะต้องสั่งให้โปรแกรม EXCEL กำหนดให้แกนอนเป็นสเกลแบบล็อก

ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL –JIS) สามารถแสดงวิธีการทำงานอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL-JIS)

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 4.1.1 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่เป็นต้นแบบ เป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการการทำงานแบบตกตะกอนตามมาตรฐาน JIS แต่ได้นำเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องซิงโครตรอนิกส์เข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูล และประมวลผล

##### 4.1.2 เครื่อง Homogenizer

เครื่อง Homogenizer รุ่น ULTRA-TURRAX<sup>®</sup> T25 จากบริษัท IKA-LABORTECHNIK เป็นเครื่อง high-speed dispersing และ emulsifying ที่สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ให้มีค่าระหว่าง 8000 ถึง 24,000 รอบต่อนาที โดยที่ความเร็ว 24,000 รอบต่อนาที จะมีกำลังไฟประมาณ 300 วัตต์

##### 4.1.3 เครื่องผสมรูปตัววี

เครื่องผสมรูปตัววี (V-shape Mixer) จากบริษัท Tokujū Corporation มีลักษณะคล้ายเครื่องผสมรูปตัววีชนิดโปร่งใส แต่มีขนาดใหญ่กว่า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 เซนติเมตร และมีช่องเปิดสำหรับเทสารออกบริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง เครื่องผสมนี้ไม่สามารถปรับความเร็วรอบในการผสมได้ มักใช้สำหรับการผสมสารในปริมาณมาก

##### 4.1.4 เครื่องผสมรูปตัววีชนิดโปร่งใส (Transparent Micro V-mixer)

จากบริษัท Tsutsui Scientific Instrument Co., Ltd. รุ่น S3-VGS ประกอบด้วยภาชนะทรงกระบอกสเตนเลสรูปตัววี มีฝาเปิดพลาสติกใสที่ด้านบนของทรงกระบอกทั้ง 2 ด้าน สำหรับใส่สารและนำสารออก ภาชนะทรงกระบอกรูปตัววีจะต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ ซึ่งจะหมุนเพื่อใช้ในการผสม ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ 10 ระดับ และตั้งเวลาในการผสมได้ เครื่องผสมแบบนี้ให้การผสมแบบ inter-mixing เท่านั้น และมีอัตราความเร็วในการผสมค่อนข้างต่ำ วัสดุที่ต้องการผสมควรจะให้เข้าไปในเครื่องผสมประมาณ 30-50 % ของปริมาตรรวมของภาชนะ



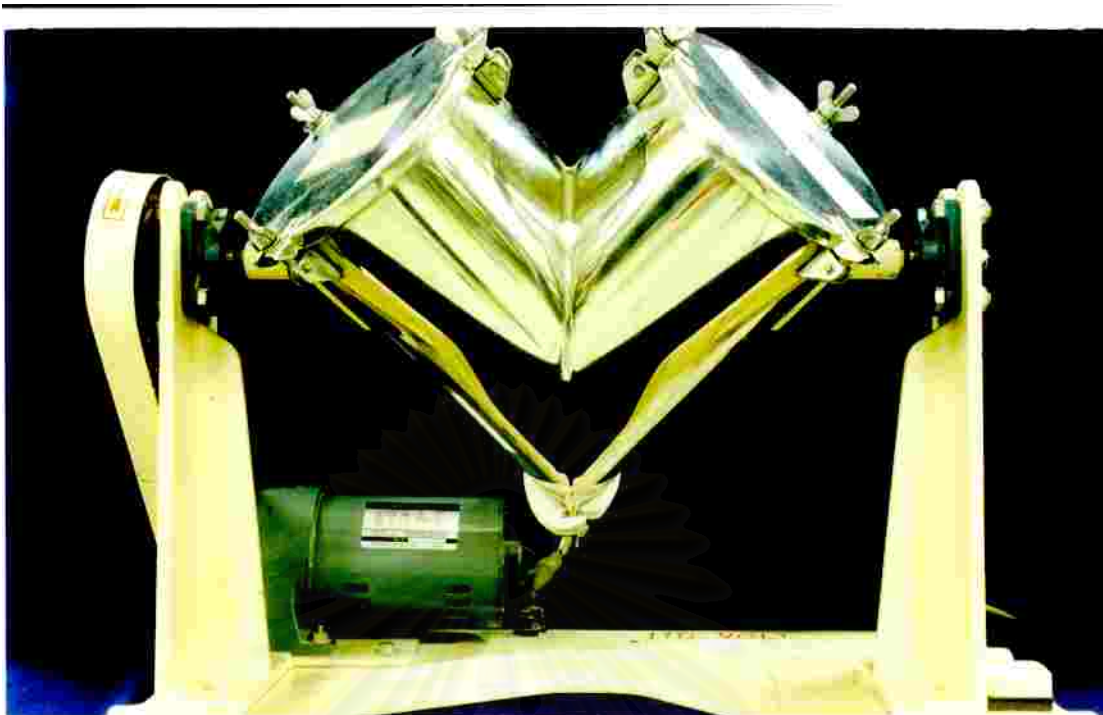
รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

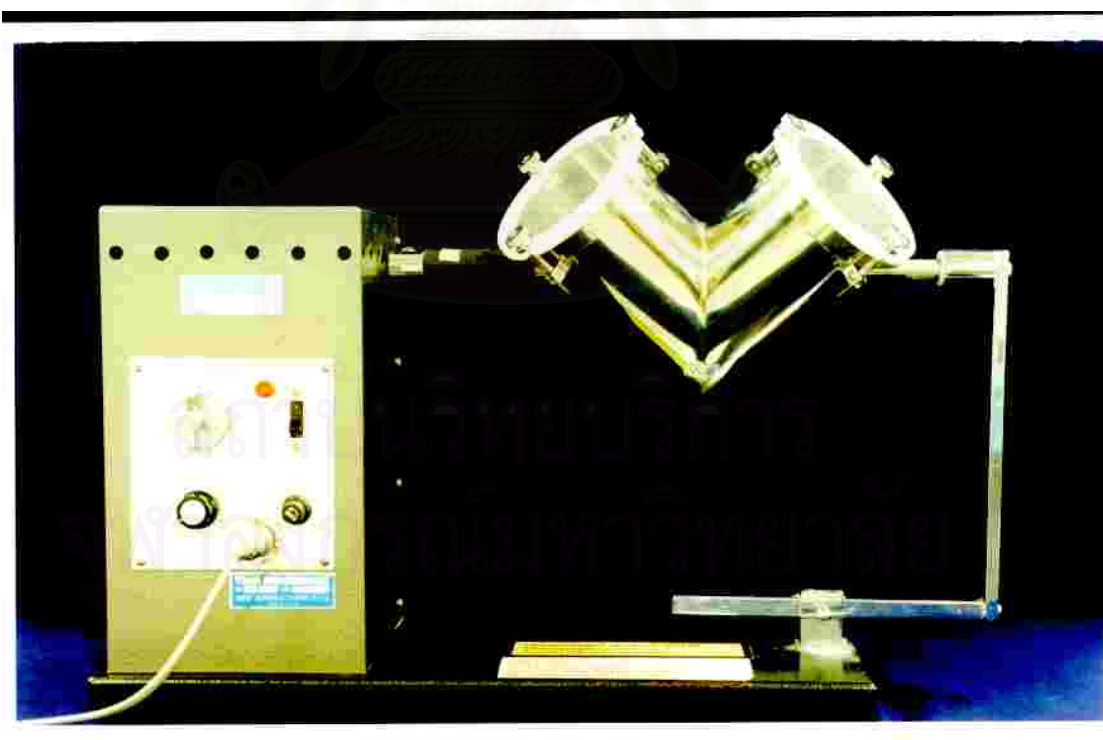


รูปที่ 4.2 เครื่อง Homogenizer

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

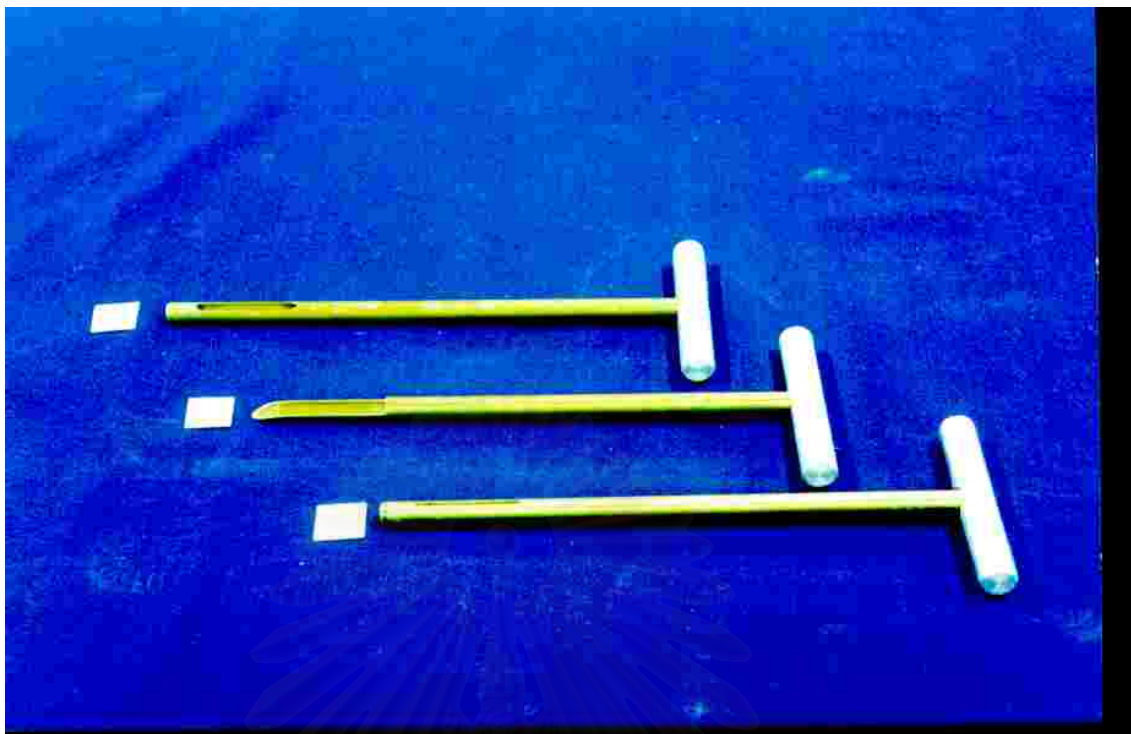


รูปที่ 4.3 เครื่องผสมรูปตัววี (V-shape Mixer)



รูปที่ 4.4 เครื่องผสมรูปตัววีชนิดโปร่งใส (Transparent Micro V-mixer)





รูปที่ 4.5 ซ้อนดิ่งตัวอย่าง (Sampling spear)

#### 4.2 สถานะที่ใช้ในการทดลอง

ความถูกต้องของค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคต้นแบบที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ จะขึ้นอยู่กับสถานะต่างๆ ที่ใช้ในการทำการทดลอง ดังนี้

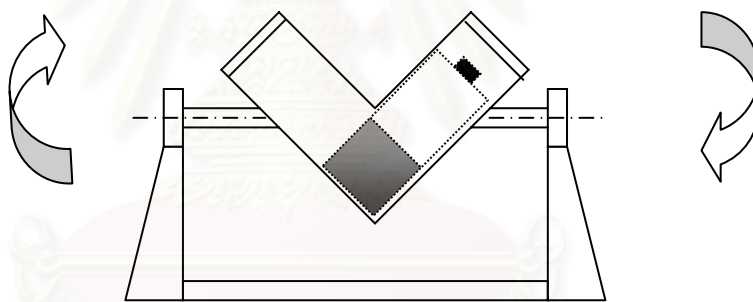
##### 4.2.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาด

เนื่องจากเราไม่สามารถวัดการกระจายขนาดของอนุภาคตัวอย่างทั้งหมดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของประชากรอนุภาคทั้งหมด เพื่อนำไปวัดการกระจายขนาดของอนุภาค

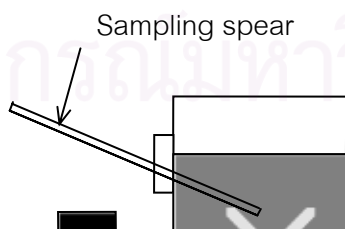
วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ปรับปรุงจากวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS M8100 (JIS M8100 – Particulate materials general rules for method of sampling) โดยกระบวนการการเตรียมตัวอย่าง จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การดึงตัวอย่าง (Sampling)

ขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากการนำอนุภาคทั้งหมด (lot) มาผสมในเครื่องผสมรูปตัววี เพื่อให้อนุภาคมีเนื้อเดียวกันทั้งหมด ต่อจากนั้นนำอนุภาคที่ได้ไปทำการแบ่งย่อยตามจำนวนที่คำนวณไว้ล่วงหน้าโดยใช้วิธี conical quartering method ดังแสดงในรูปที่ 4.8 อนุภาคที่ได้จากการแบ่งย่อยเรียกว่า อนุภาคตัวอย่างเบื้องต้น (primary sampling unit) บรรจุอนุภาคตัวอย่างเบื้องต้นลงในภาชนะบรรจุ โดยปริมาณของอนุภาคควรมีไม่เกินครึ่งหนึ่งหรือหนึ่งในสามของความจุทั้งหมดของภาชนะ ขั้นตอนที่ต่อไปจะทำการดึงตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของอนุภาคทั้งหมดจากตัวอย่างเบื้องต้นที่เตรียมไว้ โดยการผสมอนุภาคตัวอย่างเบื้องต้นในเครื่องผสมรูปตัววี ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และทำการดึงตัวอย่างโดยใช้ช้อนดึงตัวอย่างตามจำนวนที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยในการดึงอนุภาคแต่ละครั้งจะต้องดึงแบบสุ่มโดยปราศจากอคติ (bias) และทำการดึงตัวอย่างโดยการกระทำครั้งเดียว (one working action) เพื่อให้น้ำหนักของอนุภาค ที่ได้จากการดึงตัวอย่างแต่ละครั้งมีปริมาณใกล้เคียงกันทุกครั้ง อนุภาคที่ได้จากขั้นตอนการดึงตัวอย่างเรียกว่า อนุภาคตัวอย่างย่อย (sub-sample)



รูปที่ 4.6 การผสมอนุภาคตัวอย่างเบื้องต้นด้วยเครื่องผสมรูปตัววี



รูปที่ 4.7 การดึงตัวอย่างจากอนุภาคที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุโดยใช้ช้อนดึงตัวอย่าง

## ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมตัวอย่าง (sample preparation)

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาดจากอนุภาคตัวอย่างทั้งหมด (gross sample) ที่ได้จากการนำอนุภาคตัวอย่างย่อยทั้งหมดมารวมกัน เริ่มจากการนำอนุภาคทั้งหมดไปอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในตัวอย่าง โดยจะทำการอบจนน้ำหนักของอนุภาคตัวอย่างทั้งหมดมีค่าคงที่ หลังจากนั้นทำการแบ่งย่อยอนุภาคตัวอย่างทั้งหมดโดยอาศัยวิธี Conical quartering method เพื่อให้ได้ตัวอย่างสำหรับการทดสอบในปริมาณที่ต้องการ

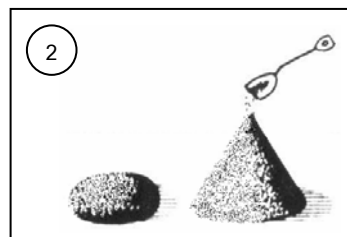
ขั้นตอนทั้งหมดของการเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาด สามารถแสดงขั้นตอนอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4.8



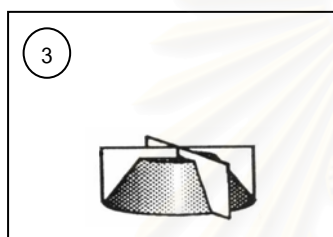
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



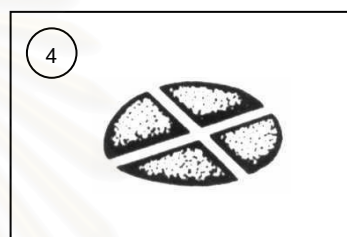
1  
 ก่อกองอนุภาคตัวอย่างเป็นรูป  
 โคนบนระนาบที่แข็งและ



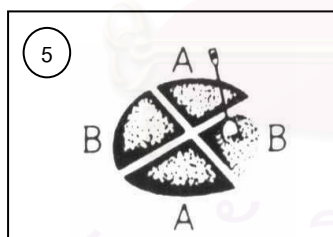
2  
 ทำโคนของอนุภาคตัวอย่างในขั้นที่ 1 ให้  
 แบน และดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ซ้ำ  
 อีกหนึ่งถึงสองครั้ง บนพื้นที่ที่ต่างกัน



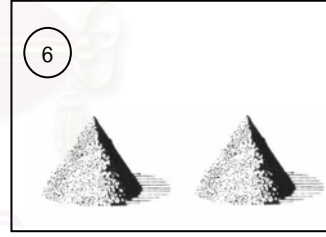
3  
 ทำโคนอนุภาคตัวอย่างให้แบนโดย  
 การกดลงในแนวตั้ง และแบ่งอนุภาค  
 ตัวอย่างออกเป็น 4 กองเท่าๆ กัน ด้วย  
 ภาชนะที่มีขอบคม



4  
 อนุภาคตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น  
 4 กองเท่า ๆ กัน

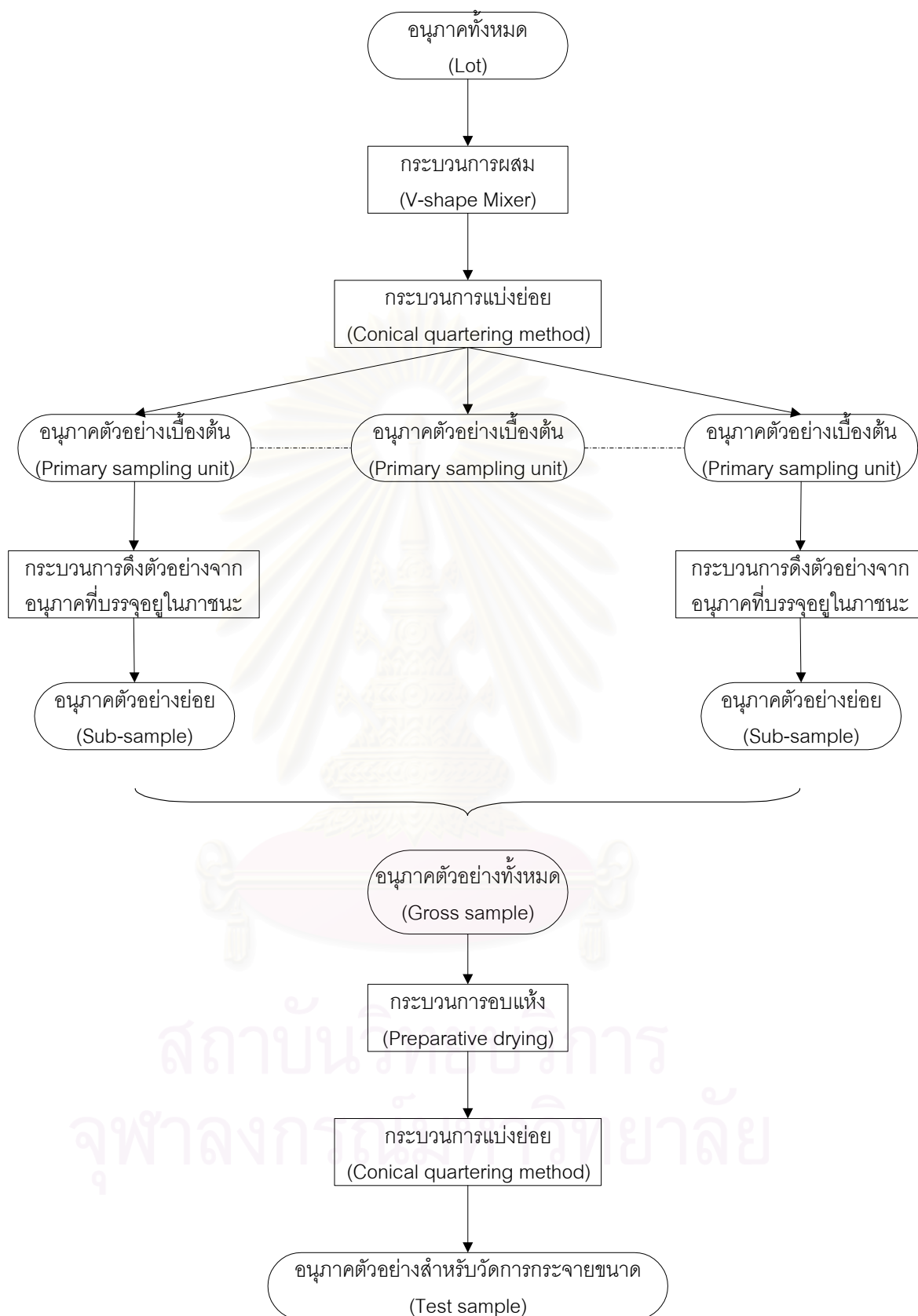


5  
 นำกองอนุภาคตัวอย่างที่อยู่ตรงกัน  
 ข้ามกัน (A-A, B-B) มารวมกัน



6  
 นำอนุภาคที่ได้จากการแบ่งย่อยมาทำซ้ำ  
 ตามขั้นตอนที่ 1 - 5 จนกระทั่งได้  
 อนุภาคตัวอย่างในปริมาณที่ต้องการ

รูปที่ 4.8 การแบ่งย่อยโดยวิธี Conical quartering method



รูปที่ 4.9 การเตรียมตัวอย่างอนุภาคสำหรับวัดการกระจายขนาด

#### 4.2.2 การเตรียมสารแขวนลอย

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการเตรียมสารแขวนลอย คือการทำให้อนุภาคตัวอย่างที่กระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอยแยกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ เพราะการเกาะกันของอนุภาค (agglomerate) จะทำให้ผลที่ได้ผิดพลาดอย่างมาก สารแขวนลอยที่ใช้ในการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคประกอบด้วย

##### (1) ตัวกลาง (dispersion medium)

ตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับการวัดการกระจายขนาดโดยวิธีการตกตะกอนควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ตัวกลางจะต้องไม่ละลาย หรือเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์
- ความหนาแน่นของของไหลจะต้องน้อยกว่าความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่าง โดยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่างกับความหนาแน่นของของไหลควรมีค่ามากกว่า  $500 \text{ kg/m}^3$  เพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของกระแสการพา (natural convective current)
- ความหนืดของตัวกลางต้องเหมาะสมกับอนุภาคขนาดโตสุดที่ต้องการวัด (ดูหัวข้อ 3.2.1)

##### (2) สารช่วยในการกระจายตัว (dispersing agent)

สารช่วยในการกระจายตัวเป็นสารลดแรงตึงผิว (surface active agent) มีหน้าที่ช่วยป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคระหว่างการตกตะกอน

##### (3) อนุภาคตัวอย่าง (Sample)

เนื่องจากสมการของสโตกส์นั้นได้มาจากระบบของการตกตะกอนของทรงกลมเดี่ยวในของไหลที่ไม่มีขอบเขตจำกัด แต่ในการวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน อนุภาคจะเคลื่อนที่อยู่ในขอบเขตที่จำกัด ดังนั้นอนุภาคจะอยู่ห่างกันในระยะที่จำกัดระยะหนึ่ง ซึ่งมีผลให้แต่ละอนุภาคมีแรงดึงดูด และแรงผลักกระทำต่อกัน (แรงดึงดูดเกิดจากแรง Van Der Waals และแรงผลักเกิดจากประจุ (charge) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาค) ในการทำการทดลองเราจะลดผลกระทบดังกล่าวให้เหลือน้อยที่สุดโดยการใช้อนุภาคตัวอย่างในปริมาณที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้อนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเมื่ออนุภาคทุกอนุภาคในคอลัมน์ตกตะกอนหมดแล้วมีประมาณ 1000 เท่าของความไวของเครื่องชั่งที่ใช้ ปริมาณของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคำนวณได้จาก

$$W = w_s \frac{\rho_p}{\rho_p - \rho_f} \frac{V}{V_s} K_B \quad (4.1)$$

โดย $W$	คือ	ปริมาณของตัวอย่างที่ต้องใช้ในการทดลอง (กรัม)
$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่าง (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$\rho_f$	คือ	ความหนาแน่นของตัวกลาง (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$V$	คือ	ปริมาตรทั้งหมดของสารแขวนลอย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$v_s$	คือ	ปริมาตรของคอลัมน์ที่ใช้ผิวหน้าของจานรับน้ำหนักเป็นพื้นผิวด้านล่าง และใช้ระยะทางตั้งแต่ผิวหน้าของจานรับน้ำหนักจนถึงผิวหน้าของเหลวเป็นค่าความสูง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$w_s$	คือ	น้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเมื่ออนุภาคทุกอนุภาคในคอลัมน์ได้ตกตะกอนหมดแล้ว (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $w_s$ มีค่าเท่ากับ 0.1 กรัม)
$K_B$	คือ	สัมประสิทธิ์ชดเชยผลจากการเกิดการพาแบบธรรมชาติเนื่องจากผลต่างของความหนาแน่น (ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $K_B$ มีค่า 1.25)

#### 4.2.3 การทำให้อนุภาคกระจายตัวในตัวกลาง (Method of dispersion)

การทำให้อนุภาคกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวในตัวกลาง ทำได้โดยการปั่นสารแขวนลอยด้วยเครื่อง Homogenizer โดยใช้ความเร็วรอบในการปั่น 8,000 รอบต่อนาที โดยในการปั่นจะต้องระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศขึ้นโดยเด็ดขาด

#### 4.2.4 การคำนวณน้ำหนักของอนุภาคในส่วนที่ไม่ตกตะกอน

ในกรณีที่ตัวอย่างมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก เราจะไม่สามารถร่อนอนุภาคทั้งหมดเกิดตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากจะต้องใช้เวลาในการวัดนานมาก ในกรณีเช่นนี้การคำนวณน้ำหนักของอนุภาคในส่วนที่ไม่ตกตะกอนจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 แบบ คือ

##### 4.2.4.1 การคำนวณสำหรับกรณีที่ทราบค่าน้ำหนักอนุภาคตัวอย่างเริ่มต้น

ในกรณีนี้ปริมาณอนุภาคในส่วนที่ไม่ตกตะกอนสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{\text{un-sed}} = \left[ \left( w_s \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) - W_{\text{sed}} \right] * \frac{A_{\text{pan}}}{A_{\text{col}}} * \frac{1}{K_B} \quad (4.2)$$

โดยน้ำหนักของอนุภาค ทั้งหมดที่ตกตะกอนในการทดลองคำนวณได้จาก

$$W_{\text{sed}} = W_{\text{end}} * \frac{A_{\text{col}}}{A_{\text{pan}}} * K_B \quad (4.3)$$

โดย $W_{\text{un-sed}}$	คือ	น้ำหนัก(ในตัวอย่าง)ของอนุภาคที่ยังไม่ตกตะกอน (กรัม)
$w_s$	คือ	น้ำหนัก(ในอากาศ)ของอนุภาค ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
$W_{\text{sed}}$	คือ	น้ำหนัก(ในตัวอย่าง)ของอนุภาคทั้งหมดที่ตกตะกอนในการทดลอง (กรัม)
$W_{\text{end}}$	คือ	น้ำหนัก(ในตัวอย่าง)ของอนุภาคที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาสิ้นสุดการเก็บข้อมูล (กรัม)
$A_{\text{col}}$	คือ	พื้นที่ตัดขวางของคอลัมน์ตกตะกอน (ตารางเซนติเมตร)
$A_{\text{pan}}$	คือ	พื้นที่ของจานรับน้ำหนัก (ตารางเซนติเมตร)

#### 4.2.4.2 การคำนวณสำหรับกรณีที่ไม่ทราบค่าน้ำหนักของอนุภาคตัวอย่างเริ่มต้น

ในกรณีที่เรากำลังต้องการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารแขวนลอย ที่อาจเกิดขึ้นจากการผลิตทางอุตสาหกรรม หรือที่มีในธรรมชาติ เราจะไม่สามารถทราบปริมาณของอนุภาค (แห้ง) ที่ประกอบอยู่ในสารแขวนลอยนั้น ในกรณีนี้ปริมาณอนุภาคในส่วนที่ไม่ตกตะกอนสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{\text{un-sed}} = W_{\text{sus}} * \frac{A_{\text{pan}}}{A_{\text{col}}} * \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} * \frac{1}{K_B} \quad (4.4)$$

โดย  $W_{\text{sus}}$  คือ น้ำหนัก(ในอากาศ)ของอนุภาคตัวอย่างที่อยู่ในสารแขวนลอยที่ดูดออกมาจากคอลัมน์ตกตะกอน (กรัม)

#### 4.2.5 สถานะที่เหมาะสมในการทดลอง

(1) อุณหภูมิของสารแขวนลอยต้องมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดระหว่างการวัดการกระจายขนาดของอนุภาค เนื่องจากค่าความหนืดเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นความหนืดของตัวกลางจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยเปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางยังมีผลทำให้เกิดการพาอย่างธรรมชาติขึ้นในตัวกลางซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้มีความผิดพลาด



(2) ความเข้มข้นของสารแขวนลอยควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากถ้าสารแขวนลอยมีความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การบดบังกันระหว่างอนุภาคในขณะที่อนุภาคกำลังตกตะกอน หรือทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคที่กระจายอยู่ในสารแขวนลอยได้ ในขณะที่ถ้าความเข้มข้นของสารแขวนลอยมีค่าต่ำเกินไป อาจเกิดปัญหาความผิดพลาดในการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงน้อยมากเกินไป และปัญหาว่าขนาดของอนุภาคที่วัดได้อาจไม่ได้เป็นตัวแทนของขนาดของอนุภาคตัวอย่าง เนื่องจากจำนวนอนุภาคทั้งหมดมีน้อยเกินไป

(3) พยายามหลีกเลี่ยงการกระทำใดๆ ที่จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนระหว่างการทดลอง เนื่องจากเครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้เป็นเครื่องที่มีความไว (sensitivity) สูง และการสั่นสะเทือนจะทำให้ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคเปลี่ยนค่าไป

#### 4.3 ขั้นตอนการทดลอง

(1) เลือกชนิดของตัวกลางและชนิดและปริมาณของสารช่วยในการกระจายตัวที่เหมาะสมกับอนุภาคตัวอย่างแต่ละชนิด

(2) วางจานรับน้ำหนักในคอลัมน์ตกตะกอน เติมตัวกลางปริมาณ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในคอลัมน์ตกตะกอน แขนงจานรับน้ำหนักเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนัก และทำการปรับระดับความสูงระหว่างระดับผิวหน้าของจานรับน้ำหนักกับระดับผิวหน้าของตัวกลางให้มีความสูง 8 เซนติเมตร

(3) ทำการติดกัลกน้ำสำหรับถ่ายสารแขวนลอยออกจากภาชนะเข้ากับผนังของคอลัมน์ตกตะกอน ปรับให้ความสูงของปลายท่อที่ใช้ในการดูดสารแขวนลอยให้อยู่ในระดับเดียวกับระดับผิวหน้าของจานชั่ง หลังจากนั้นถอดกัลกน้ำและนำจานชั่งออกจากคอลัมน์ตกตะกอน

(4) เทตัวกลางที่อยู่ในคอลัมน์ตกตะกอนลงในภาชนะสำหรับทำการผสม เติมสารช่วยในการกระจายตัวที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้วลงไป ทำการผสมตัวกลางกับสารช่วยในการกระจายตัวด้วยเครื่อง Homogenizer หลังจากนั้นเทอนุภาคตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้วลงไป ในภาชนะสำหรับการผสม ทำการผสมอนุภาคตัวอย่างด้วยเครื่อง Homogenizer ที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที พยายามป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของสารแขวนลอยเพิ่มสูงขึ้นและระวังอย่าให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นภายในภาชนะสำหรับการผสม

(5) วางจานรับน้ำหนักลงในคอลัมน์ตกตะกอน ทำการติดกัลกน้ำเข้ากับผนังของคอลัมน์ตกตะกอน เทสารแขวนลอยที่เตรียมได้ลงในคอลัมน์ตกตะกอน ปิดฝาคอลัมน์ตกตะกอนและแขวนจานรับน้ำหนักเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนัก และเริ่มทำการเก็บข้อมูลเมื่อสารแขวนลอยในคอลัมน์ตกตะกอนค่อนข้างนิ่ง (ประมาณ 1 นาที หลังการผสม)

(6) เลิกทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานชั่งเมื่ออนุภาคทุกอนุภาคหรืออนุภาคส่วนใหญ่ในคอลัมน์ตกตะกอนได้ตกตะกอนลงบนจานชั่งหมดแล้ว ในกรณีที่มีอนุภาคที่ไม่ตกตะกอนเหลืออยู่จำนวนมาก ให้ทำการถ่ายสารแขวนลอยออกจากคอลัมน์ตกตะกอนลงใน

ภาชนะที่เตรียมไว้จนระดับผิวหน้าของสารแขวนลอยอยู่ระดับเดียวกับระดับผิวหน้าของจานซึ่งโดยใช้กาลักน้ำที่ได้ทำการติดไว้ นำสารแขวนลอยส่วนที่ถ่ายออกมาไปทำให้แห้งและทำการชั่งน้ำหนักหาปริมาณของของแข็งที่มีอยู่ในสารแขวนลอย หาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่ไม่ตกตะกอนที่อยู่ในสารแขวนลอยโดยนำค่าน้ำหนักของสารช่วยการกระจายตัวที่มีอยู่ในสารแขวนลอยในส่วนที่ถ่ายออกมา ไปลบออกจากน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดที่มีในสารแขวนลอยในส่วนที่ถ่ายออกมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ปรับเรียงค่าความชันของชุดข้อมูล

การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำโดยการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมที่มีการปรับเรียงค่าความชันของชุดข้อมูลโดยใช้ข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่ได้ทดลองเองกับค่าการกระจายขนาดจากเอกสารอ้างอิง

#### 5.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ

APPIE TEST POWDER & STANDARD POWDER ผลิตโดย The Association of Powder Process Industry & Engineering, Japan เป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติตามที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z8901 (JIS Z8901 – Test powders and test particles) ใช้สำหรับการทดสอบและสอบเทียบเครื่องมือทางอุตสาหกรรม โดยอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

##### 1. JIS TEST POWDER I (Z8901-1995)

อนุภาคมาตรฐานที่อยู่ในกลุ่ม JIS TEST POWDER I เป็นอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบช่วงกว้าง อนุภาคกลุ่มนี้จะประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันผสมกันอยู่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยอนุภาคในกลุ่มของ JIS TEST POWDER I ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมี 1 ชนิด ดังนี้

##### 1.1) JIS TEST POWDER I, No.5

ชื่อ : เถ้าลอย (Fly ash)

องค์ประกอบทางเคมี :

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO <sub>2</sub>	> 45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 20

ความหนาแน่นของอนุภาค : 2.0 ~ 2.3 g/cm<sup>3</sup>

พื้นที่ผิวเฉพาะ : 0.36 m<sup>2</sup>/g

เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน : 13 ~ 17 μm

การกระจายขนาดของอนุภาค : ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER I ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดของอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	ร้อยละขนาดเกินโดย มวล (% Oversize on mass basis)
	No.5
1	-
2	-
4	-
5	$84 \pm 5$
6	-
8	-
10	$60 \pm 5$
16	-
20	$32 \pm 3$
30	$15 \pm 3$
40	$8 \pm 3$
106	0

## 2. JIS TEST POWDER II (Z8901-1995)

อนุภาคมาตรฐานในกลุ่ม JIS TEST POWDER II เป็นอนุภาคที่มีการกระจายขนาดแบบแคบ (narrow size distribution) เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกัน อนุภาคในกลุ่มของ JIS TEST POWDER II ที่นำมาใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด ดังนี้

### 2.1) JIS TEST POWDER II, No.1

ชื่อ	: White fused alumina
องค์ประกอบทางเคมี	: มี $\text{Al}_2\text{O}_3$ 99 % หรือมากกว่า
ความหนาแน่นของอนุภาค	: $3.9 \sim 4.0 \text{ g/cm}^3$
พื้นที่ผิวเฉพาะ	: $4.3 \sim 4.5 \text{ m}^2/\text{g}$

เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน :  $2 \pm 0.45 \mu\text{m}$   
 การกระจายขนาดของอนุภาค : ดังแสดงในตารางที่ 5.2

### 2.2) JIS TEST POWDER II, No.3

ชื่อ : White fused alumina  
 องค์ประกอบทางเคมี : มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99 % หรือมากกว่า  
 ความหนาแน่นของอนุภาค :  $3.9 \sim 4.0 \text{ g/cm}^3$   
 พื้นที่ผิวเฉพาะ :  $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^2/\text{g}$   
 เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน :  $8 \pm 0.6 \mu\text{m}$   
 การกระจายขนาดของอนุภาค : ดังแสดงในตารางที่ 5.2

### 2.3) JIS TEST POWDER II, No.4

ชื่อ : White fused alumina  
 องค์ประกอบทางเคมี : มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99 % หรือมากกว่า  
 ความหนาแน่นของอนุภาค :  $3.9 \sim 4.0 \text{ g/cm}^3$   
 พื้นที่ผิวเฉพาะ :  $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^2/\text{g}$   
 เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน :  $14 \pm 0.45 \mu\text{m}$   
 การกระจายขนาดของอนุภาค : ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II ที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิด	ร้อยละขนาดเกินโดยมวล (%Oversize on mass basis)		
	ขนาดของอนุภาคที่ 94 %	ขนาดของอนุภาคที่ 50 %	ขนาดของอนุภาคที่ 3 %
No.1	0.8 min	$2 \pm 0.45$	5 max
No.3	4.5 min	$8 \pm 0.60$	22 max
No.4	9.0 min	$14 \pm 1.00$	31 max



รูปที่ 5.1 อนุภาคมาตรฐานและสารช่วยในการกระจายตัว

## 5.2 สารช่วยในการกระจายตัว (Dispersing agent)

ในงานวิจัยนี้ใช้ Sodium Hexametaphosphate เป็นสารช่วยในการกระจายตัว เพื่อป้องกันการเกาะรวมตัวกัน (agglomerate) และช่วยให้อนุภาคที่กระจายอยู่ในสารแขวนลอยคงสภาพเป็นอนุภาคเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ โดยปกติใช้ปริมาณ 0.2 % โดยน้ำหนัก

ชื่อ : Sodium Hexametaphosphate powder

สูตรเคมี :  $(\text{NaPO}_3)_n \cdot \text{Na}_2\text{O}$

pH : 7.0 – 7.5

ผู้ผลิต : AJAX CHEMICALS

### 5.3 ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

#### 5.3.1 ลักษณะของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

อนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการกระจายขนาด (size distribution) คือ

#### กลุ่มที่ 1 อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบแคบ (narrow size distribution)

อนุภาคในกลุ่มนี้คือ อนุภาคที่อยู่ในกลุ่ม JIS TEST POWDER II ซึ่งจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน (ดูหัวข้อ 5.1) อนุภาคที่นำมาใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด ดังนี้

- JIS TEST POWDER II, No.1
- JIS TEST POWDER II, No.3
- JIS TEST POWDER II, No.4

#### กลุ่มที่ 2 อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่

อนุภาคในกลุ่มนี้เกิดจากการนำอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบแคบ คือ อนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3 และอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 มาทำการผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3

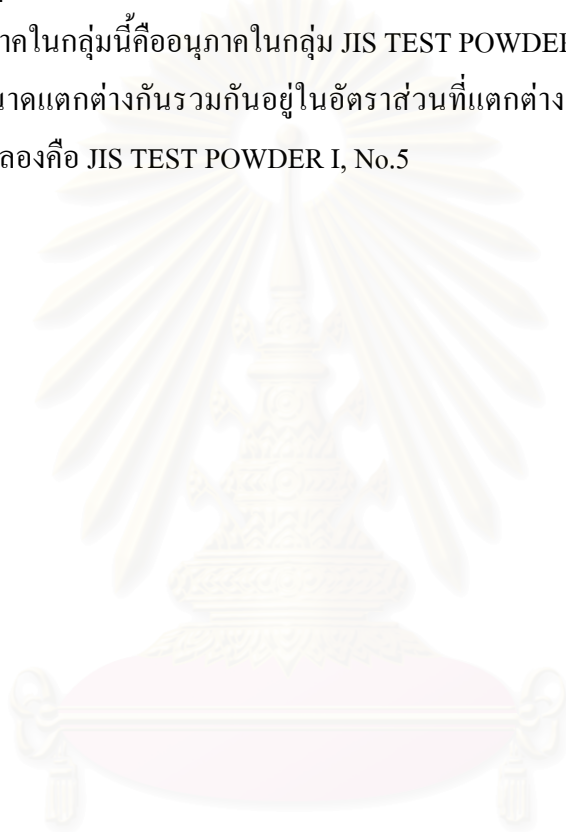
ตารางที่ 5.3 ส่วนประกอบของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่

ชนิด	สัดส่วนโดยมวล		
	BIMODAL1	BIMODAL2	BIMODAL3
JIS TEST POWDER II, No.3	0.8	0.5	0.2
JIS TEST POWDER II, No.4	0.2	0.5	0.8

เนื่องจากอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3 และอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 เป็นอนุภาคชนิดเดียวกัน (White fused Alumina) มีองค์ประกอบทางเคมี และความหนาแน่นเท่ากัน เพียงแต่มีขนาด โดยเฉลี่ยที่แตกต่างกันเท่านั้น ดังนั้นอนุภาคที่ได้จากการผสมจะมีคุณสมบัติทางกายภาพคงเดิม

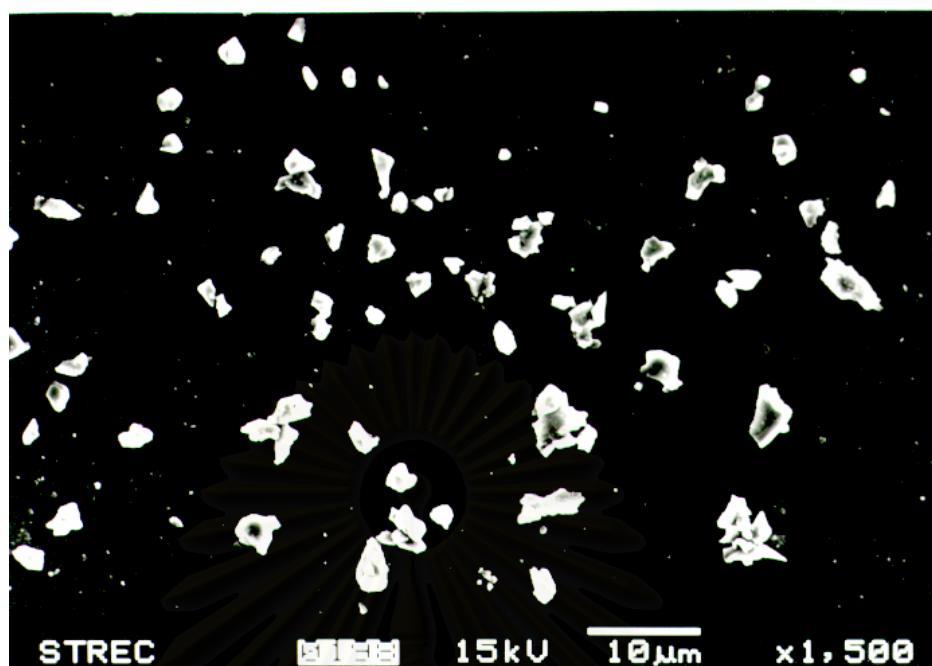
**กลุ่มที่ 3** อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบช่วงกว้าง

อนุภาคในกลุ่มนี้คืออนุภาคในกลุ่ม JIS TEST POWDER I ซึ่งเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันรวมกันอยู่ในอัตราส่วนที่ต่างกัน (ดูหัวข้อ 5.1) อนุภาคที่นำมาใช้ในการทดลองคือ JIS TEST POWDER I, No.5



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

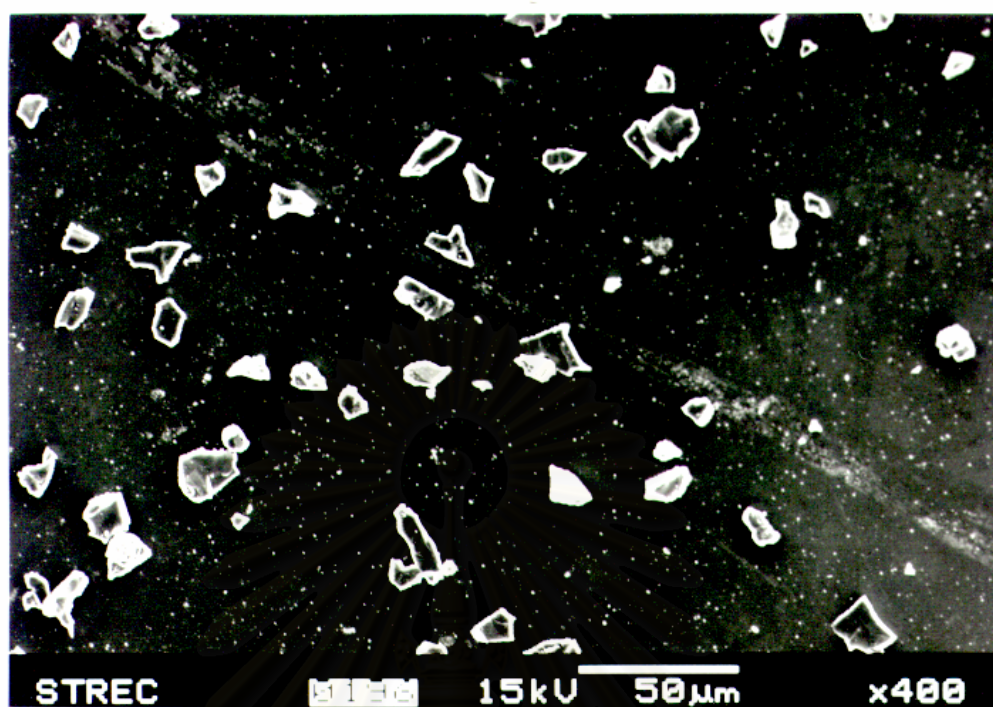




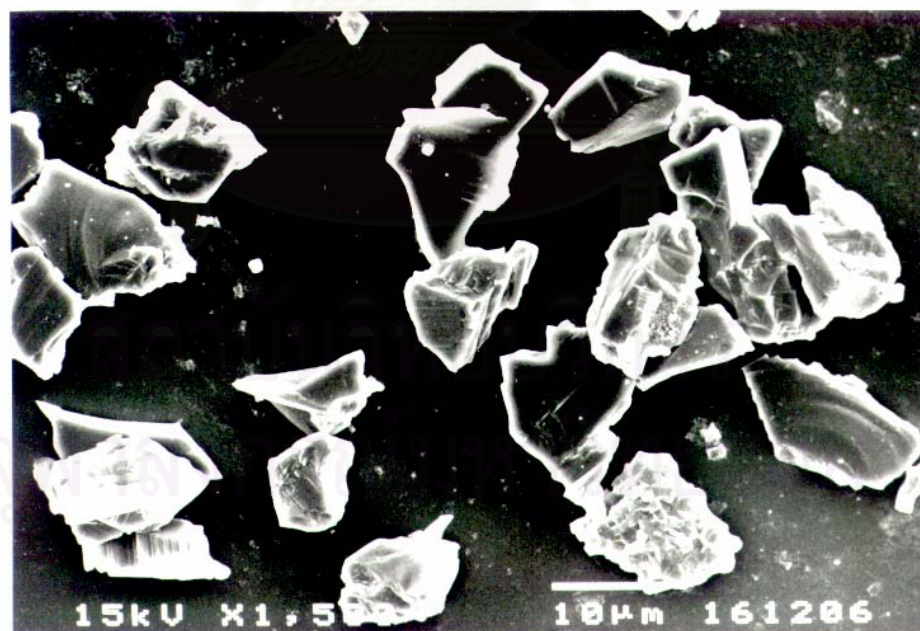
รูปที่ 5.2 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1  
(กำลังขยาย 1,500 เท่า)



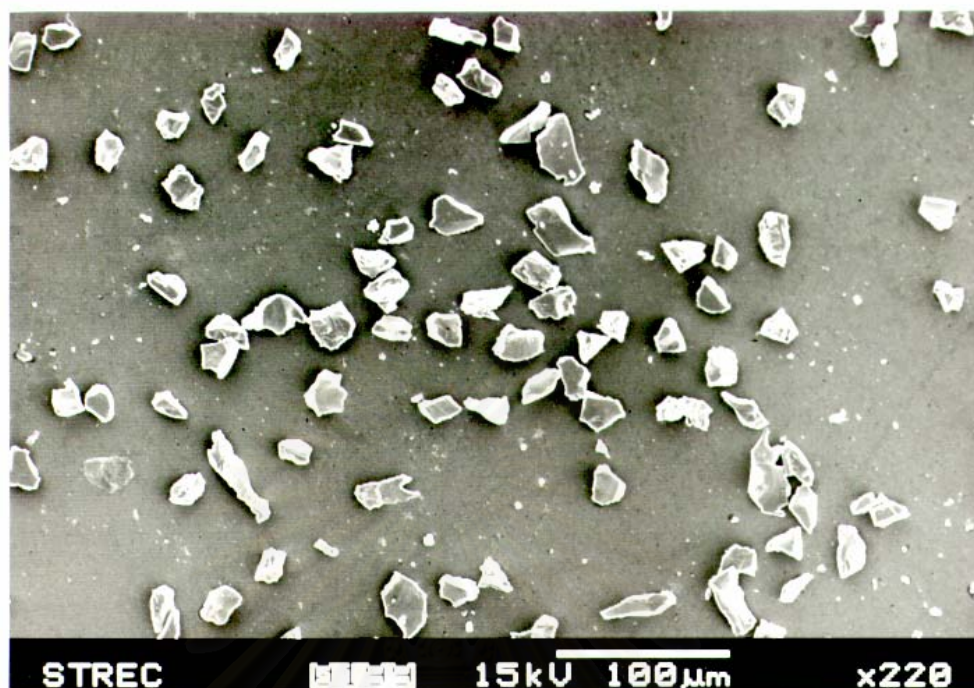
รูปที่ 5.3 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1  
(กำลังขยาย 7,500 เท่า)



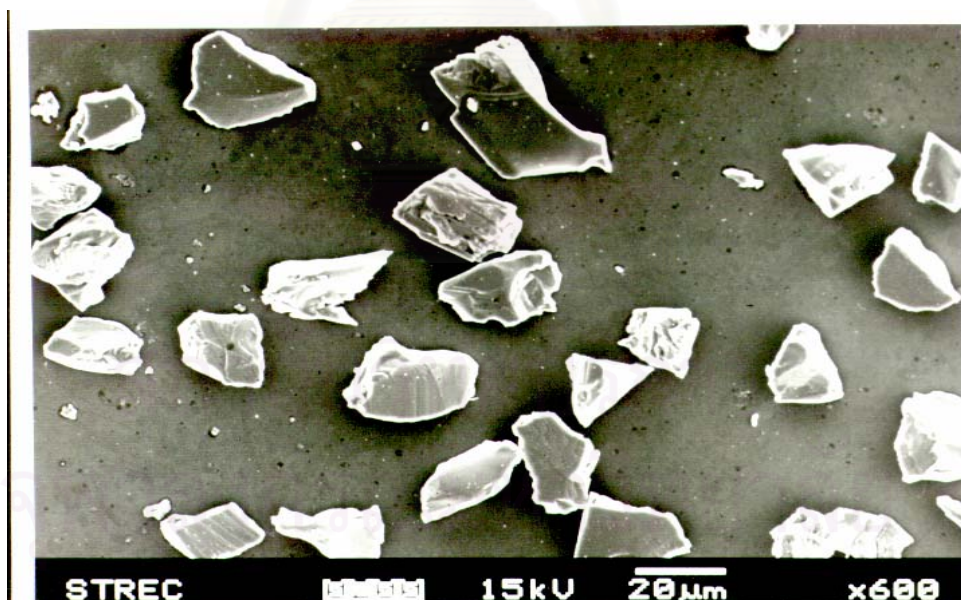
รูปที่ 5.4 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3  
(กำลังขยาย 400 เท่า)



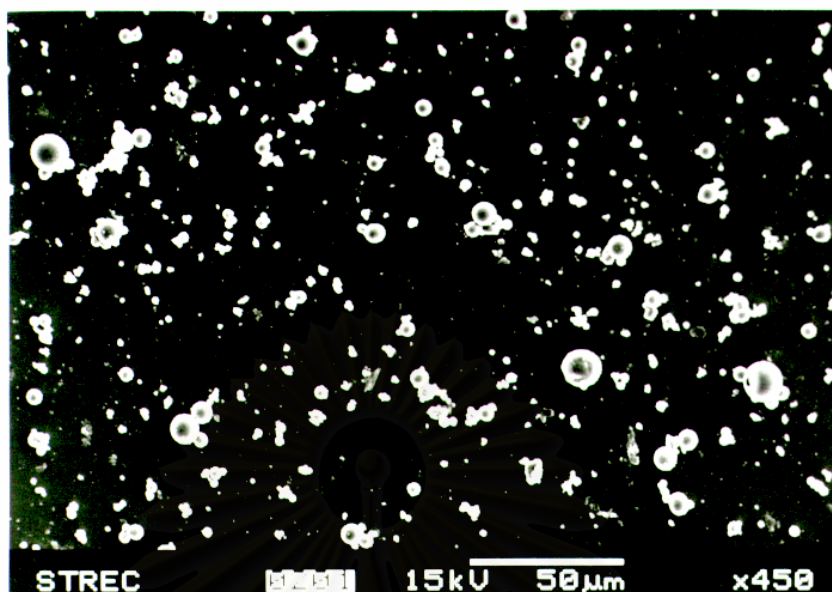
รูปที่ 5.5 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3  
(กำลังขยาย 1,500 เท่า)



รูปที่ 5.6 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4  
(กำลังขยาย 220 เท่า)



รูปที่ 5.7 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4  
(กำลังขยาย 600 เท่า)



รูปที่ 5.8 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5  
(กำลังขยาย 450 เท่า)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการปรับเทียบเส้นความชันกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง และค่าการกระจายขนาดที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2ME

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค CU-MTEC PARTICLE SIZE ANALYZER จะประกอบไปด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL-JIS) และโปรแกรมคำนวณฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้ระเบียบวิธีของทูมิ (โปรแกรม SEDI-2ME)

สำหรับโปรแกรม AUTOCAL-JIS นั้นจะหาค่าน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ สโตกส์ ณ เวลาใดๆ โดยการสร้างเส้นสัมผัสผ่านข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่ามาตัดกับแกนตั้ง ซึ่งค่าความชันของชุดข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิมนั้นมีค่าไม่ต่อเนื่อง ค่าความชันของเส้นสัมผัสคำนวณได้จากสมการที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 จะคำนวณหาค่าความชันได้จากค่าอนุพันธ์ของสมการพหุนามอันดับสองสำหรับข้อมูลในช่วงที่ 1 และอันดับสามสามสำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นจึงนำค่าจุดตัดแกนตั้งที่ได้ไปคำนวณหาการกระจายขนาดของอนุภาคต่อไป

จากขั้นตอนการทำงาน of โปรแกรมดังกล่าว จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการประดิษฐ์สมการสำหรับคำนวณหาค่าความชันเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากของโปรแกรม เพราะสมการพหุนามที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีผลต่อความถูกต้องของค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากการโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 กับข้อมูลการทดลองจริง (ดูรายละเอียดการทดลองในบทที่ 4) โดยใช้เกณฑ์ในการประดิษฐ์สมการพหุนามสำหรับข้อมูลแต่ละชุด ดังแสดงในตารางที่ 5.4 นอกจากนี้ได้แสดงผลเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิม และโปรแกรม SEDI-2ME ด้วย

ตารางที่ 5.4 เกณฑ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ชุดของสมการพหุนามอันดับสองและสามของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค  
โดยวิธีมาตรฐาน JIS สำหรับข้อมูลการทดลองแต่ละชุด

อนุภาคตัวอย่าง	เกณฑ์ในการแบ่งช่วงข้อมูล	จำนวนข้อมูลของชุดข้อมูล / จำนวนข้อมูลที่มีการใช้ซ้ำ			เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)
		ข้อมูลส่วนที่ 1	ข้อมูลส่วนที่ 2	ข้อมูลส่วนที่ 3	
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบแคบ (narrow size distribution)					
JIS TEST POWDER II, NO.1	0.8 / 0.96	1000 / 500	2000 / 1000	3000 / 1500	56,026
JIS TEST POWDER II, NO.3	0.8 / 0.96	100 / 50	100 / 50	100 / 50	1,678
JIS TEST POWDER II, NO.4	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30	433
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบฐานนิยมคู่ (Bimodal)					
BIMODAL 1	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	100 / 50	2,096
BIMODAL 2	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30	1,403
BIMODAL 3	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30	949
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบช่วงกว้าง					
JIS TEST POWDER I, NO.5	0.8 / 0.96	100 / 50	1000 / 500	3000 / 1500	19,697

เนื่องจากอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค คือ อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบแคบ อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ และอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบกว้าง ดังนั้นในการแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงจะแบ่งการแสดงผลออกเป็น 3 ส่วนตามลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค ดังนี้

### 5.3.2.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบแคบ

ในการแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาค กราฟการกระจายตัวแบบสะสม จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงซึ่งเป็นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่ใช้เครื่อง Coulter Multisizer ในการวัดผล (Standard Powder (Coulter))

ส่วนกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิมและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคจากข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1, No.3 และ No.4 ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของ พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิงที่ใช้เครื่อง Coulter Multisizer ในการวัดผล ดังแสดงในรูปที่ 5.13, 5.19 และ 5.25

ตารางที่ 5.5, 5.7 และ 5.9 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนดจากเอกสารอ้างอิง ( JIS Z8901 และ Coulter Multisizer) กับขนาดของอนุภาคที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล ทั้งสามแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น ข้อมูลในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล ที่ประดิษฐ์ขึ้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิง

จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีลักษณะสอดคล้องกันกับค่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ดังแสดงในรูปที่ 5.14, 5.20 และ 5.26 แต่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีความสมมาตร (symmetry) และมีความสูง (amplitude) มากกว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ ข้อมูลจากตารางที่ 5.6, 5.8 และ 5.10 แสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคของฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่า แม้มีการใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 ที่มีการปรับเรียงความชันของชุดข้อมูลอนุภาค แต่ทั้งค่าการกระจายขนาดของอนุภาคและฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคก็มีค่าไม่แตกต่างจากกรณีที่ใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS แบบที่ไม่มีการปรับเรียงความชัน เนื่องจากว่า ข้อมูลการทดลองของอนุภาคมีการแกว่งของน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักค่อนข้างน้อย ดังนั้นเมื่อผ่านขั้นตอนการขจัดสัญญาณรบกวนด้วยการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองแล้ว ค่าความชันที่คำนวณได้จากสมการนี้จึงค่อนข้างต่อเนื่อง ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3 และ 4 ส่วน JIS TEST POWDER II, No.1 ค่าความชันที่ได้จากสมการพหุนามอันดับสองมีค่าไม่ต่อเนื่องและเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเวลาในการทดลองมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการปรับเรียงความชัน ค่าการกระจายขนาดและฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จึงแตกต่างจากกรณีที่ไม่มีการปรับเรียงความชันข้างเล็กน้อย

จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถวัดและวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบแคบได้อย่างถูกต้อง

อนึ่ง จากผลการทดลองยังพบว่าโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me สามารถทำนายค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคเล็กสุดที่โปรแกรม AUTOCAL-JIS สามารถวิเคราะห์ผลได้

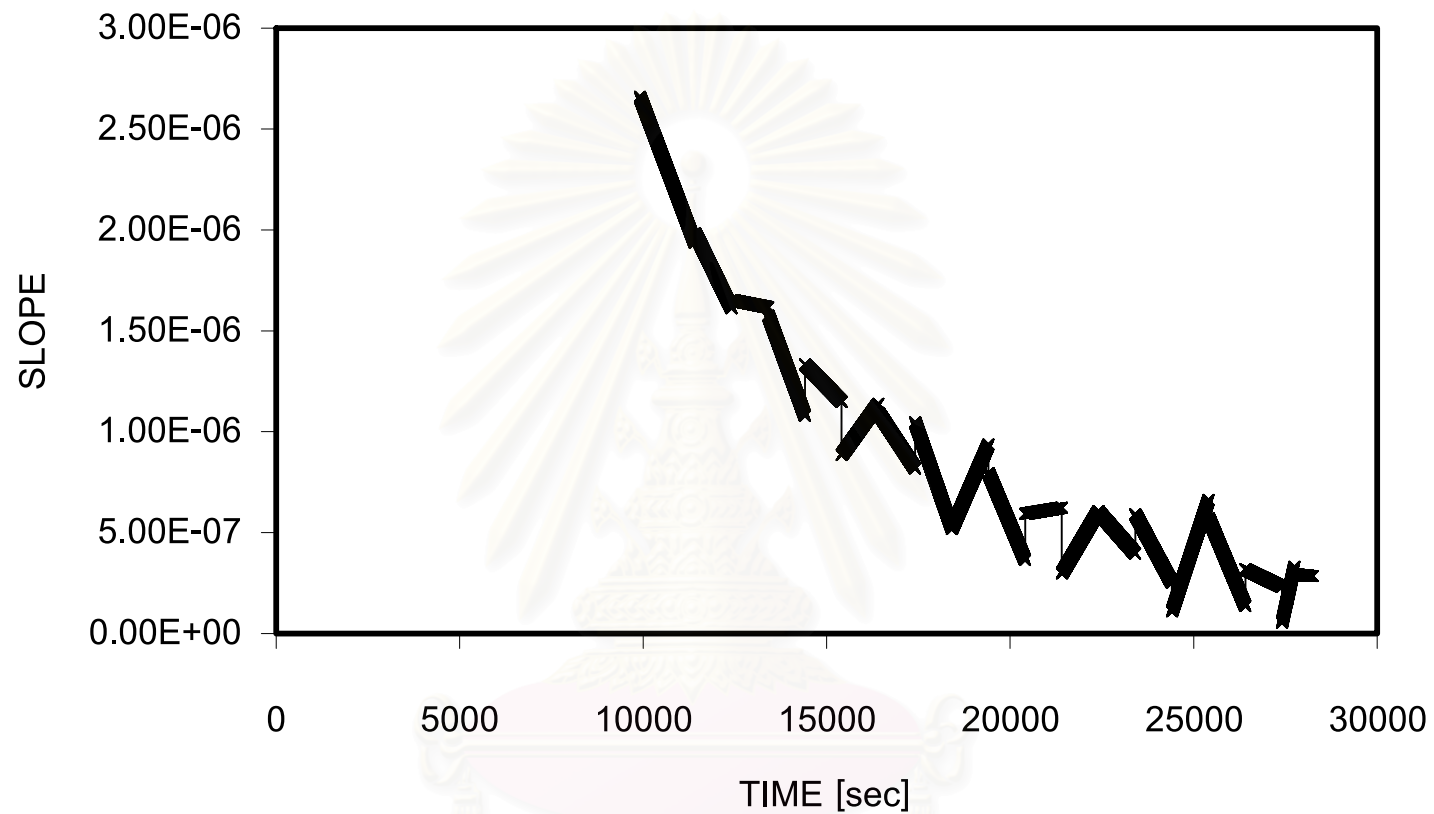


ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิม, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1

Analytical method		Oversize (on mass basis) %		
		Particle size of 94 %	Particle size of 50 %	Particle size of 3 %
JIS (Z8901-1995)		> 0.8	$2 \pm 0.45$	5 <
COULTER MULTISIZER		1.13	2.25	3.91
AUTOCAL-JIS	Normal scale	0.87	2.30	4.24
	Semi-log	1.12	2.19	4.00
SEDI-2Me	Normal scale	0.28	2.11	4.19
	Semi-log	1.07	2.16	3.82
AUTOCAL-JIS.v2	Normal scale	0.87	2.22	4.00
	Semi-log	1.19	2.19	4.00

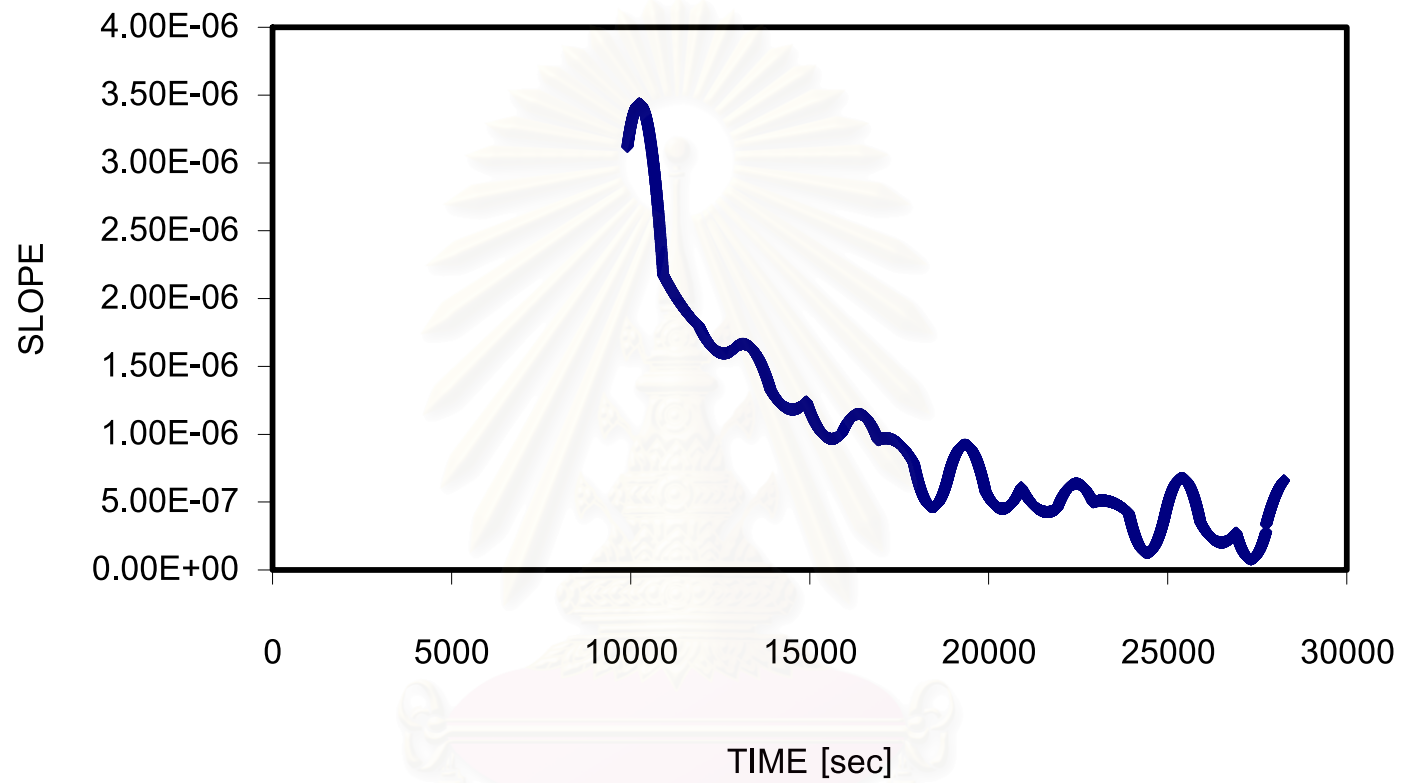
ตารางที่ 5.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1

	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTOCAL-JIS	1.45	1.45
SEDI-2Me	1.48	1.43
AUTOCAL-JIS.v2	1.49	1.43



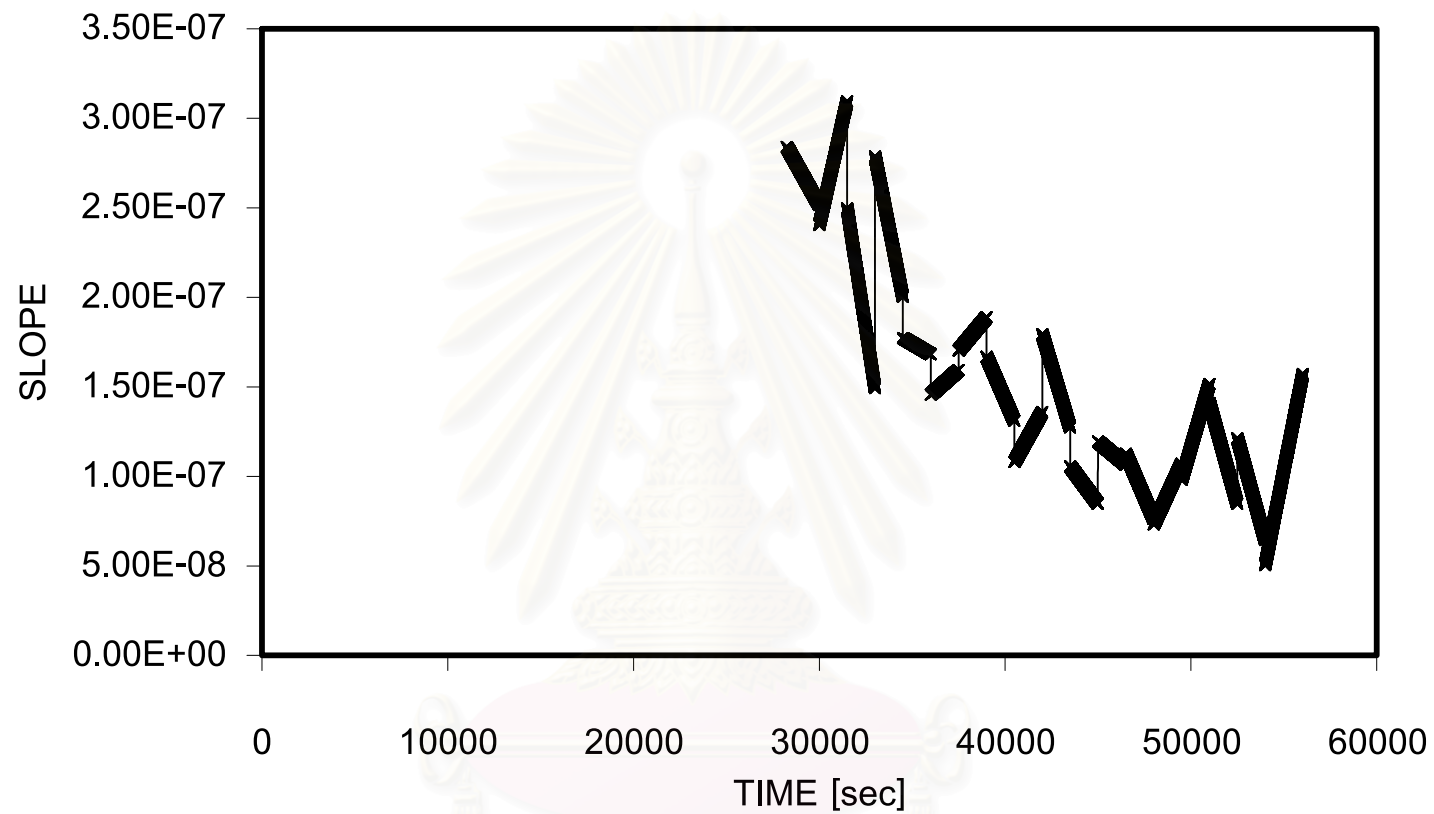
รูปที่ 5.9 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สส เป็นวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



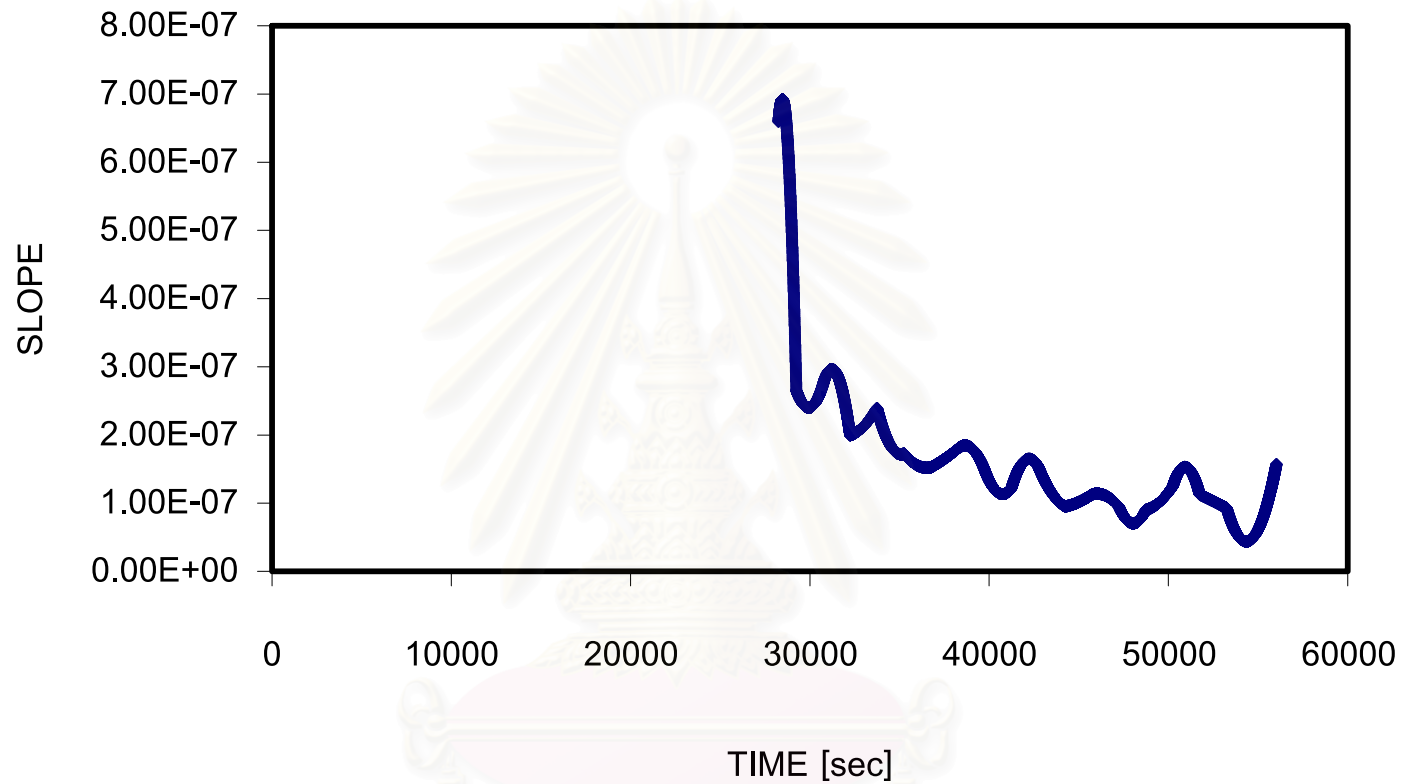
รูปที่ 5.10 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



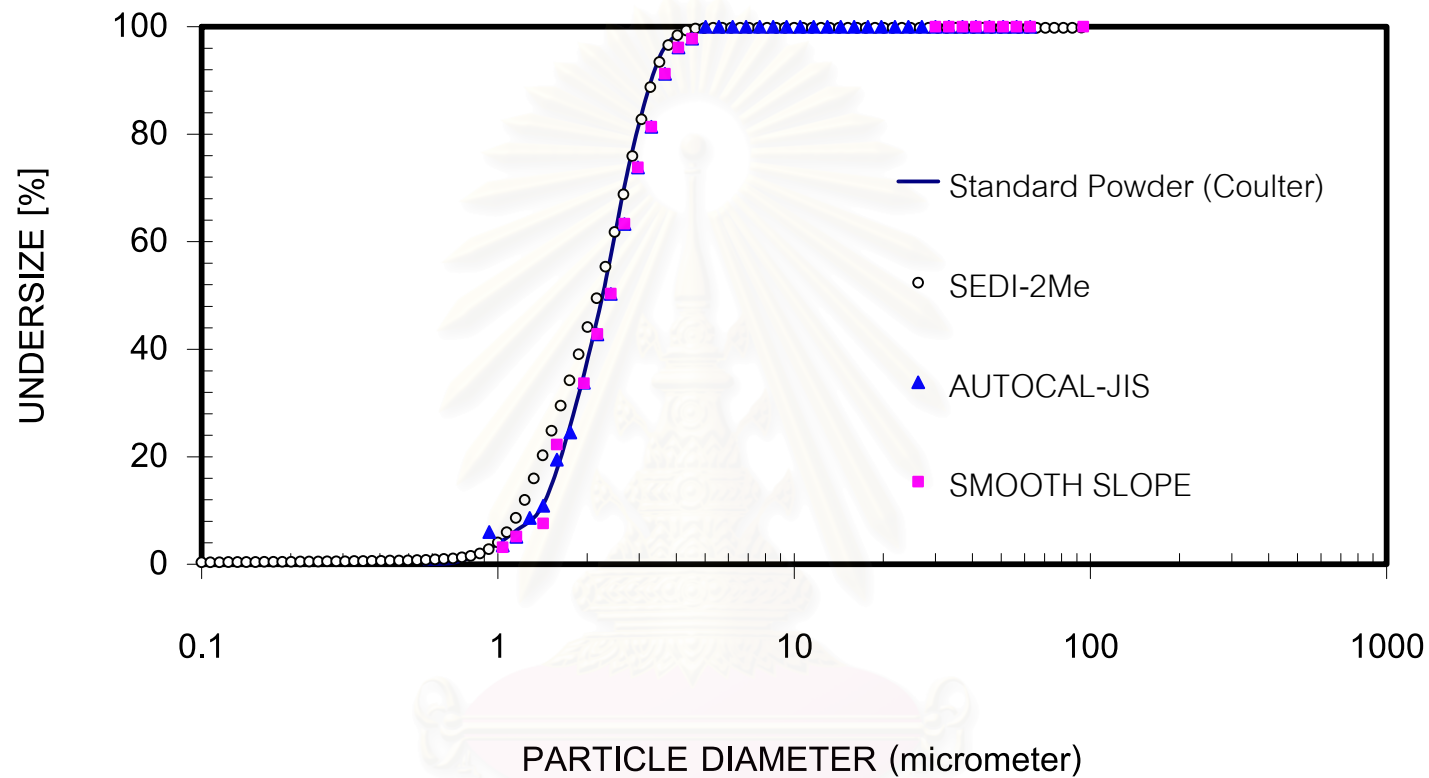
รูปที่ 5.11 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

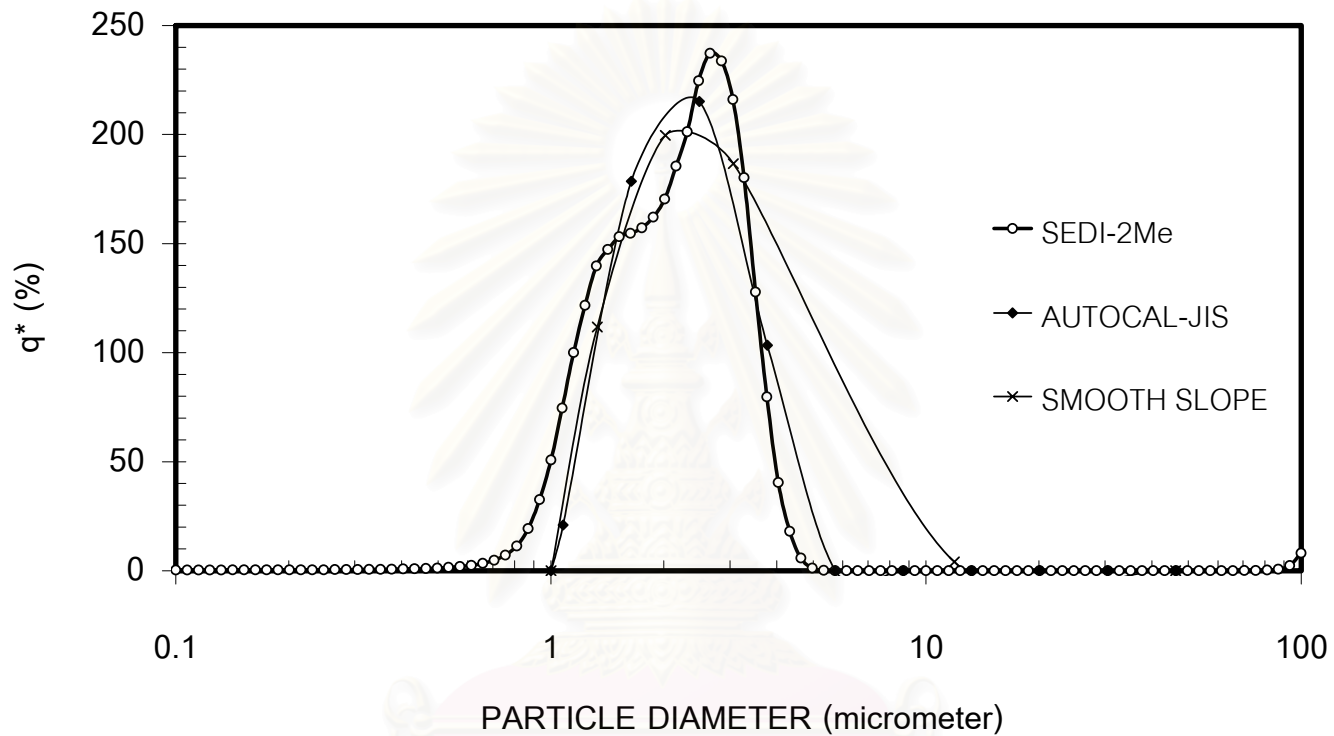


รูปที่ 5.12 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิง ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

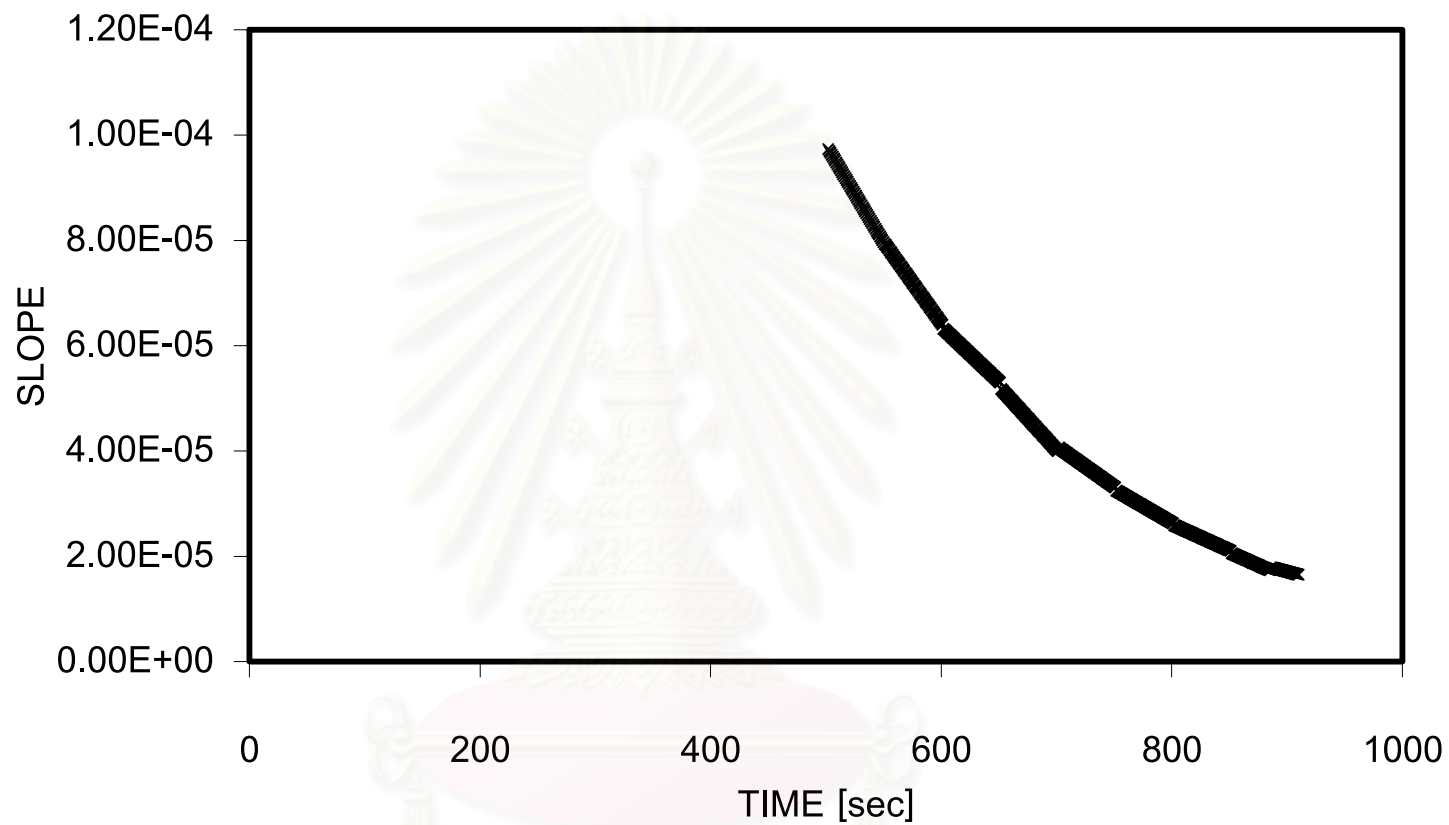
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTO-CAL-JIS.v2 กับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTO-CAL-JIS, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3

Analytical method		Oversize (on mass basis) %		
		Particle size of 94 %	Particle size of 50 %	Particle size of 3 %
JIS (Z8901-1995)		> 4.5	$8 \pm 0.6$	20 <
COULTER MULTISIZER		6.09	8.49	13.38
AUTO-CAL-JIS	Normal scale	-	8.67	13.23
	Semi-log	5.91	8.66	13.14
SEDI-2Me	Normal scale	5.10	8.52	13.79
	Semi-log	5.54	8.46	13.74
AUTO-CAL-JIS.v2	Normal scale	-	8.64	13.38
	Semi-log	5.59	8.65	13.13

ตารางที่ 5.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3

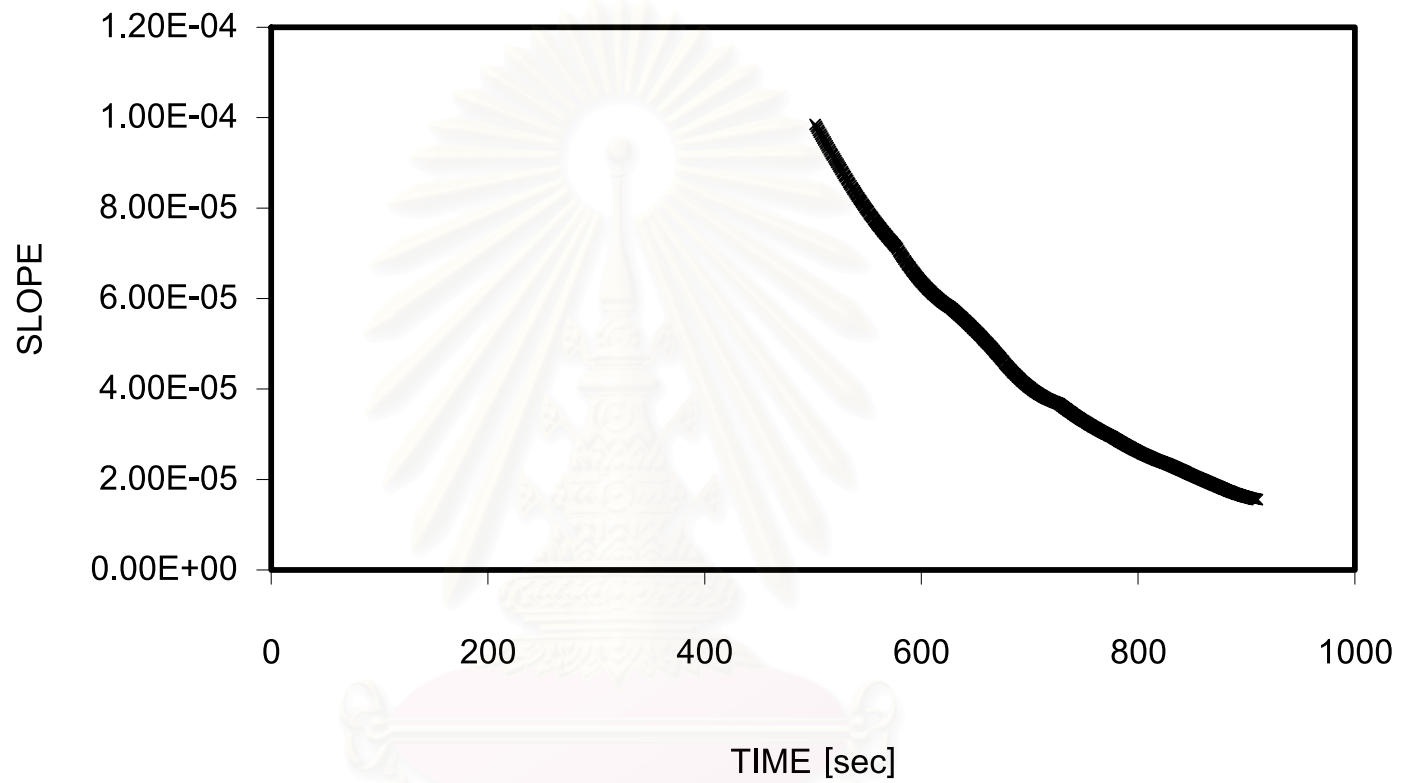
Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTO-CAL-JIS	1.25	1.24
SEDI-2Me	1.27	1.28
AUTO-CAL-JIS.v2	1.25	1.24





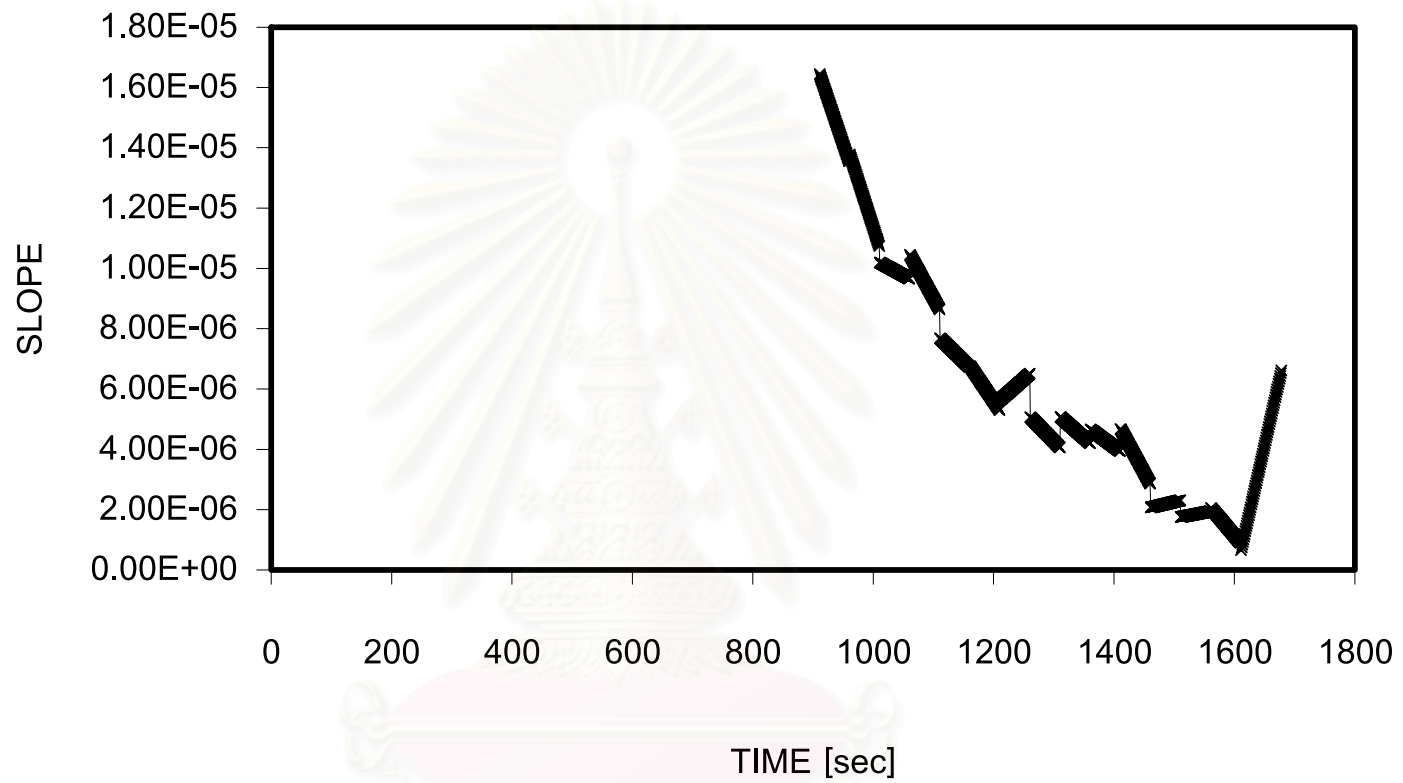
รูปที่ 5.15 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูลอนุภาค JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิจัยปฏิกิริยา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



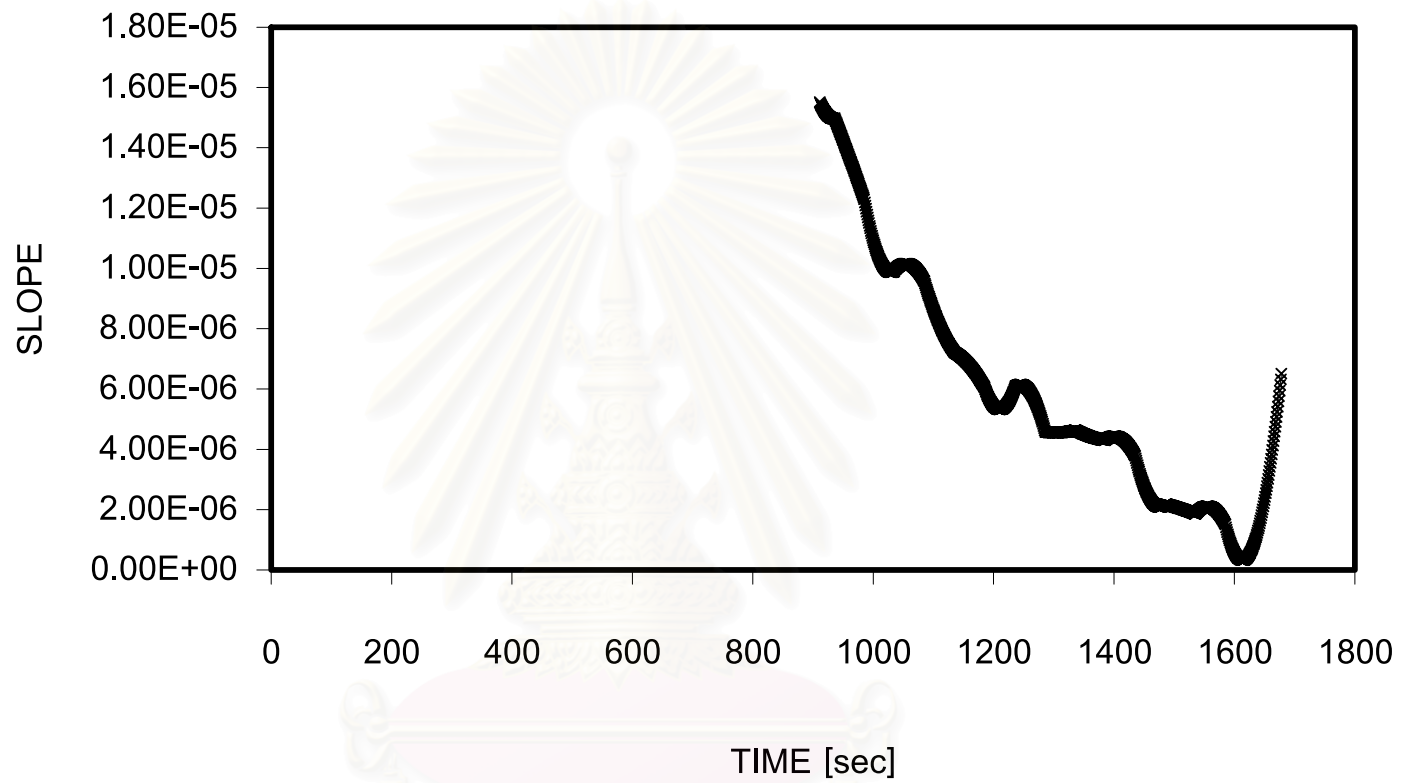
รูปที่ 5.16 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



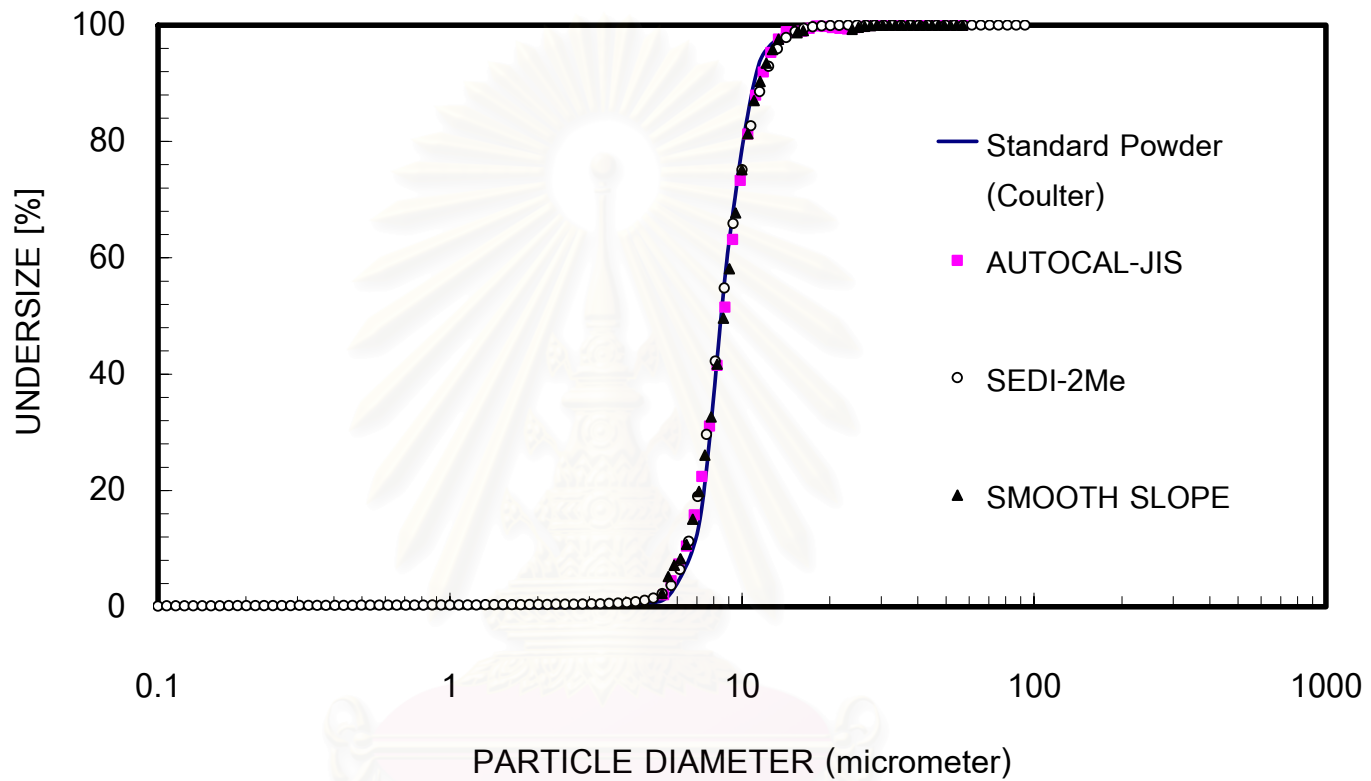
รูปที่ 5.17 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

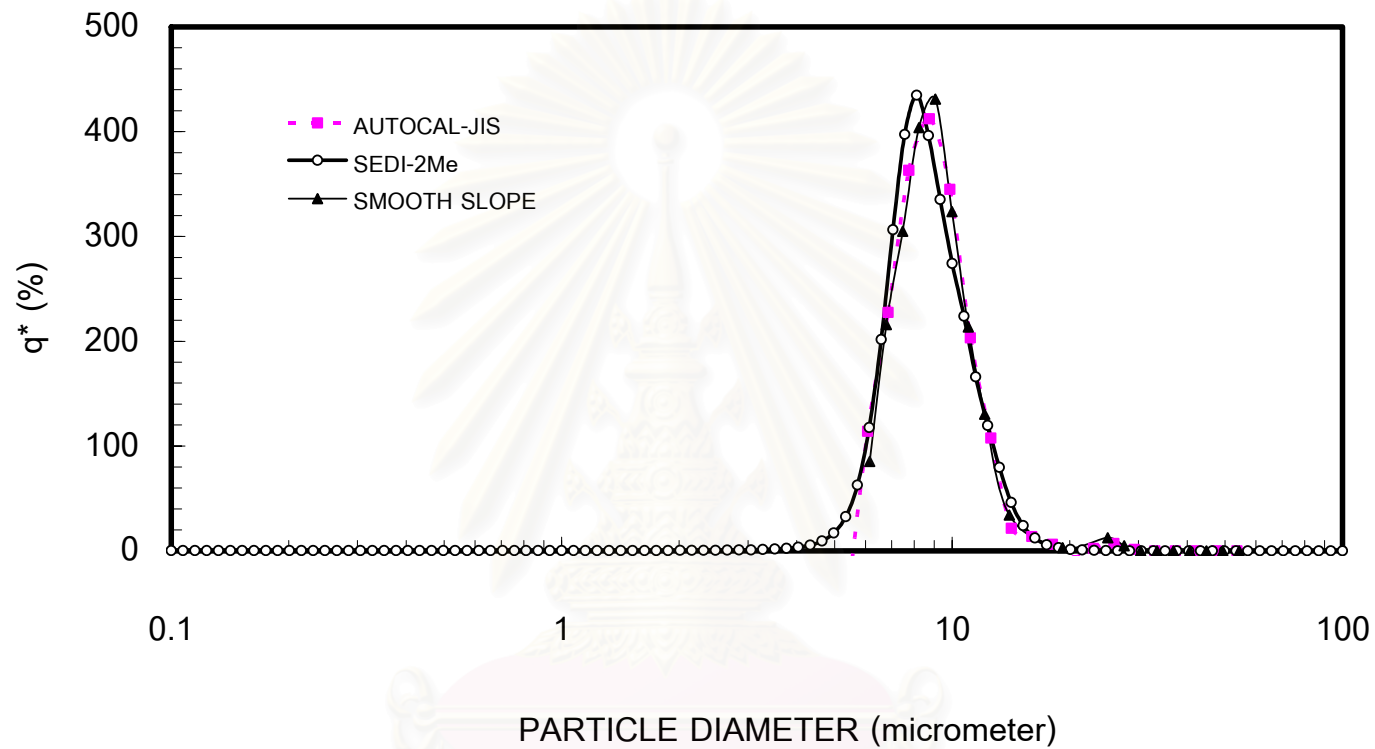


รูปที่ 5.18 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



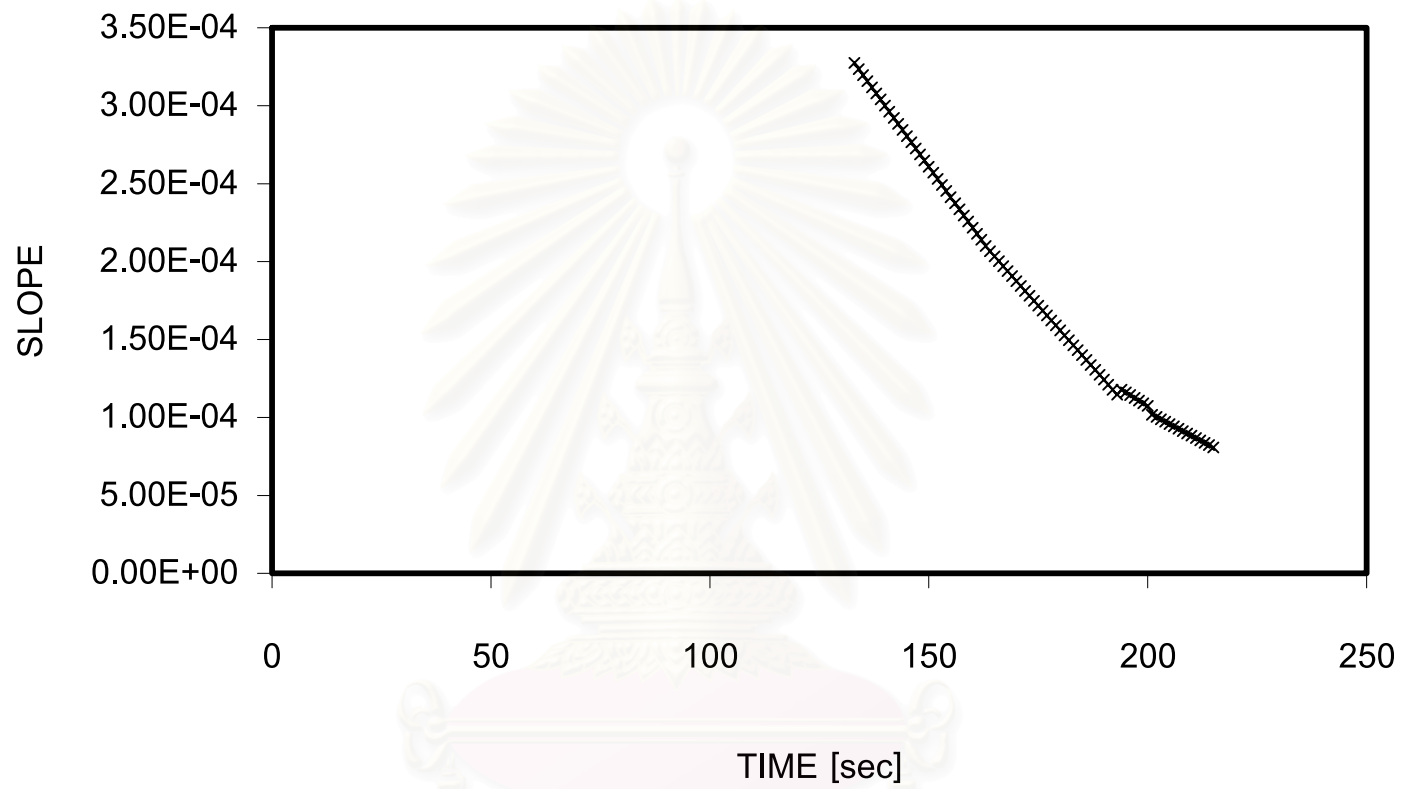
รูปที่ 5.20. เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTO-CAL-JIS.v2 ที่มีการปรับเรียบความชันของชุดข้อมูล กับโปรแกรม AUTO-CAL-JIS เดิม, โปรแกรม SEDI-2Me และค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4

Analytical method		Oversize (on mass basis) %		
		Particle size of 94 %	Particle size of 50 %	Particle size of 3 %
JIS (Z8901-1995)		> 9.0	14 ± 1	< 31
COULTER MULTISIZER		12.37	16.89	25.68
AUTO-CAL-JIS	Normal scale	12.26	16.45	25.11
	Semi-log	12.23	16.45	25.09
SEDI-2Me	Normal scale	12.43	16.27	25.08
	Semi-log	12.5	16.24	25.18
AUTO-CAL-JIS.v2	Normal scale	11.94	16.45	24.16
	Semi-log	11.97	16.45	24.81

ตารางที่ 5.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4

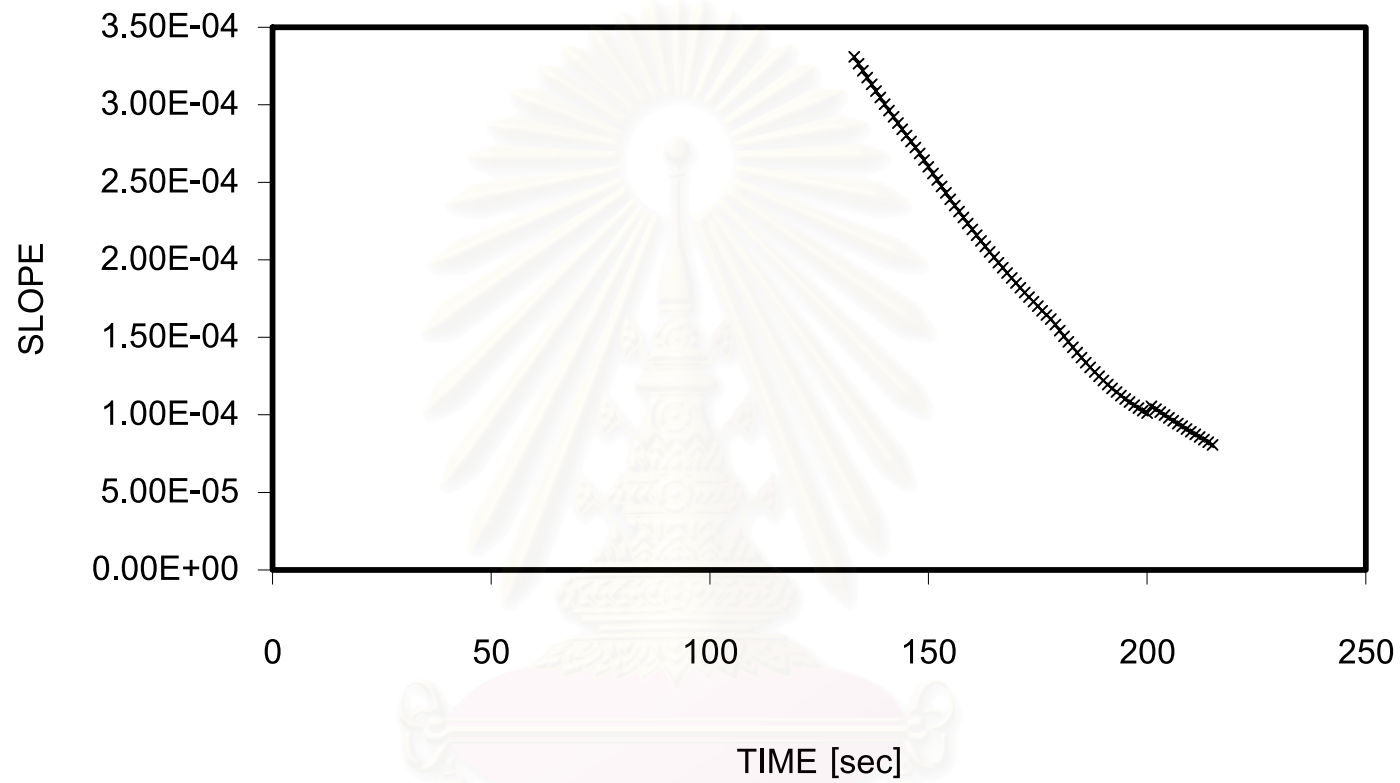
Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค ( $\sigma_y$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTO-CAL-JIS	1.23	1.24
SEDI-2Me	1.24	1.25
AUTO-CAL-JIS.v2	1.23	1.24



รูปที่ 5.21 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

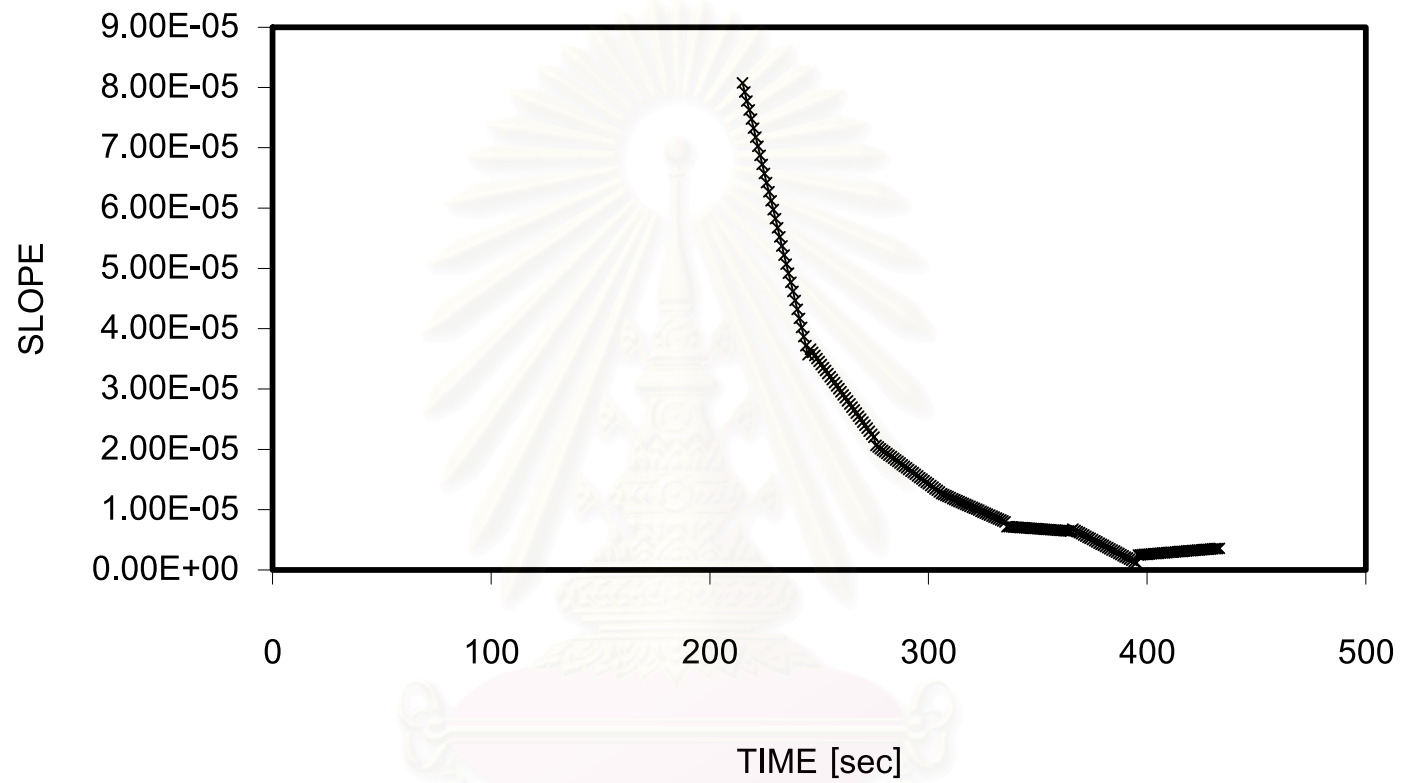
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





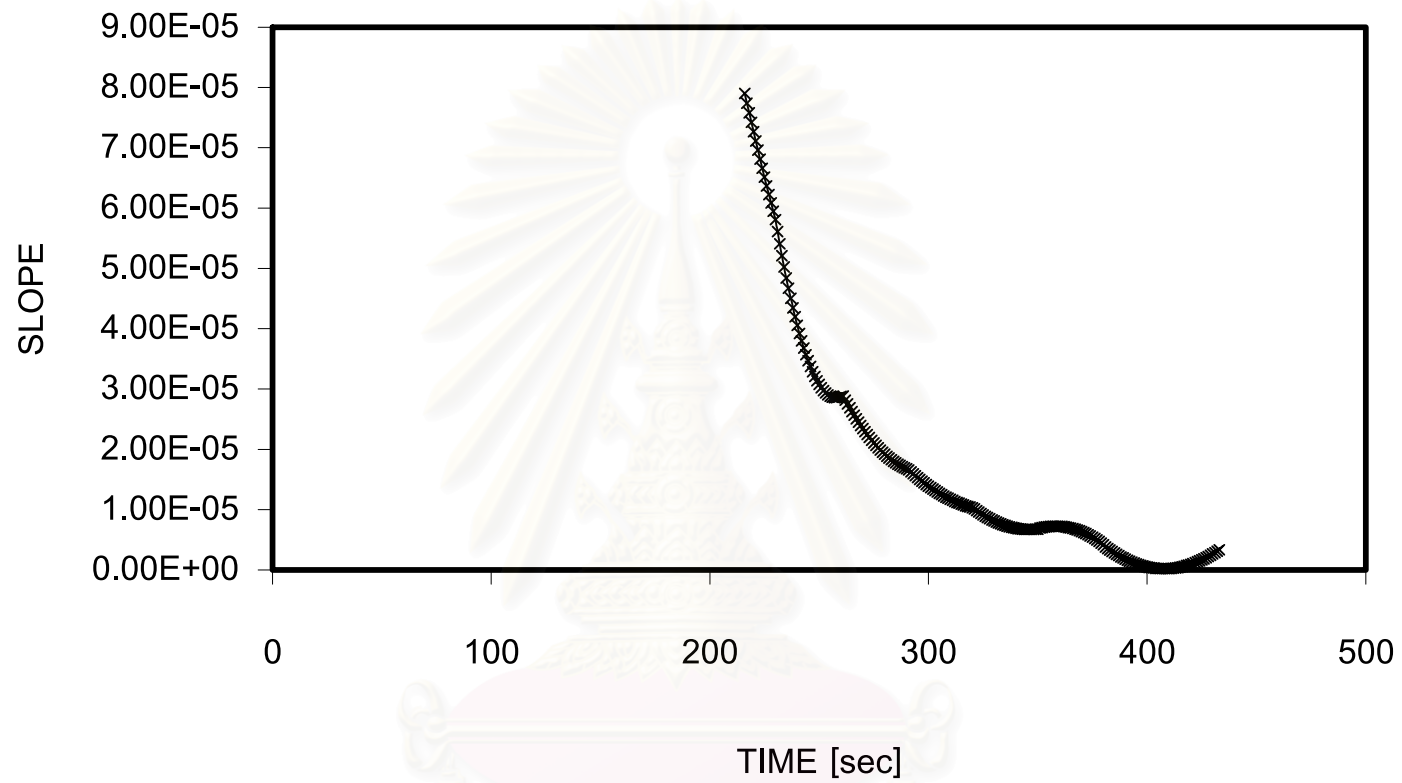
รูปที่ 5.22 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 ที่มีกรปรับเรียบความชัน สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



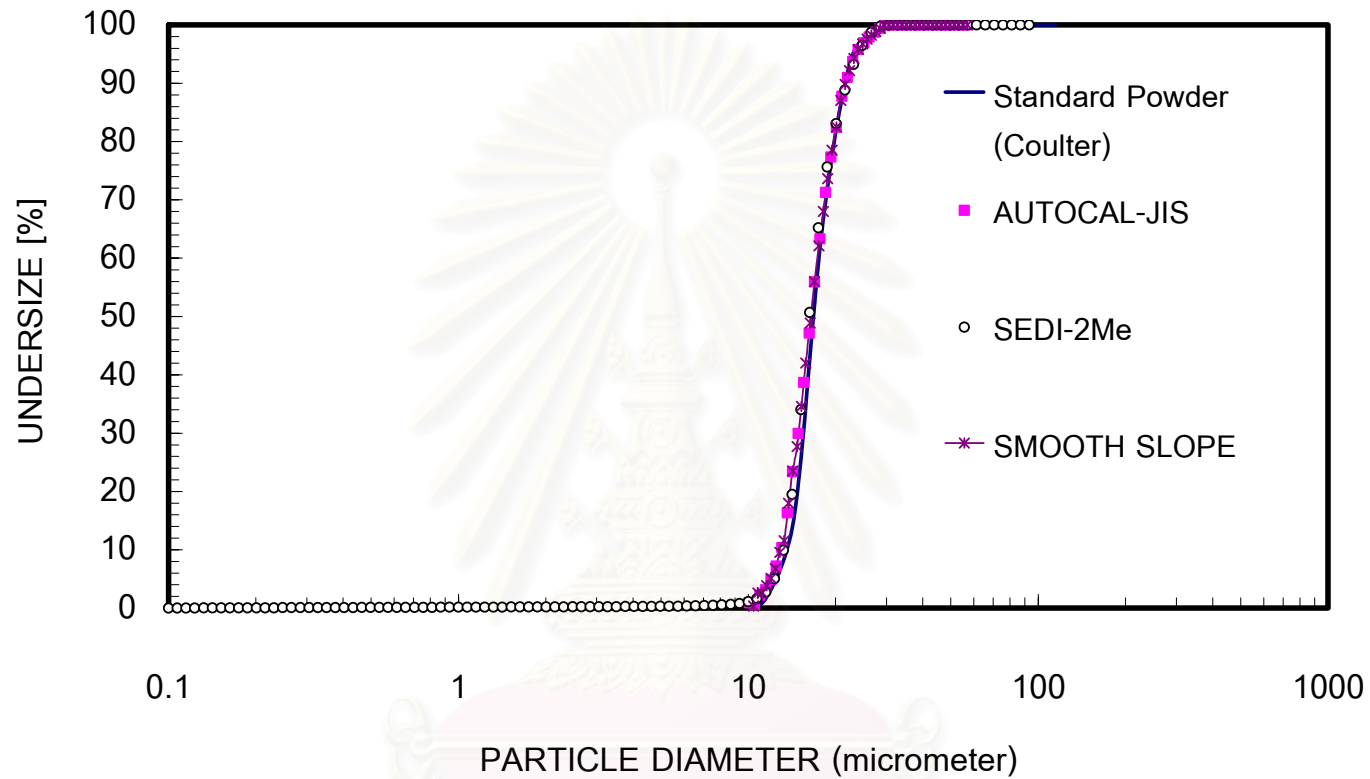
รูปที่ 5.23 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

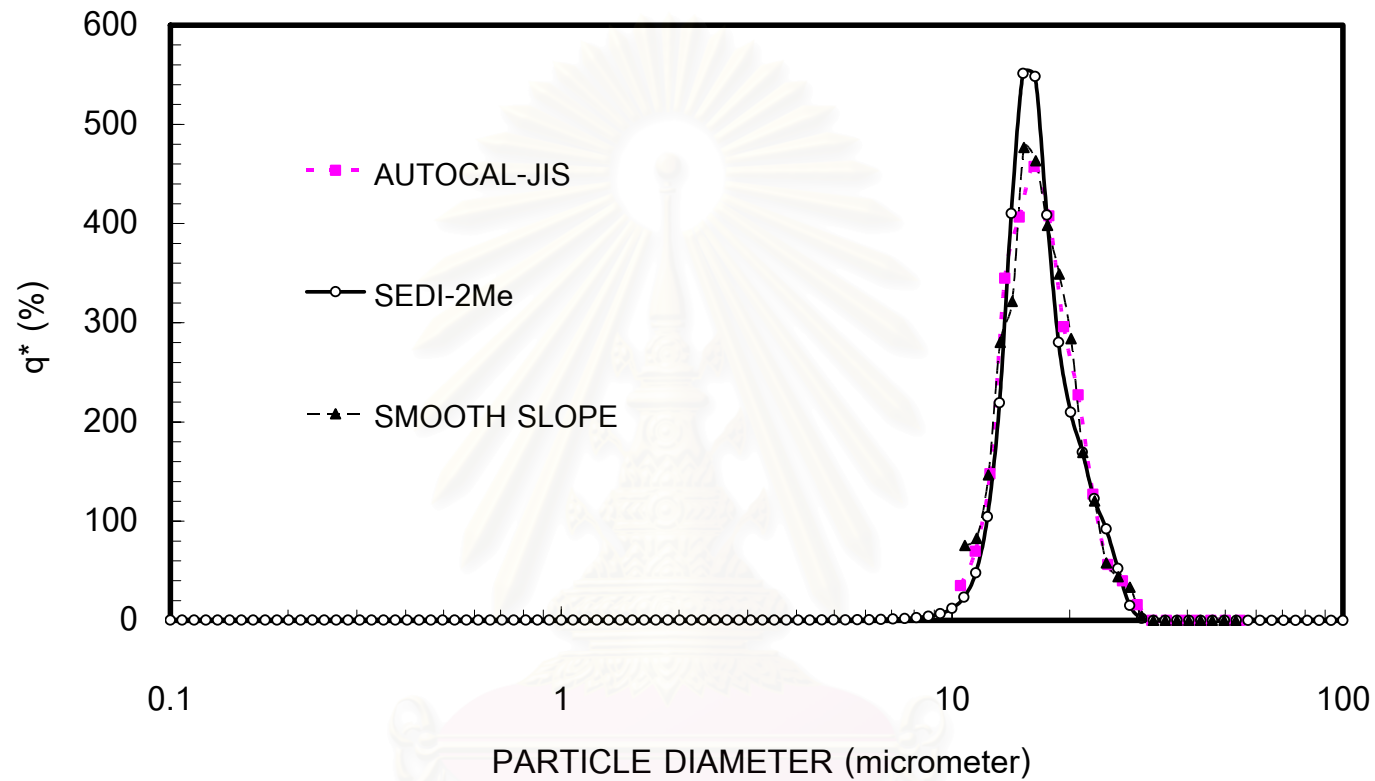


รูปที่ 5.24 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER II, NO.4 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

### 5.3.2.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาด แบบฐานนิยมคู่

อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้จากการนำอนุภาคมาตรฐาน JIS TEST POWDER II, No.3 และอนุภาคมาตรฐาน JIS TEST POWDER II, No.4 มาผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ดูรายละเอียดในตารางที่ 5.3) อนุภาคชนิดนี้จึงไม่มีข้อมูลการกระจายตัวอ้างอิง ดังนั้นในการแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาค กราฟการกระจายขนาดแบบสะสม และกราฟการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ (ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติ และกรณีที่ใช้สเกลล็อก) จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ซึ่งความชันของชุดข้อมูลที่ผ่านการปรับเรียบจะแสดงในรูปที่ 5.27, 5.30, 5.34, 5.36, 5.40 และ 5.42 จะมีลักษณะต่อเนื่องมากขึ้นกว่าเดิมอย่างเห็นได้ชัด

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดจากข้อมูลการทดลองของอนุภาค BIMODAL1, BIMODAL2 และอนุภาค BIMODAL3 ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแต่ละชนิดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล ทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.31, 5.37 และ 5.43

ตารางที่ 5.11, 5.13 และ 5.15 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผลทั้งสองแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น พบว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง 10, 25, 50, 75 และ 90 % oversize ที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีลักษณะคล้ายกันกับที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ดังแสดงในรูปที่ 5.32, 5.38 และ 5.44 โดยฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอด (peak) ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาค ประมาณ 8 และ 16 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3 ( $8 \pm 0.6$ ) และอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4 ( $14 \pm 1$ ) แต่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มี amplitude

สูงกว่าที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิมเล็กน้อย และใกล้เคียงกับฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

ข้อมูลจากตารางที่ 5.12, 5.14, และ 5.16 แสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคของฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 สามารถวัดและวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ได้อย่างถูกต้อง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

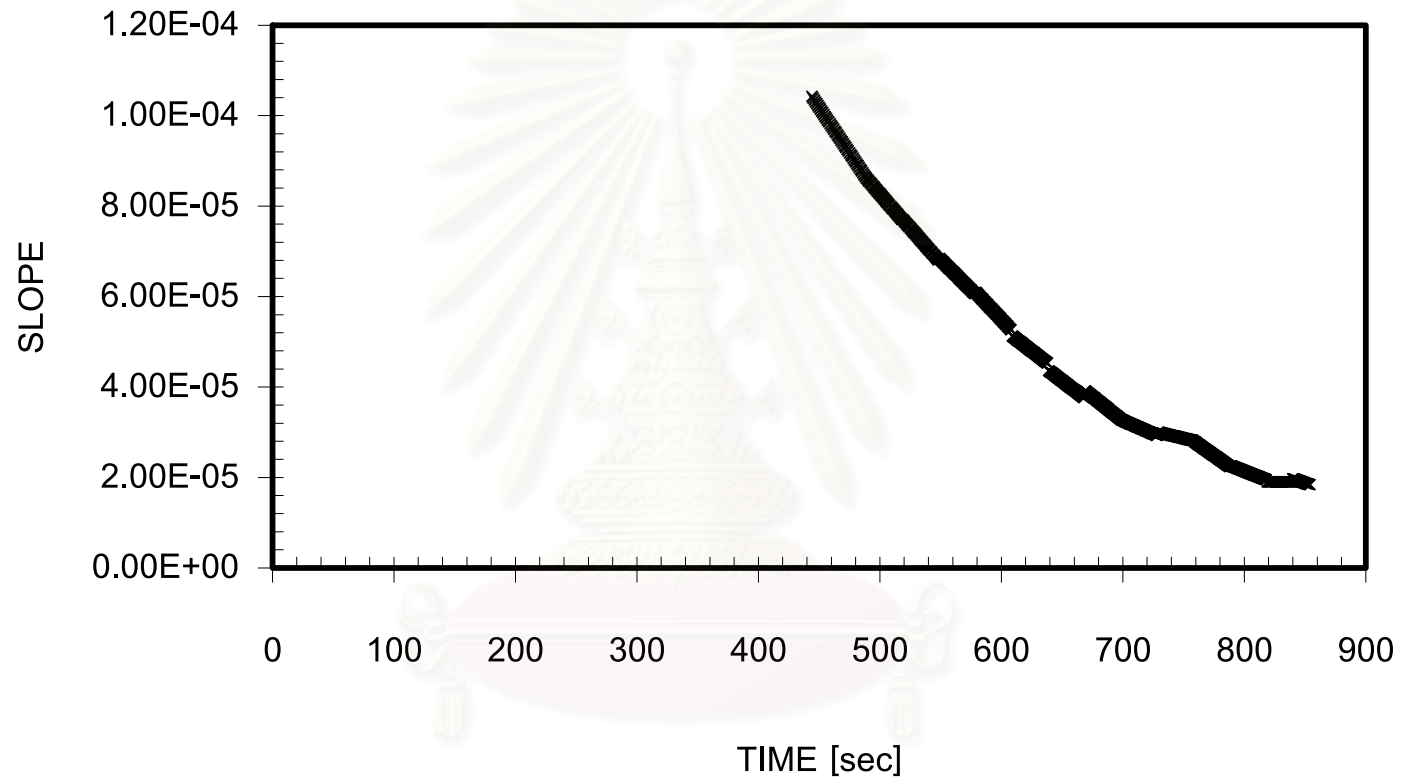
ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL1

Oversize % (on mass basis)	Particle size (microns)					
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log
10	15.77	15.72	16.23	16.06	15.72	15.71
25	11.34	11.35	11.23	11.38	11.36	11.34
50	9.09	9.09	8.97	8.93	9.08	9.09
75	7.55	7.55	7.63	7.64	7.63	7.53
90	6.61	6.48	6.53	6.68	6.33	6.48

ตารางที่ 5.12 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค BIMODAL1

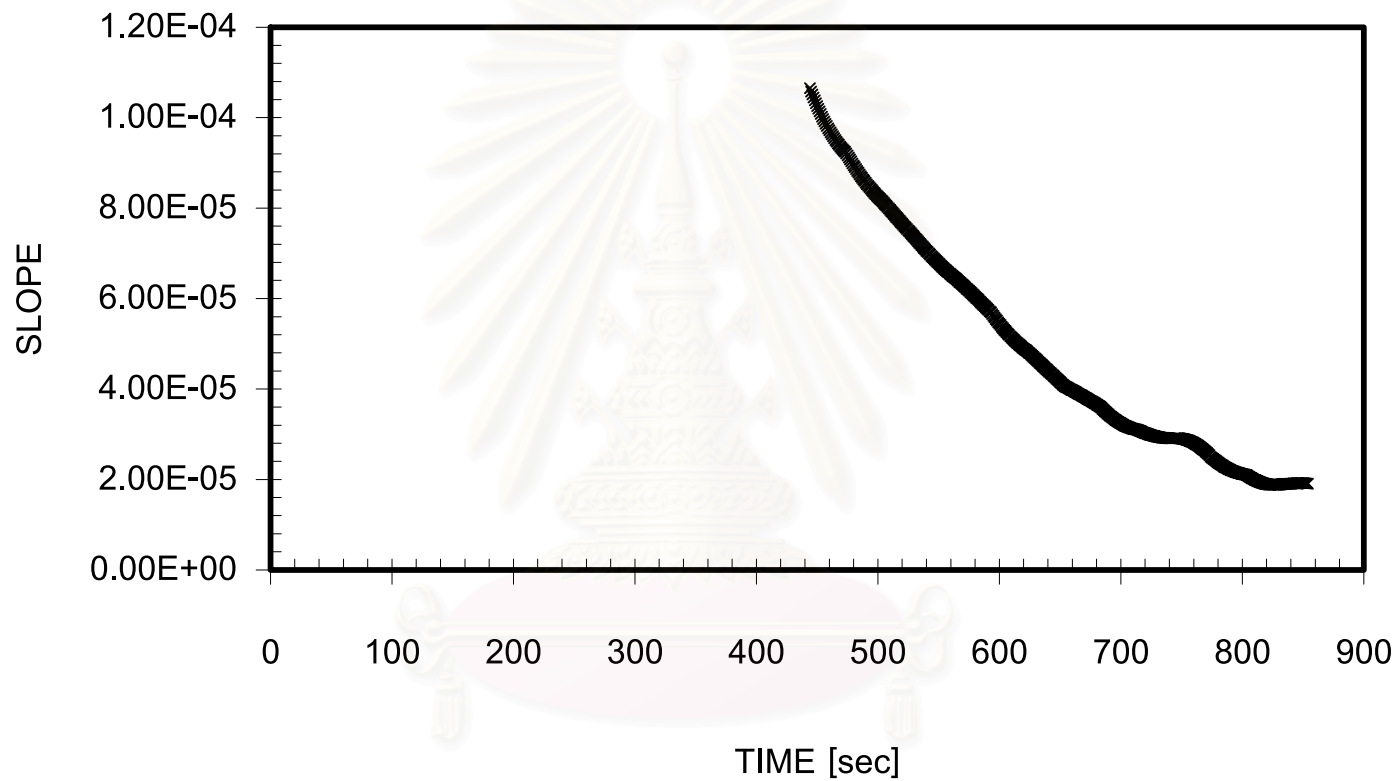
Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTOCAL-JIS	1.46	1.46
SEDI-2Me	1.54	1.55
AUTOCAL-JIS.v2	1.45	1.46





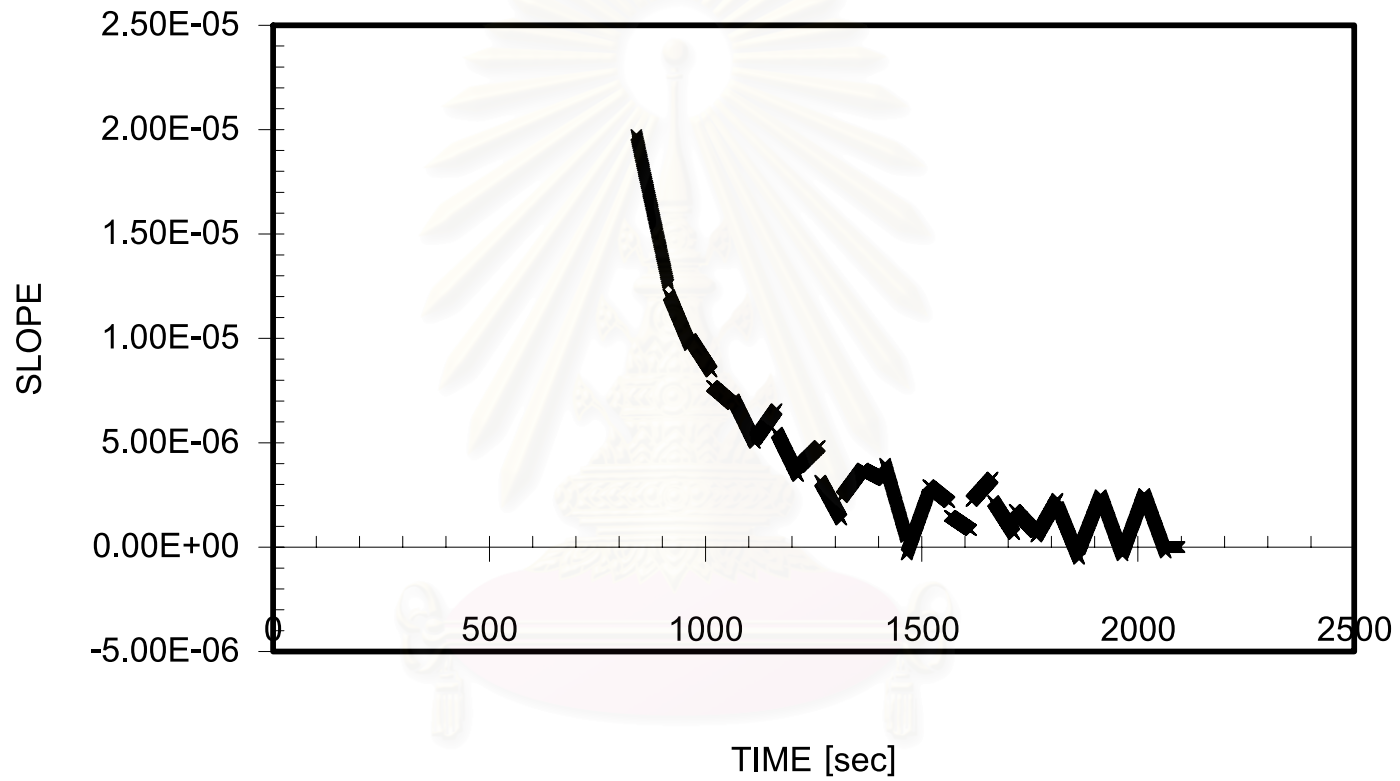
รูปที่ 5.27 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



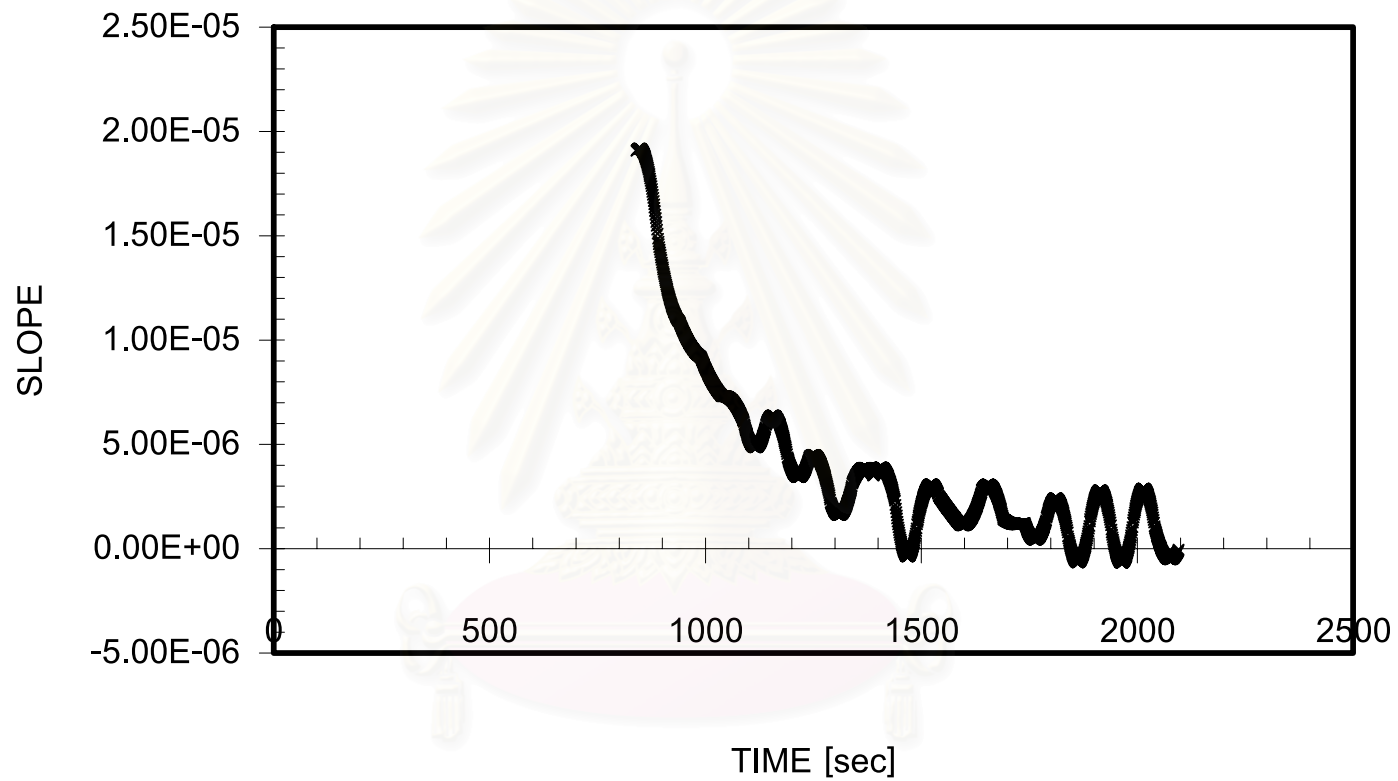
รูปที่ 5.28 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



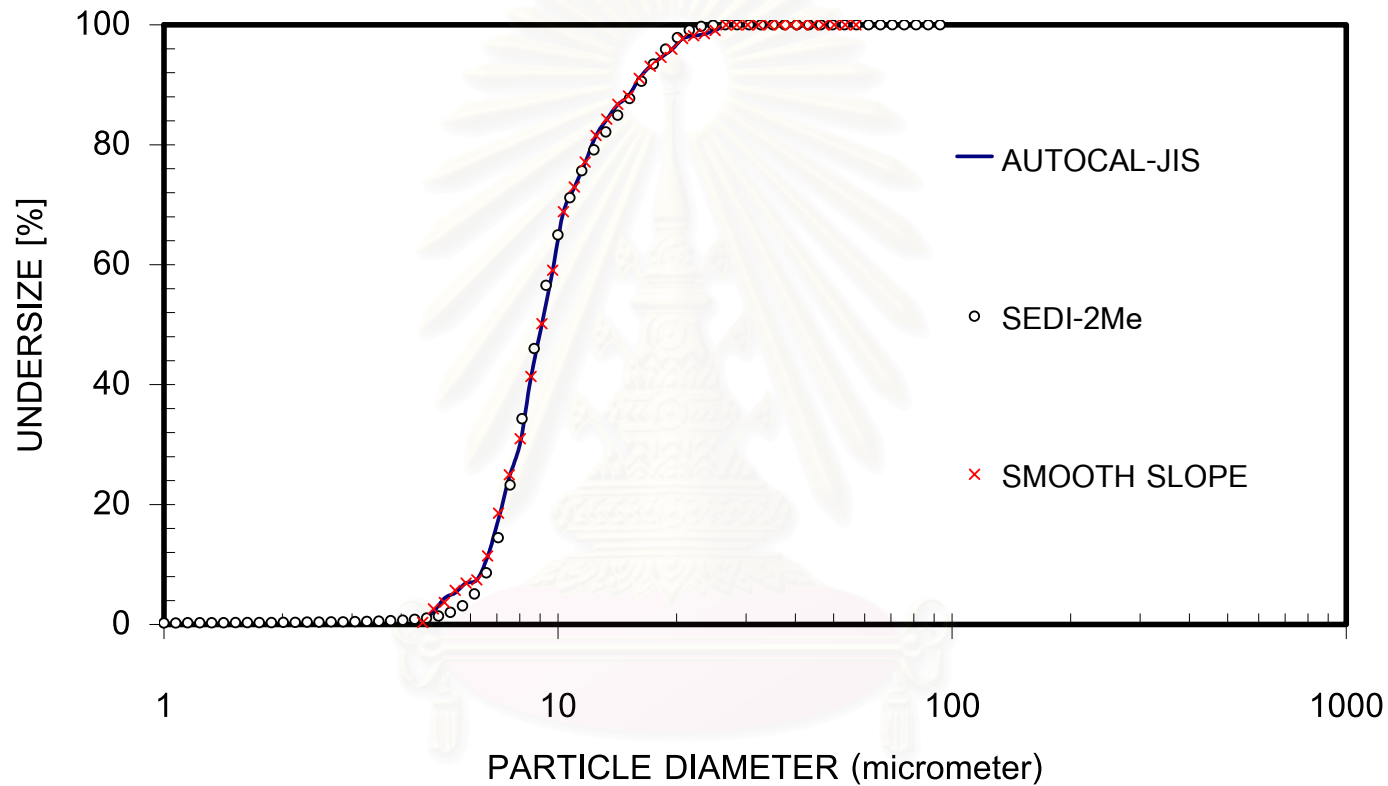
รูปที่ 5.29 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

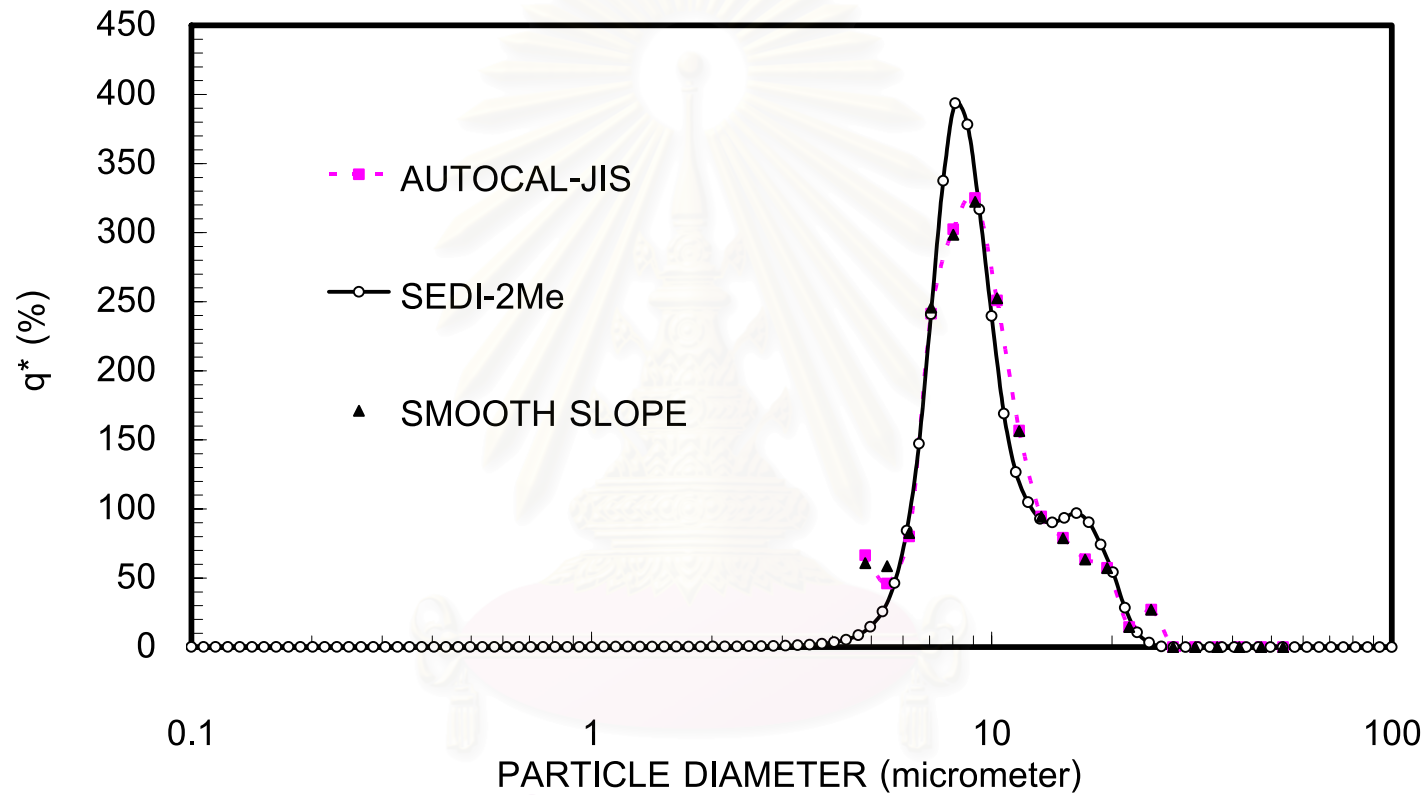


รูปที่ 5.30 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL1 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ใน กรณีสี่ที่ใช้สเกล semi-log



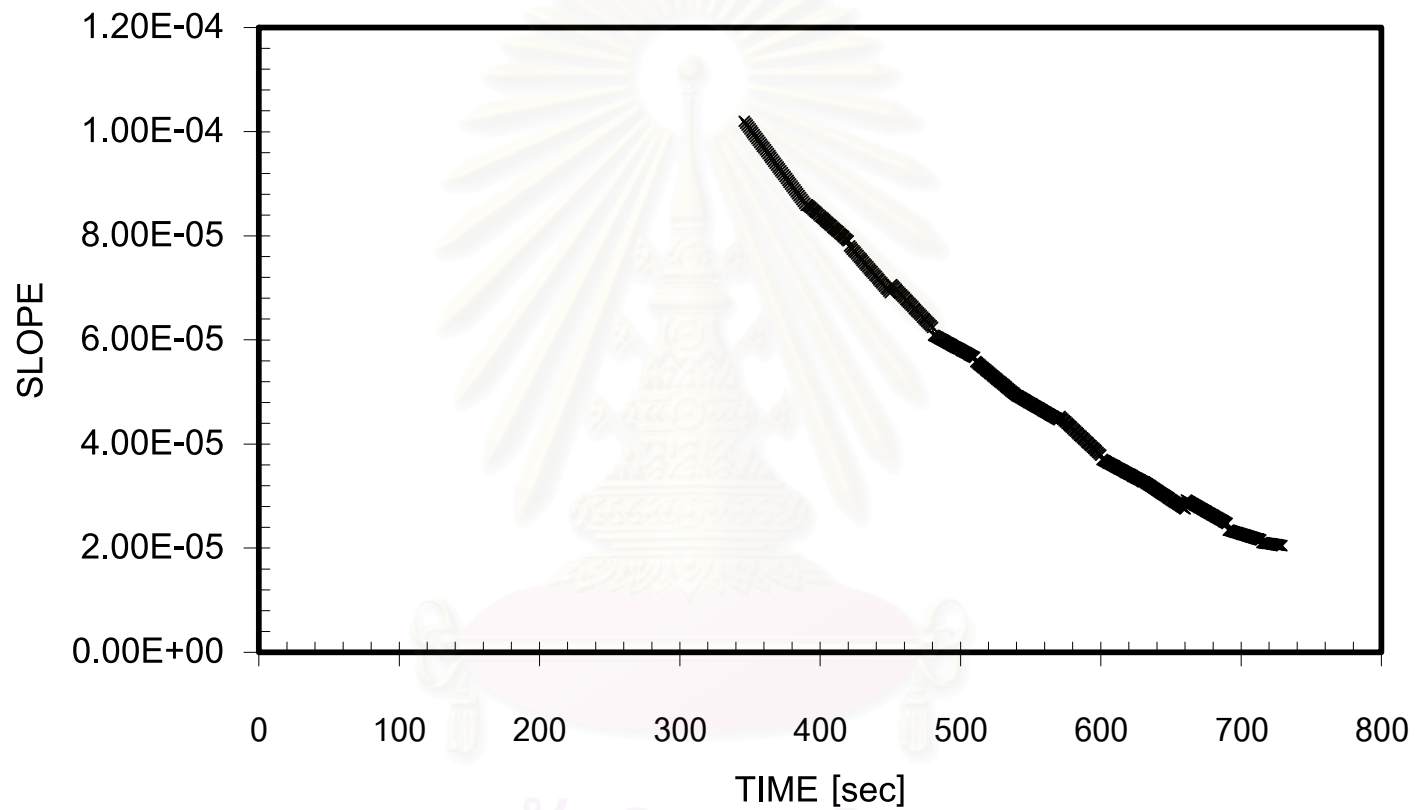
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL2

Oversize % (on mass basis)	Particle size (microns)					
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log
10	19.27	19.25	19.24	19.18	19.28	19.27
25	16.18	16.16	16.75	16.61	16.20	16.16
50	11.23	11.10	11.00	11.07	11.30	11.15
75	8.38	8.35	8.36	8.29	8.31	8.40
90	6.86	7.02	7.17	7.18	6.86	7.08

ตารางที่ 5.14 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค BIMODAL 2

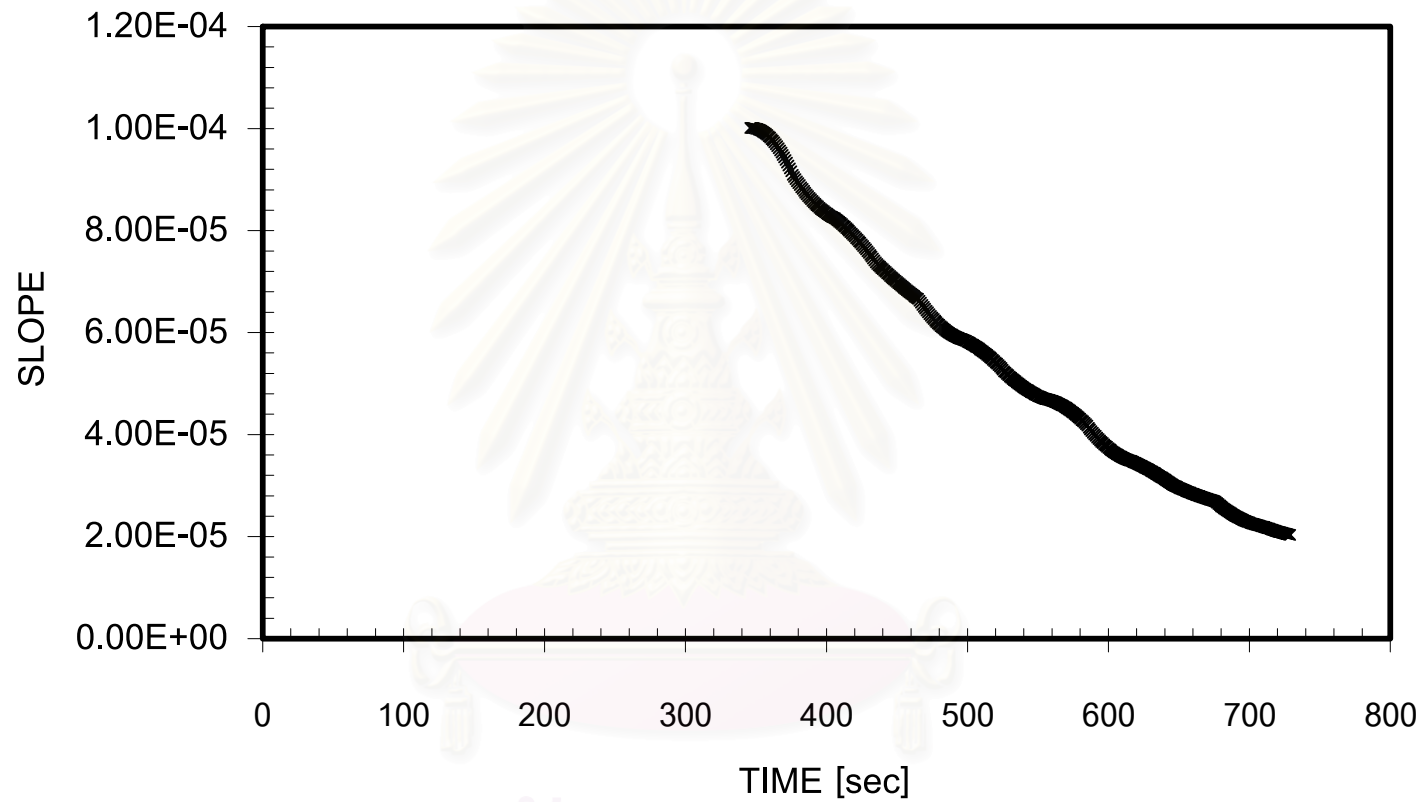
Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTOCAL-JIS	1.56	1.57
SEDI-2Me	1.63	1.62
AUTOCAL-JIS.v2	1.56	1.57



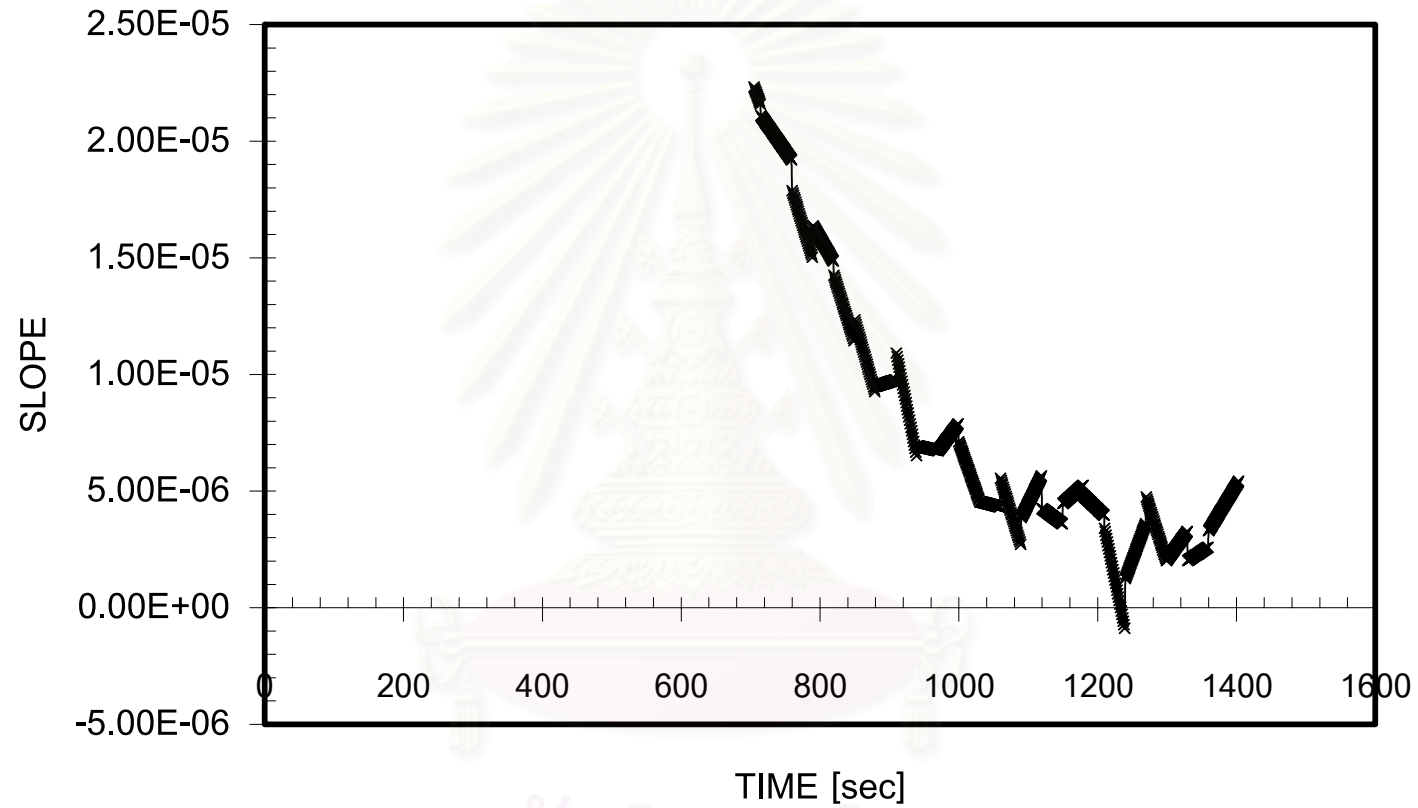
รูปที่ 5.33 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



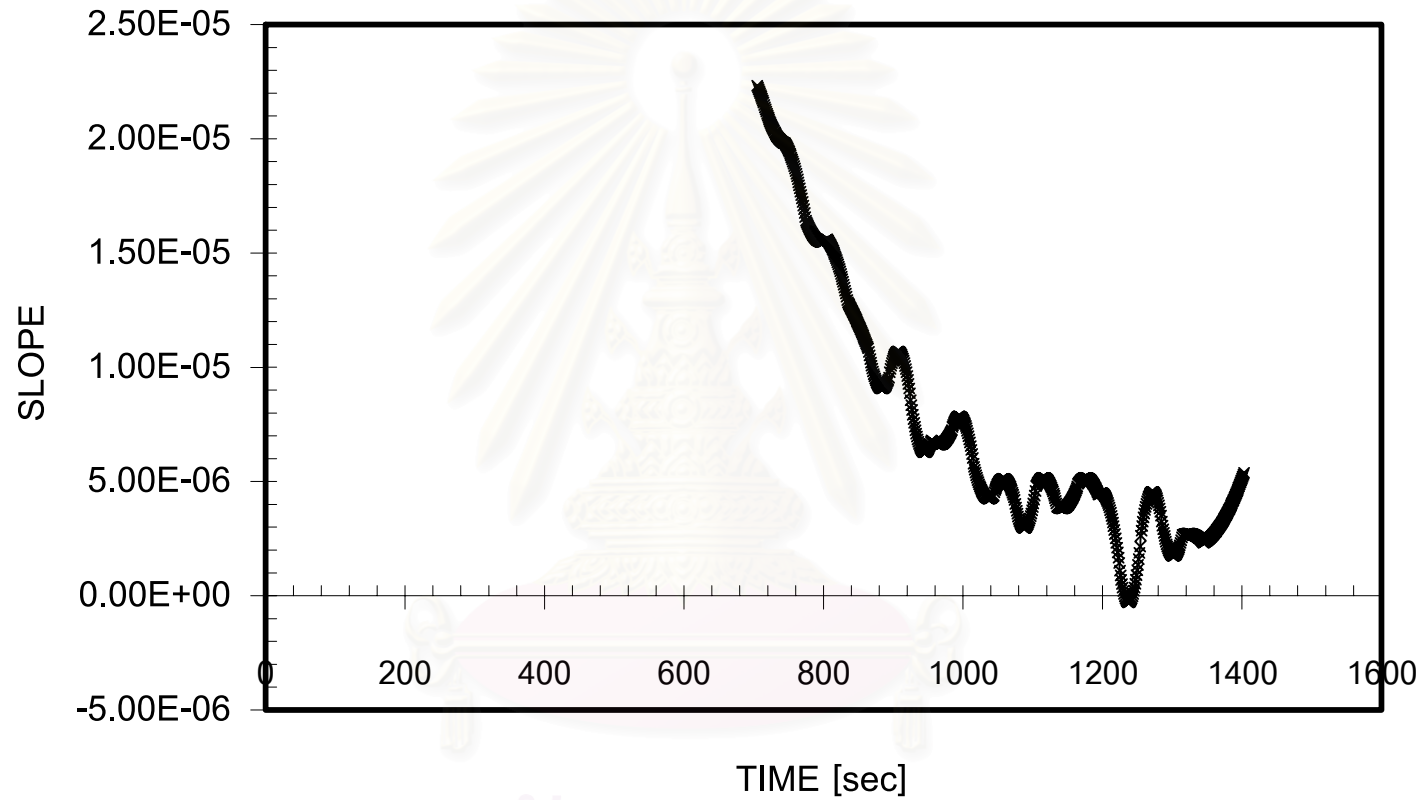


รูปที่ 5.34 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

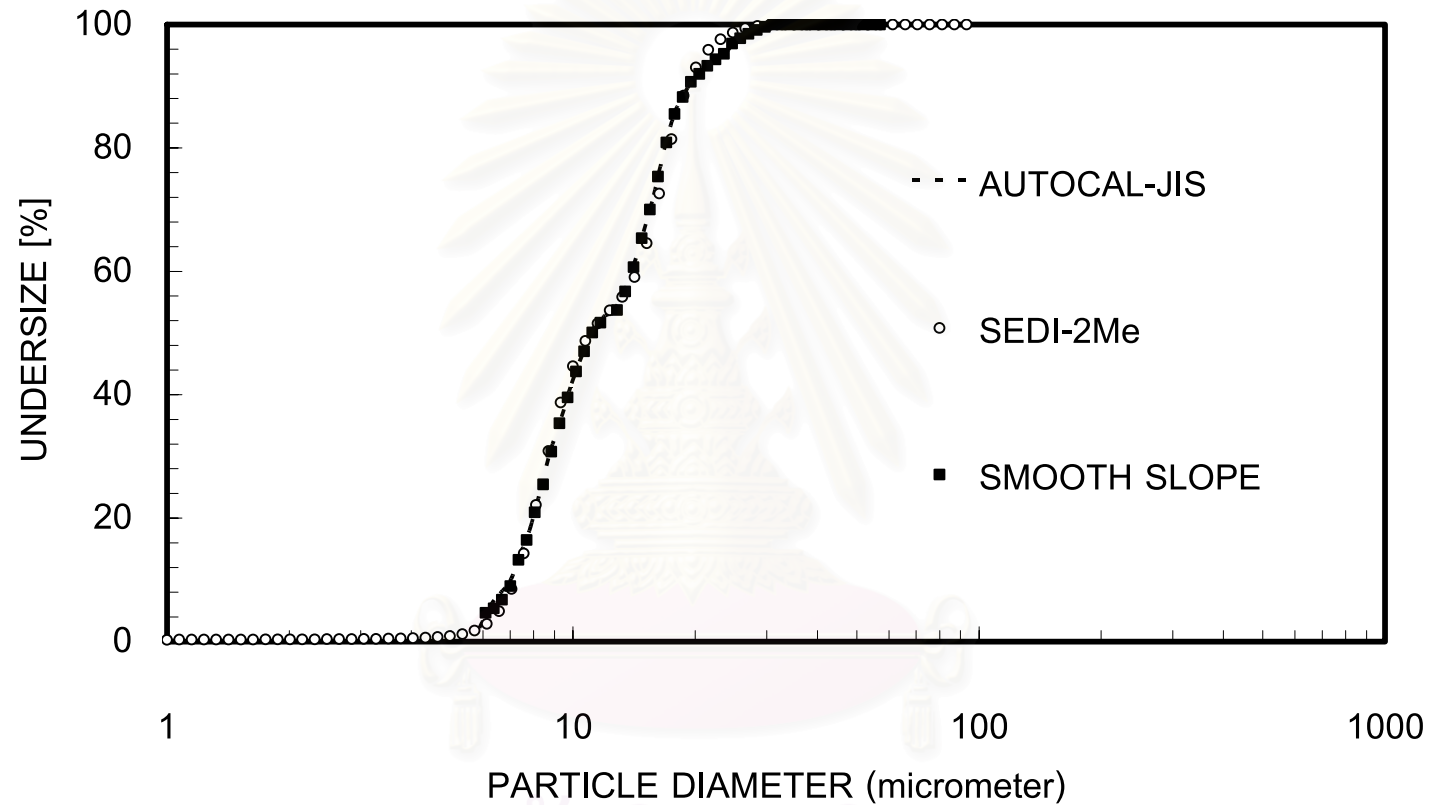


รูปที่ 5.35 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จาก โปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

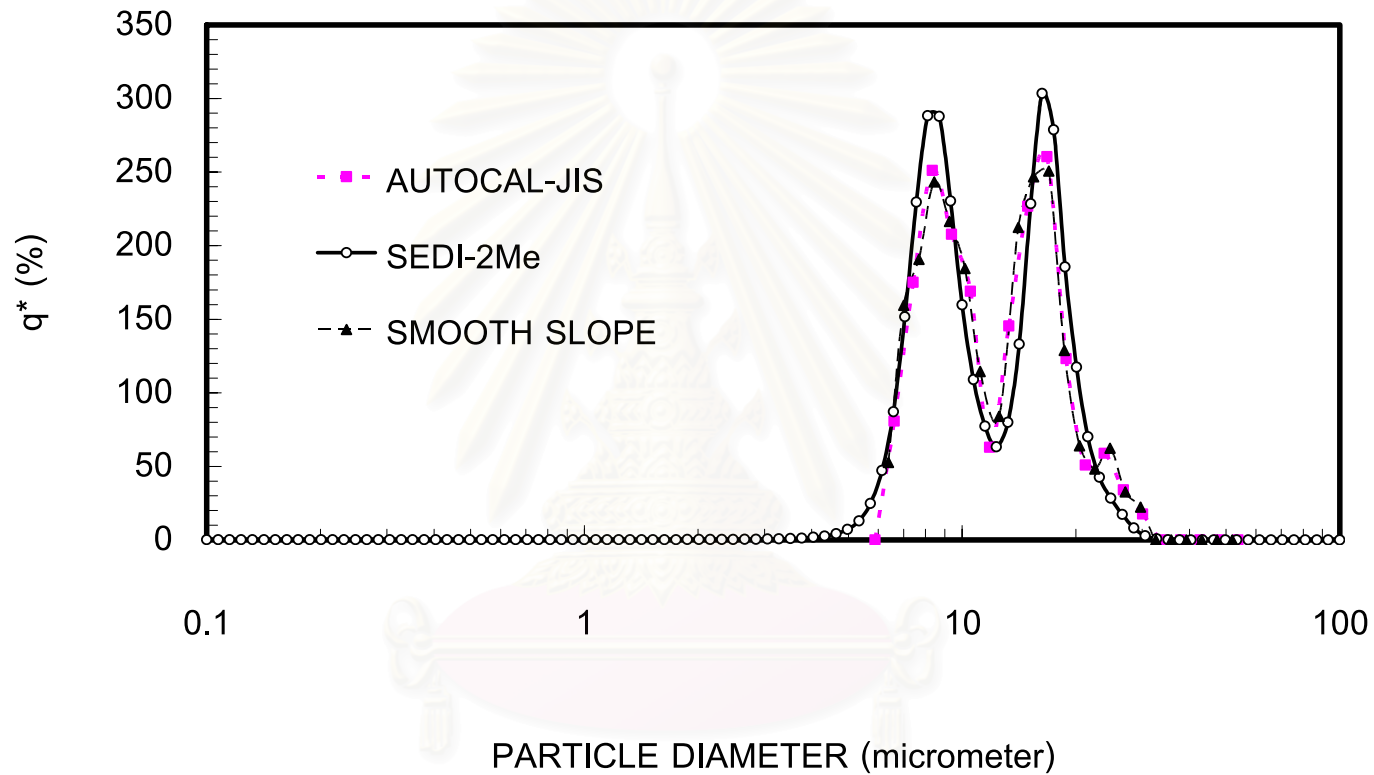
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.36 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL2 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



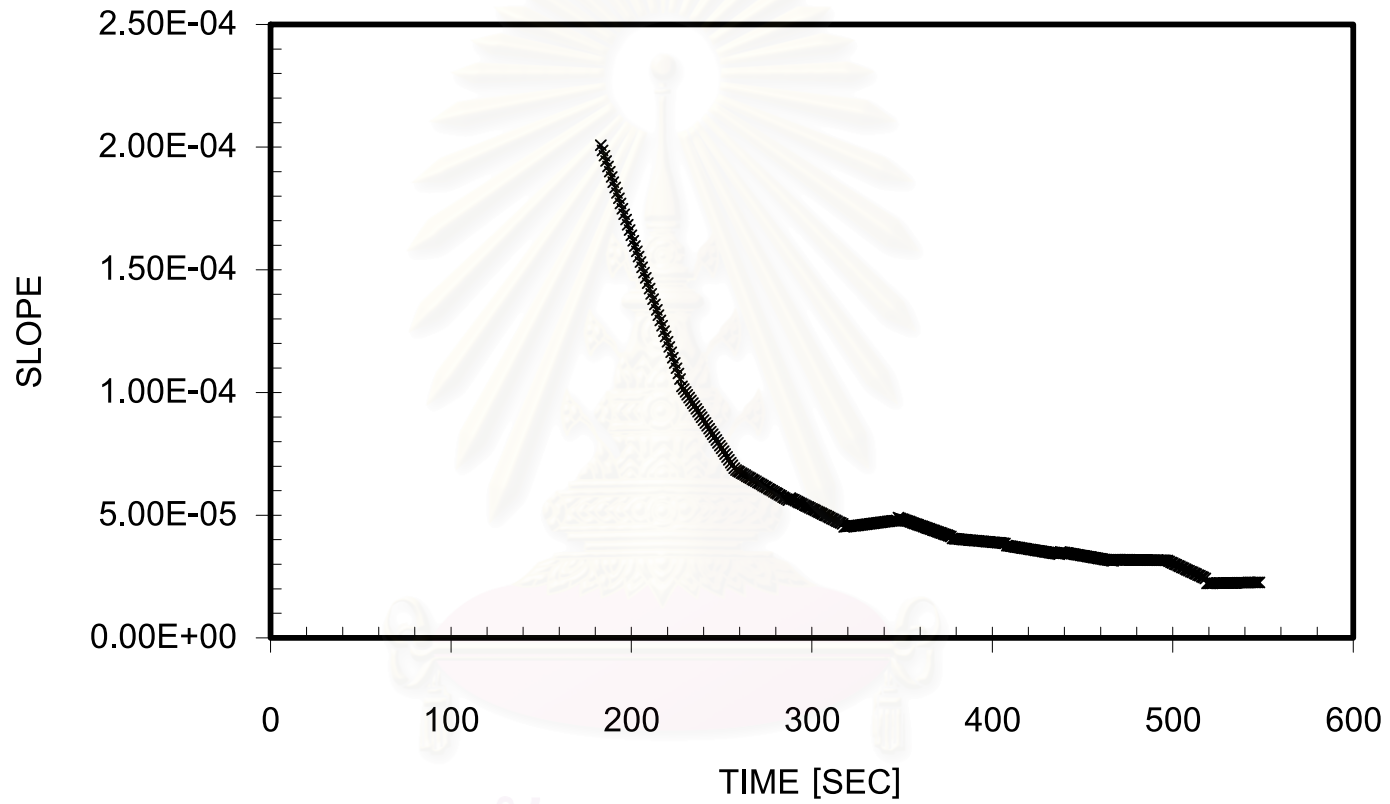
รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค BIMODAL3

Oversize % (on mass basis)	Particle size (microns)					
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log
10	19.79	19.74	19.29	19.28	19.80	19.64
25	17.06	17.07	16.82	16.83	17.07	16.73
50	14.71	14.95	15.02	15.03	14.73	14.98
75	11.61	11.66	11.22	11.27	11.70	10.92
90	8.01	7.93	8.35	8.33	8.05	7.93

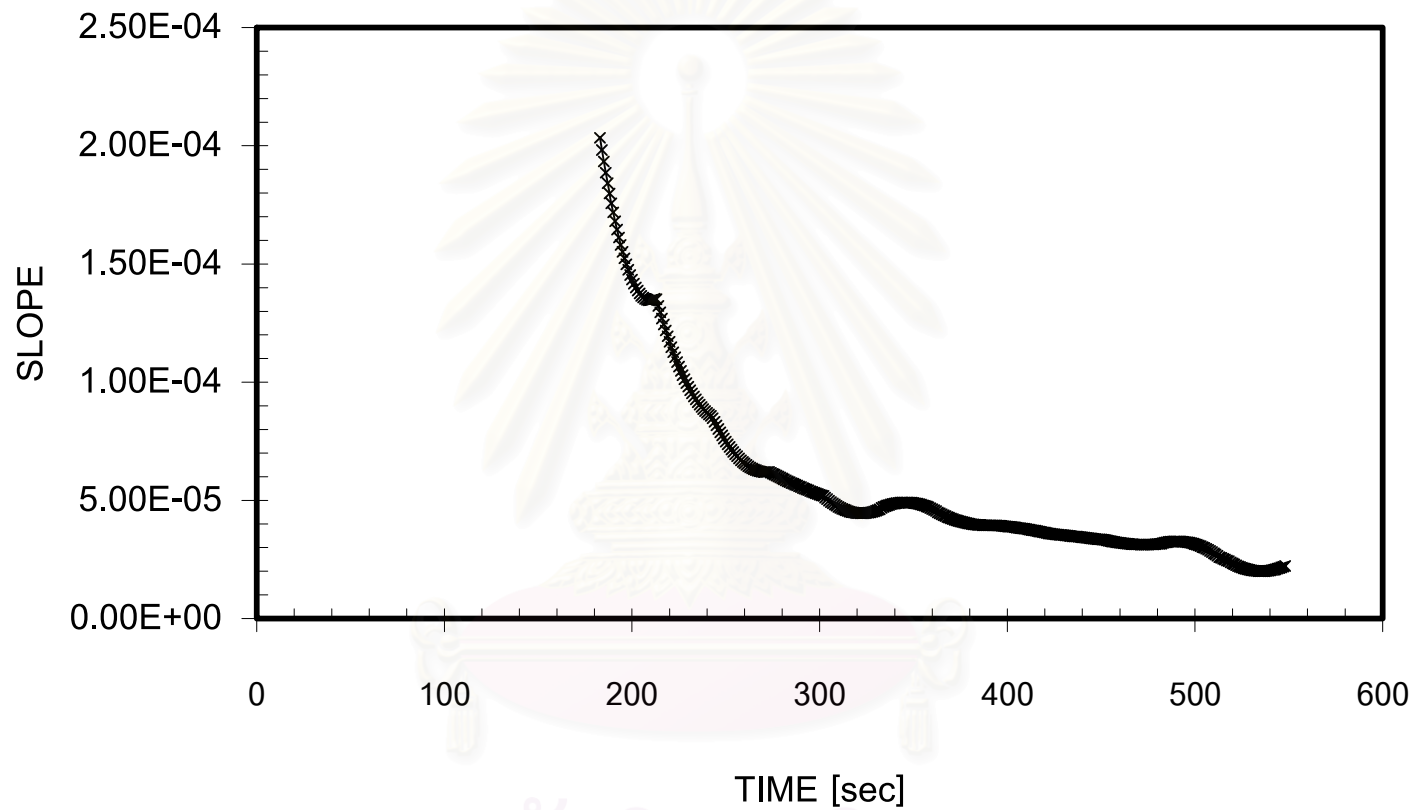
ตารางที่ 5.16 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค BIMODAL3

Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTOCAL-JIS	1.26	1.24
SEDI-2Me	1.19	1.19
AUTOCAL-JIS.v2	1.27	1.24



รูปที่ 5.39 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

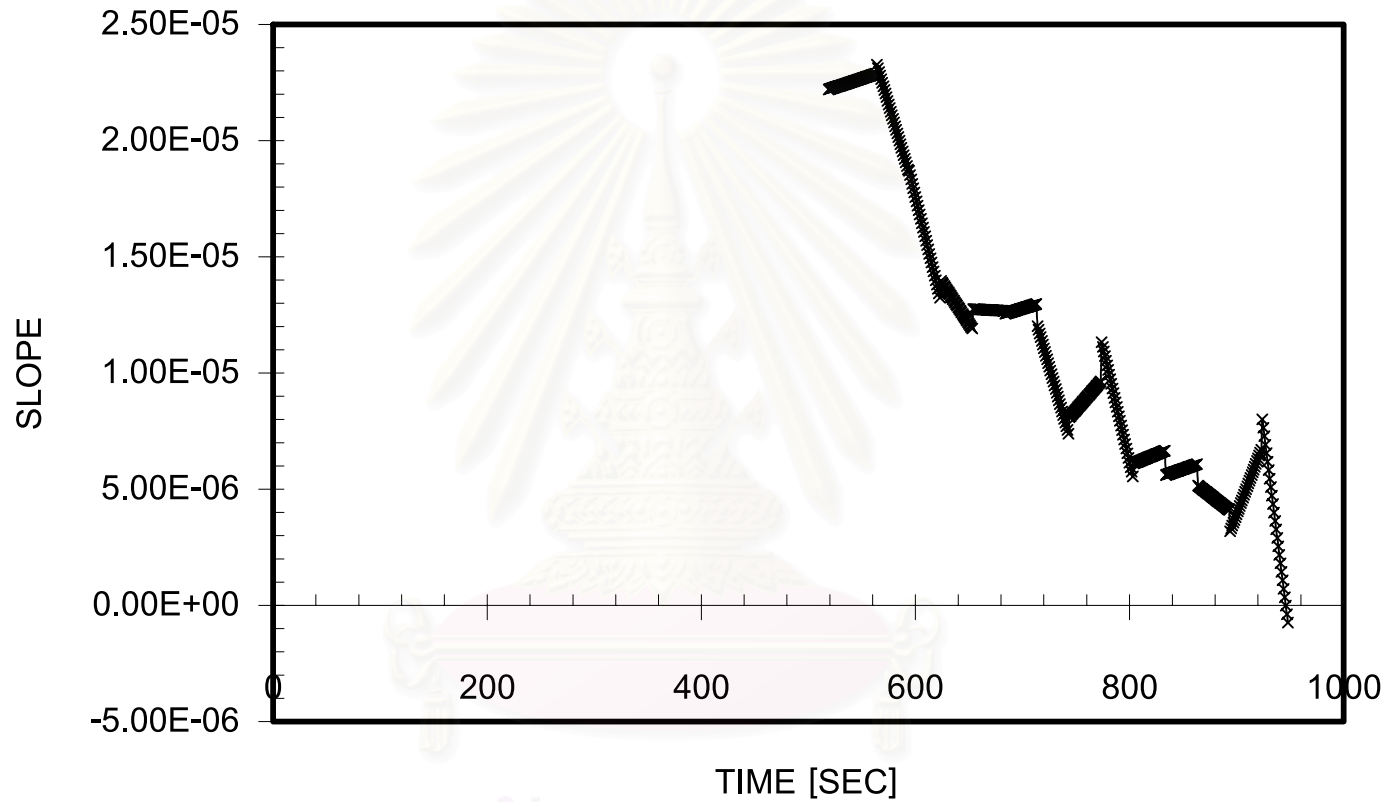
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.40 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

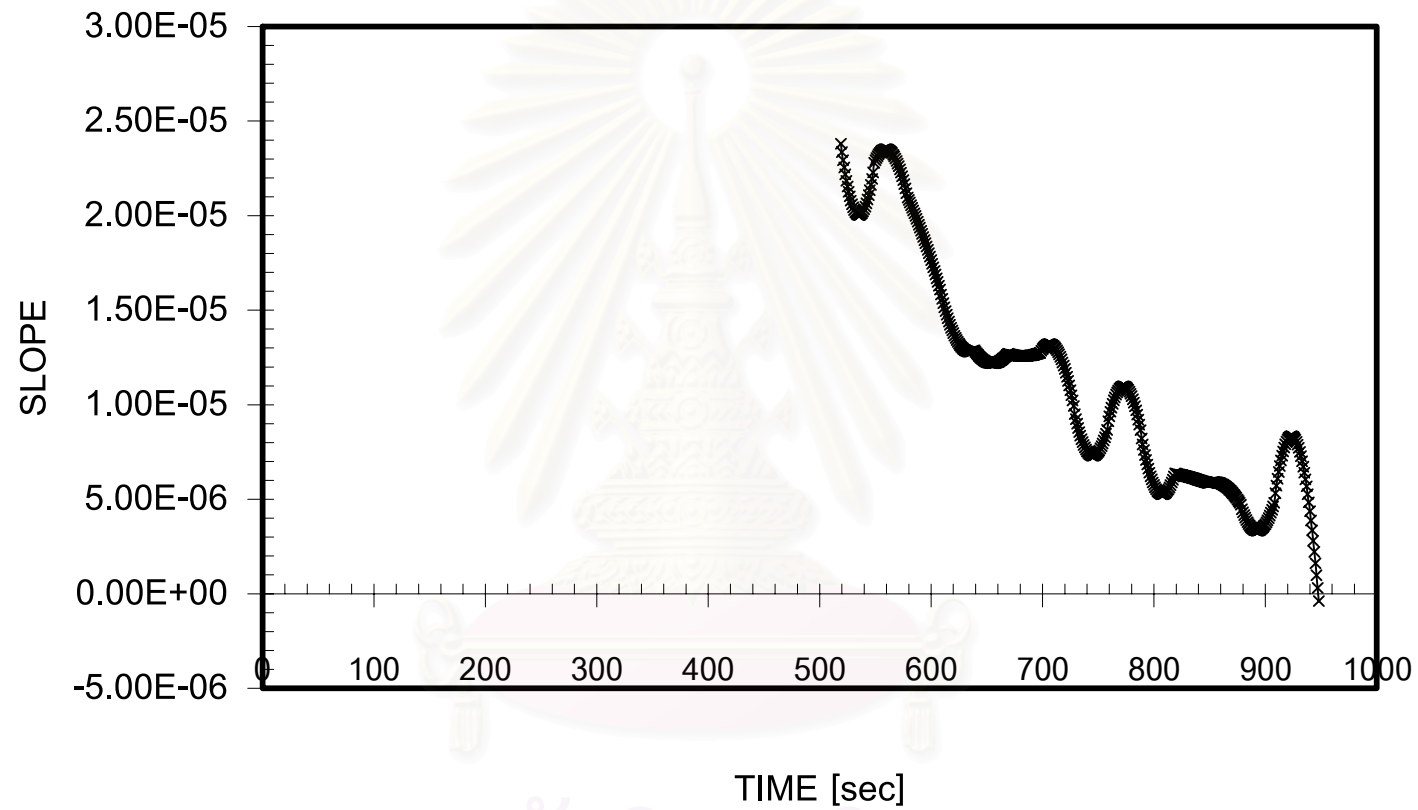
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





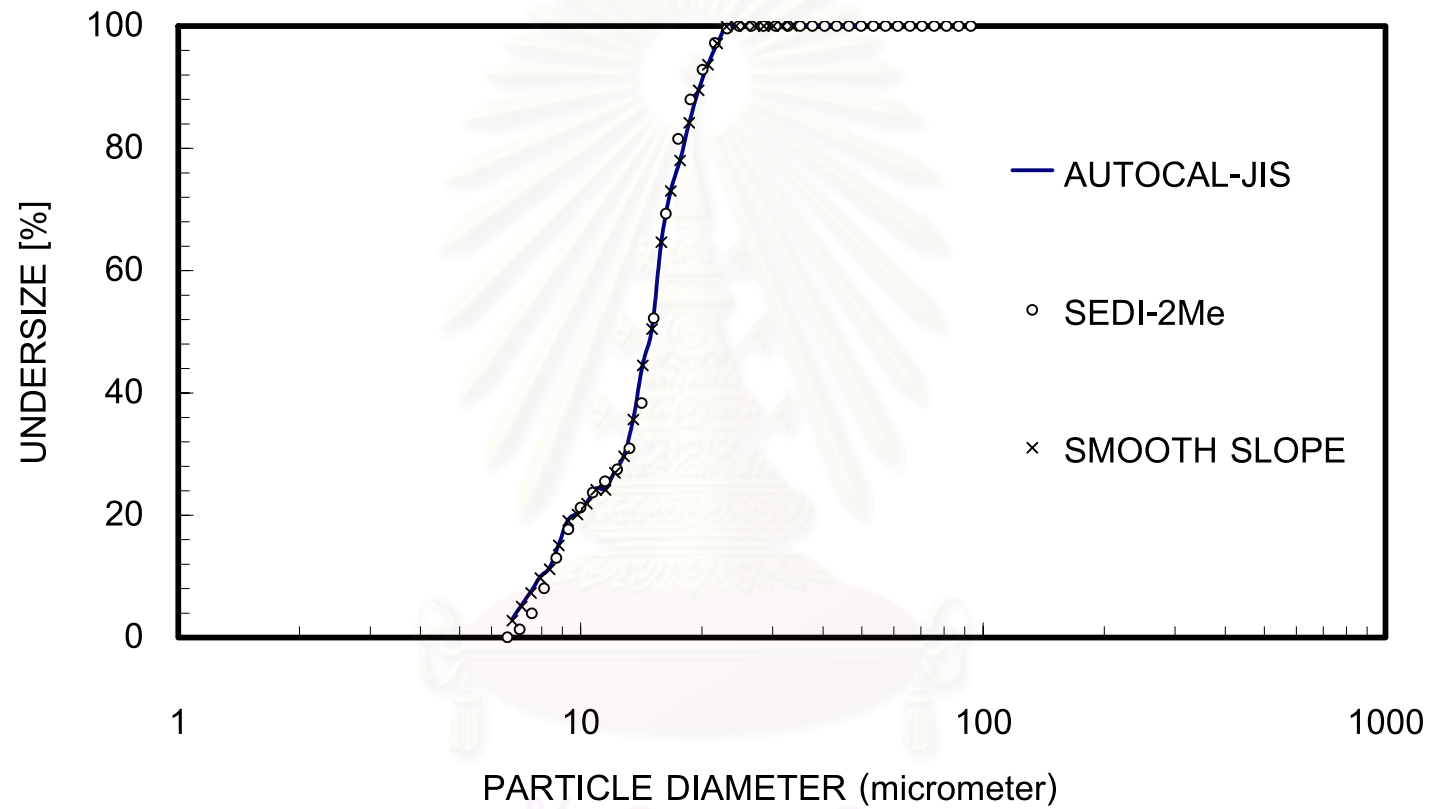
รูปที่ 5.41 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

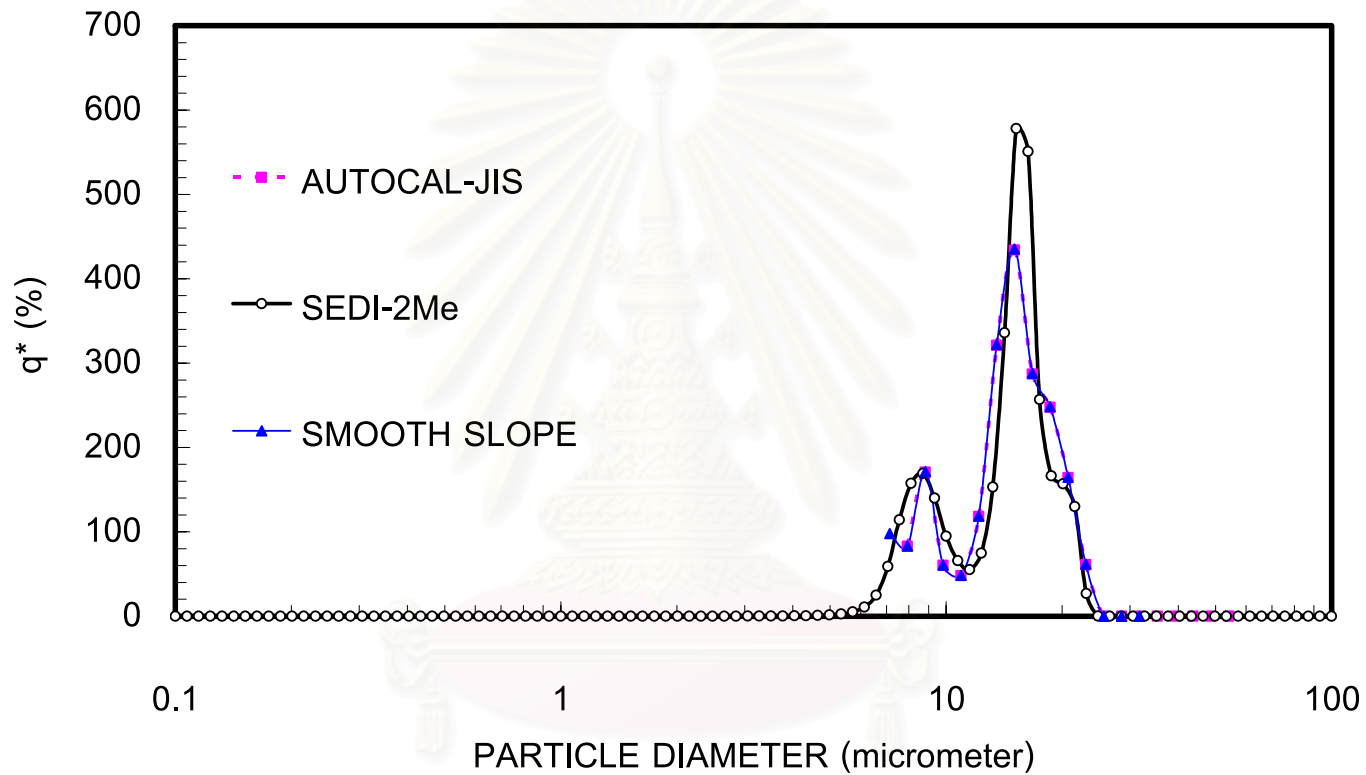


รูปที่ 5.42 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล BIMODAL3 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค BIMODAL3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



รูปที่ 5.44 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค BIMODAL3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS- SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

### 5.3.2.3 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบ ช่วงกว้าง

ในการแสดงผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาด กราฟการกระจายตัวแบบสะสม (ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติ และกรณีที่ใช้สเกลล็อก) จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2, โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งเป็นค่าการกระจายขนาดแบบสะสม ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาคที่กำหนด (Standard Powder (JIS))

ส่วนกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ (ทั้งในกรณีที่ใช้สเกลปกติ และกรณีที่ใช้สเกลล็อก) จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ผล โดยโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดจากข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5 ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผลทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 5.49

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่า % oversize ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาคที่กำหนดในเอกสารอ้างอิง กับค่า % oversize ที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้งสามแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งข้อมูลจากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสม ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาคที่กำหนดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิง

จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยโปรแกรมประมวลผลที่ประดิษฐ์ขึ้น พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5 ที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้งสามแบบมีรูปร่างต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.50 จากรูปจะพบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 จะให้

ลักษณะรูปร่างที่ราบเรียบมากกว่าค่าฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

ข้อมูลจากตารางที่ 5.18 แสดงให้เห็นว่าค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคของฟังก์ชันการกระจายขนาดที่คำนวณได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้งสามแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบช่วงกว้าง โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 สามารถคำนวณการกระจายขนาดได้อย่างถูกต้อง และให้รูปร่างของฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ราบเรียบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิมและ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me



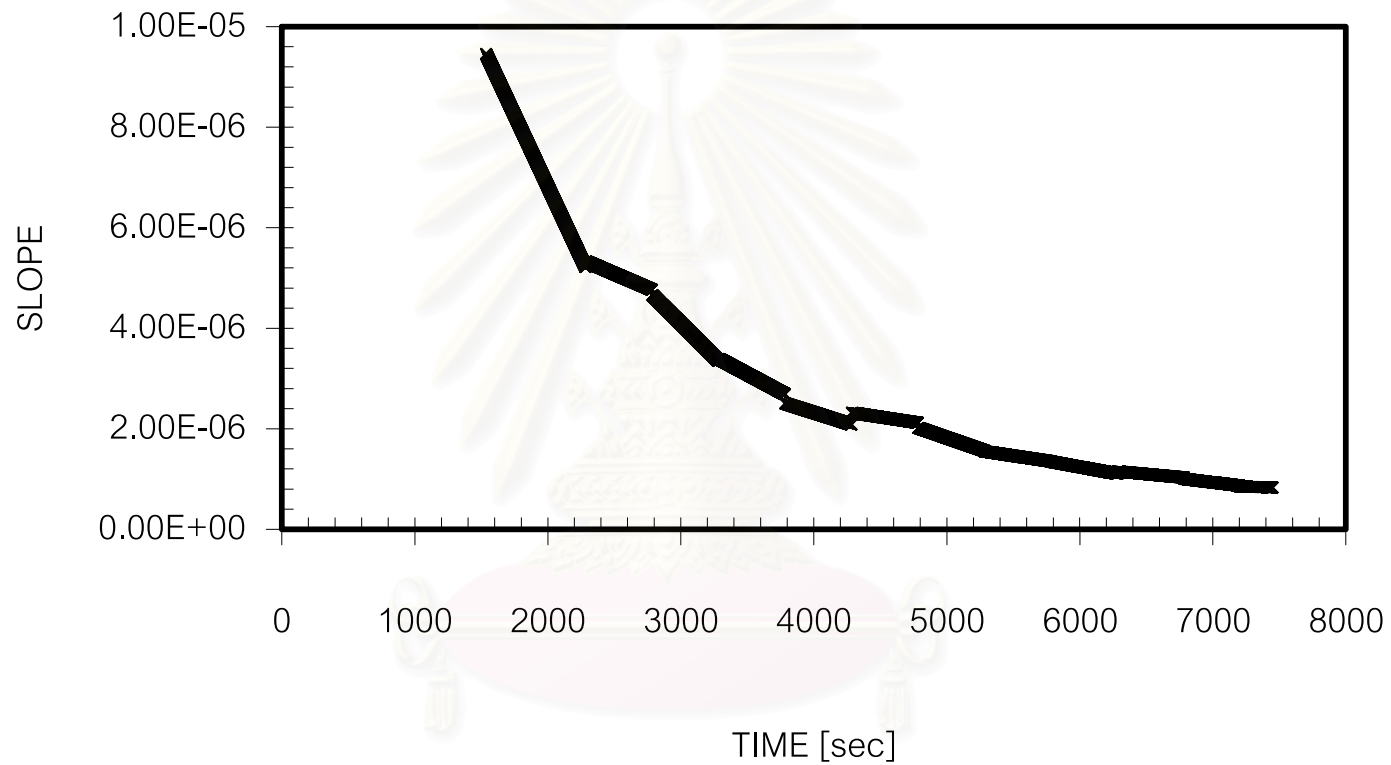
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม  
AUTOCAL-JIS และ โปรแกรม SEDI-2Me ของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5

Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Oversize (on mass basis) %						
	JIS (Z8901- 1995)	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		AUTOCAL-JIS.v2	
		Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log	Normal scale	Semi-log
5	84 $\pm$ 5	84.73	84.39	83.04	82.28	83.91	84.18
10	60 $\pm$ 5	59.86	59.49	59.67	59.92	58.98	58.92
20	32 $\pm$ 3	32.42	32.35	34.15	30.83	31.54	31.51
30	15 $\pm$ 3	16.65	15.58	15.13	15.26	14.80	15.93
40	8 $\pm$ 3	7.17	7.40	0.67	4.05	6.88	6.77
106	0	-	-	0.00	0.00	-	-

ตารางที่ 5.18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณของอนุภาค  
JIS TEST POWDER I, No.5

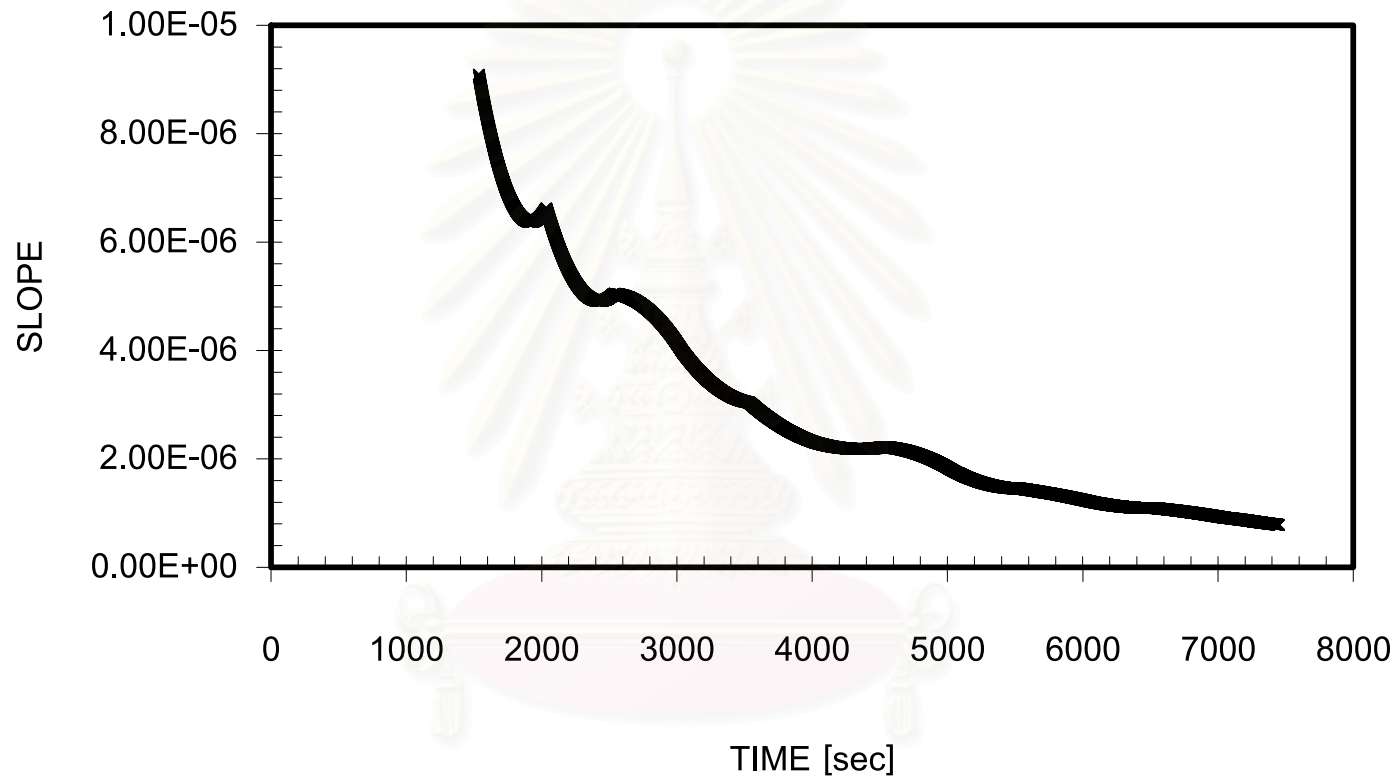
Analytical method	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค( $\sigma_g$ )	
	Normal scale	Semi – log scale
AUTOCAL-JIS	2.30	2.30
SEDI-2Me	2.31	2.30
AUTOCAL-JIS.v2	2.30	2.31



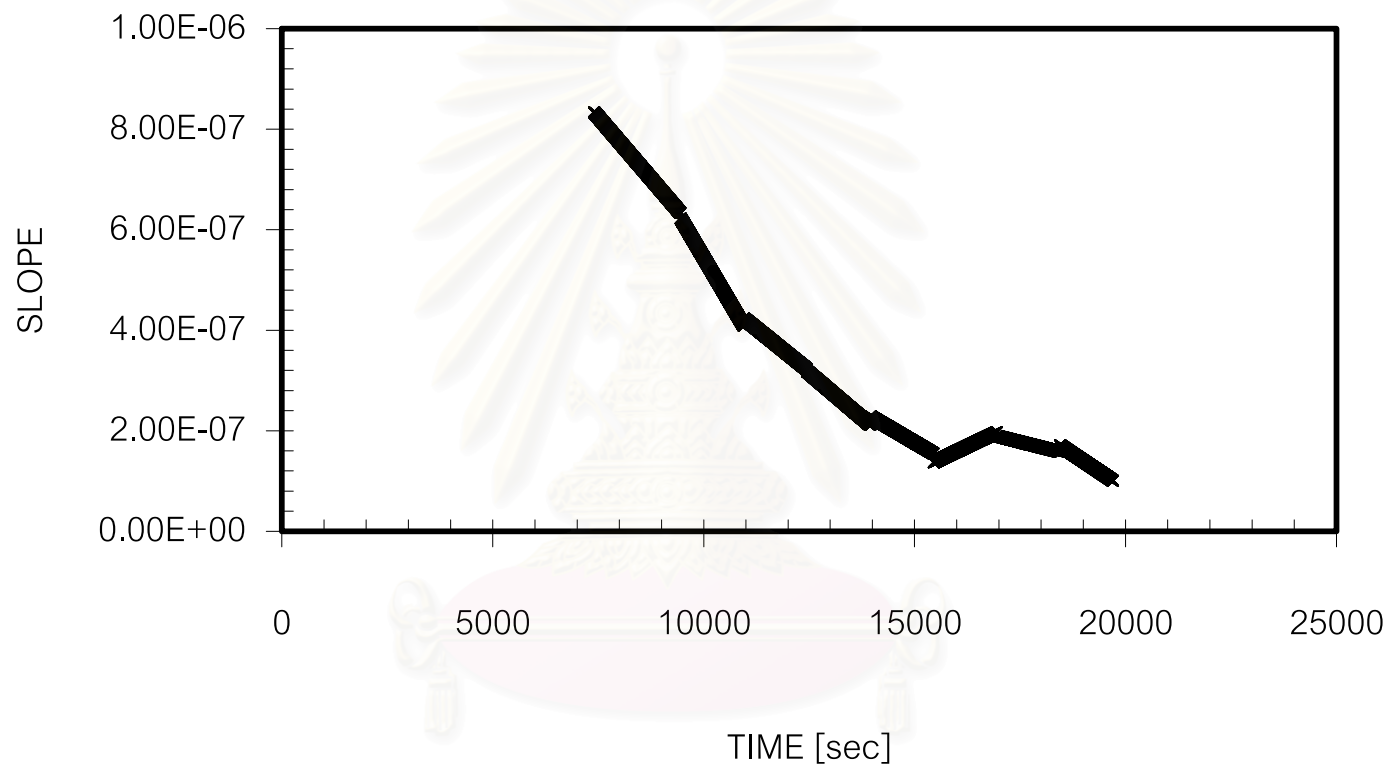
รูปที่ 5.45 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



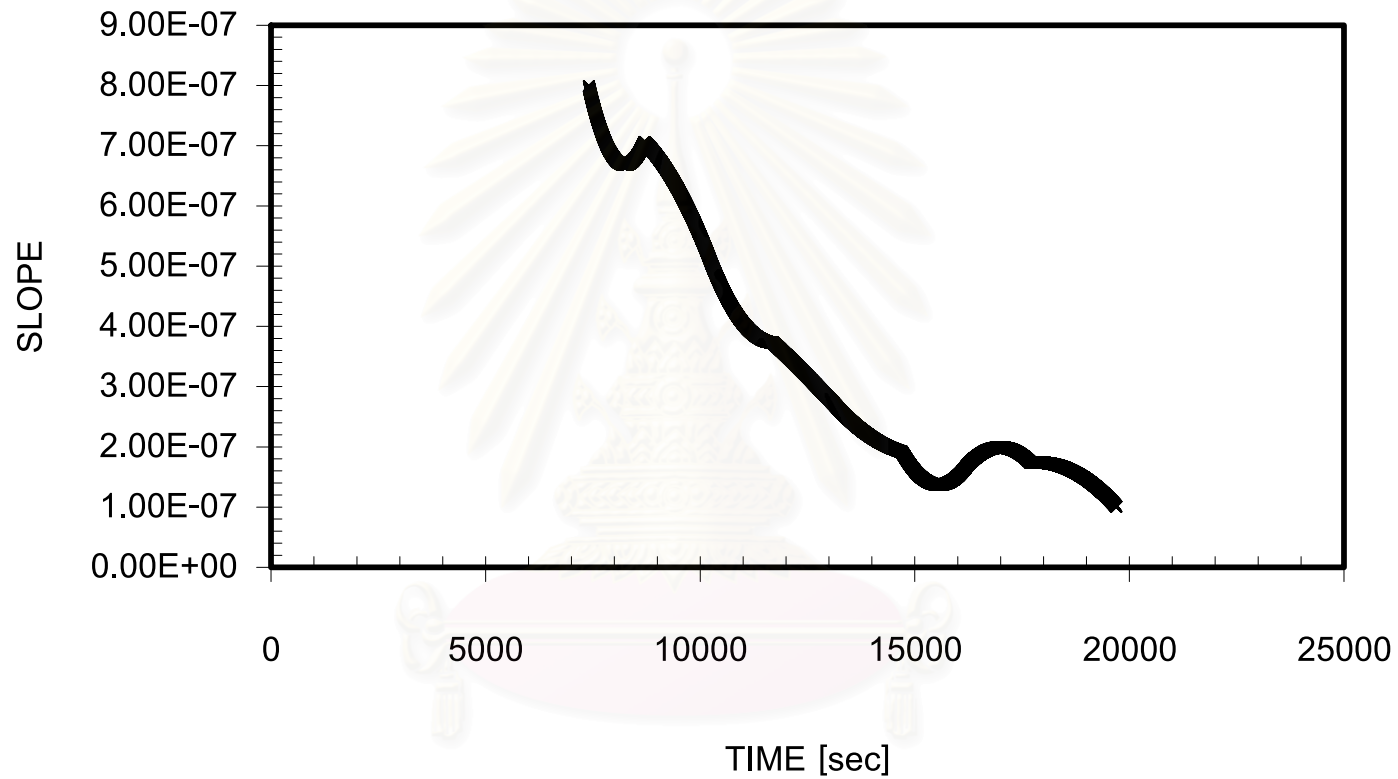


รูปที่ 5.46 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 2

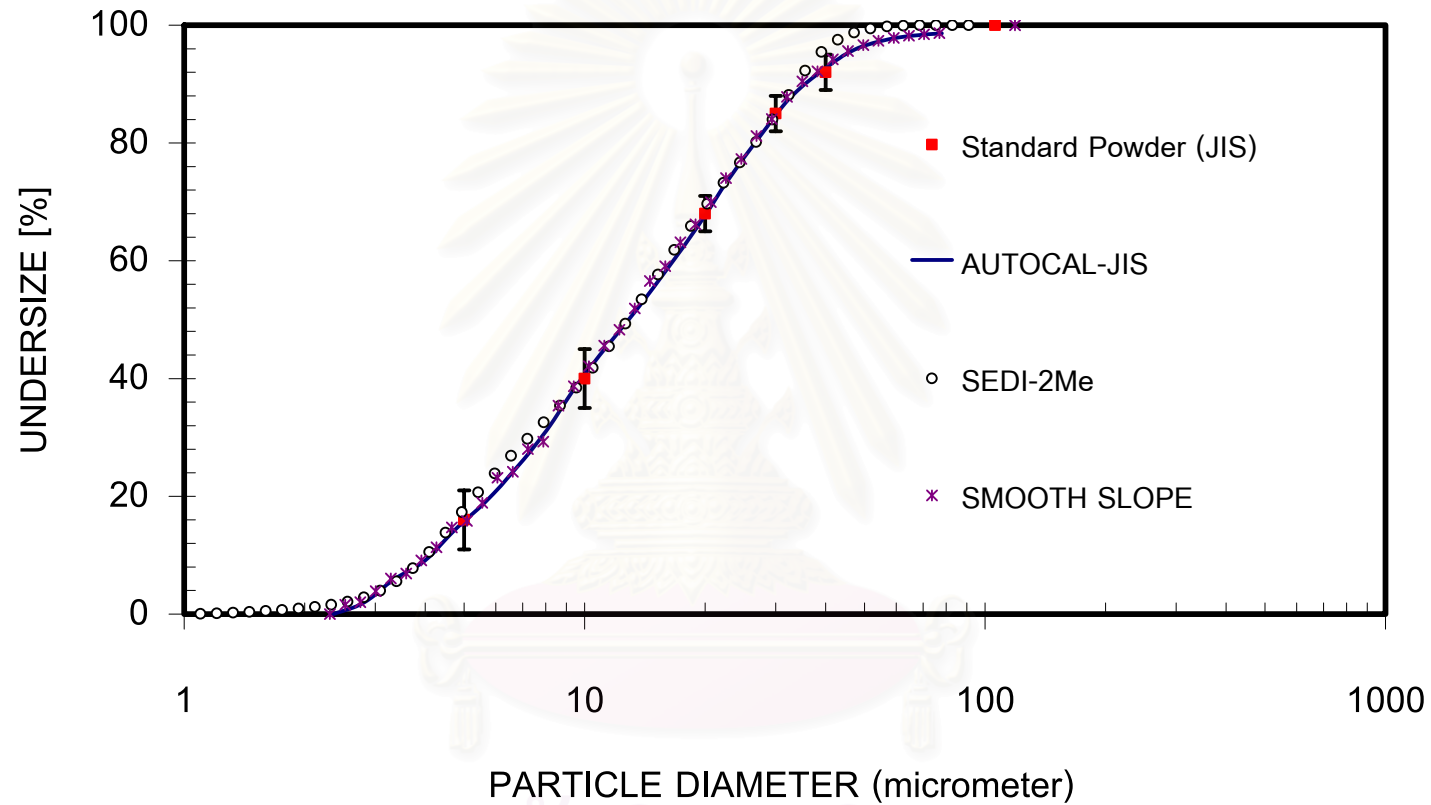


รูปที่ 5.47 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3

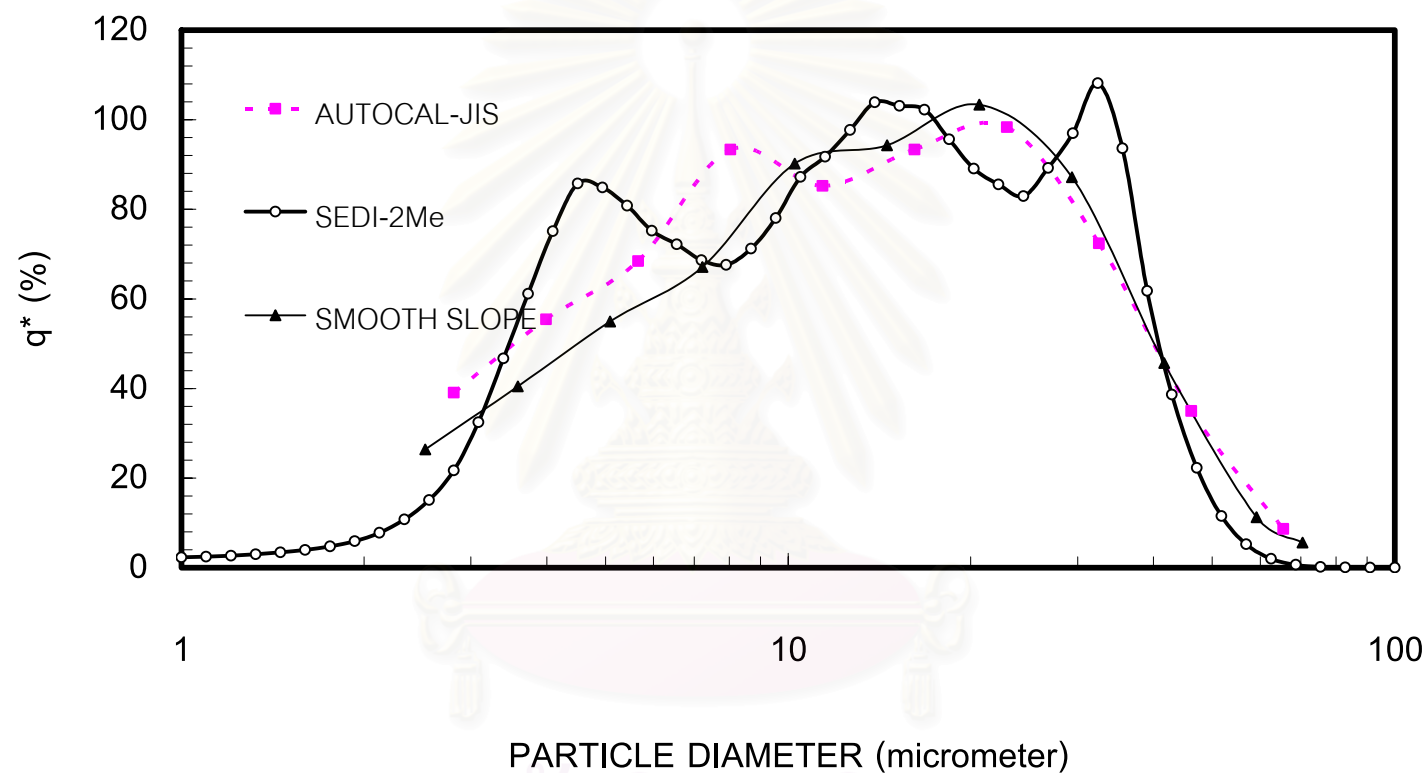
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.48 แสดงค่าความชันของชุดข้อมูล JIS TEST POWDER I, NO.5 ที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS .v2 สำหรับข้อมูลในช่วงที่ 3



รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

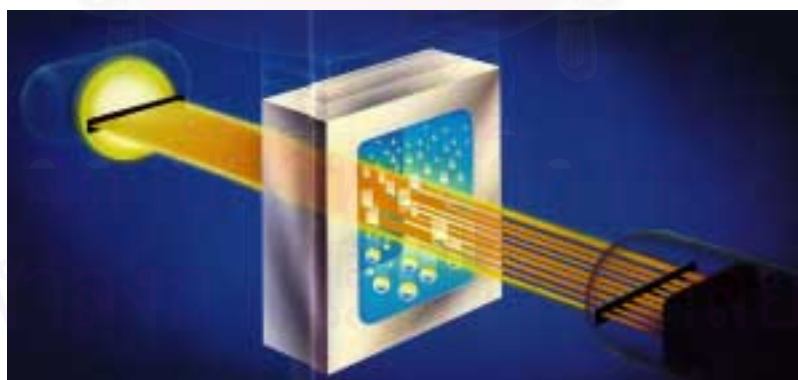


รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No. 5 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCALJIS-SMOOTH1 กับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2ME และค่าจากเอกสารอ้างอิงในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

### 5.3.3 เปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้หลักการเดียวกัน

ในปัจจุบันมีเครื่องมือวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอนขายตามท้องตลาดเช่นเดียวกับเครื่องมือวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อทดสอบว่าค่าการกระจายขนาดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นมีค่าการกระจายขนาดเป็นเช่นไรเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดวัดด้วยเครื่องมือที่ใช้เทคนิคตกตะกอนที่ขายทั่วไป จึงศึกษาลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่ผลิตโดย APPIE ซึ่งได้รับการรับรองด้วยมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่นสำหรับการสอบเทียบที่ใช้ในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้เครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A ยี่ห้อ Micromeritics (กรมวิทยาศาสตร์บริการ)

เครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค Sedigraph 5100 V3.07A ยี่ห้อ Micromeritics เป็นเครื่องวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดที่อาศัยหลักการวิธีการวัดแบบอินทรีย์เมทัล (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.2) จะวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ ระดับที่ทำการวัด โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่ผ่านระดับที่ทำการวัดค่าความเข้มข้นของอนุภาค ณ ระดับที่ทำการวัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลของอนุภาคตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสโตกส์ ที่คำนวณจากค่าความเร็วในการตกตะกอน ณ เวลาที่ทำการวัด โดย ณ เวลาศูนย์กลางความเข้มข้นจะมีค่าเท่ากับ 100% เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ (เทียบกับค่าความเข้มข้นที่เวลาเท่ากับศูนย์) มีค่าเท่ากับค่าสัดส่วนของมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ สโตกส์ หลักการวัดอัตราการตกตะกอนของเครื่อง Sedigraph 5100 แสดงดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 หลักการวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาคของเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A

เครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A จะวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาคโดยใช้ลำแสงเอ็กซ์เรย์ (x-ray) พลังงานต่ำซึ่งส่องผ่านเซลล์ที่ใส่ตัวอย่างไปยังตัวรับสัญญาณ (detector) เนื่องจาก

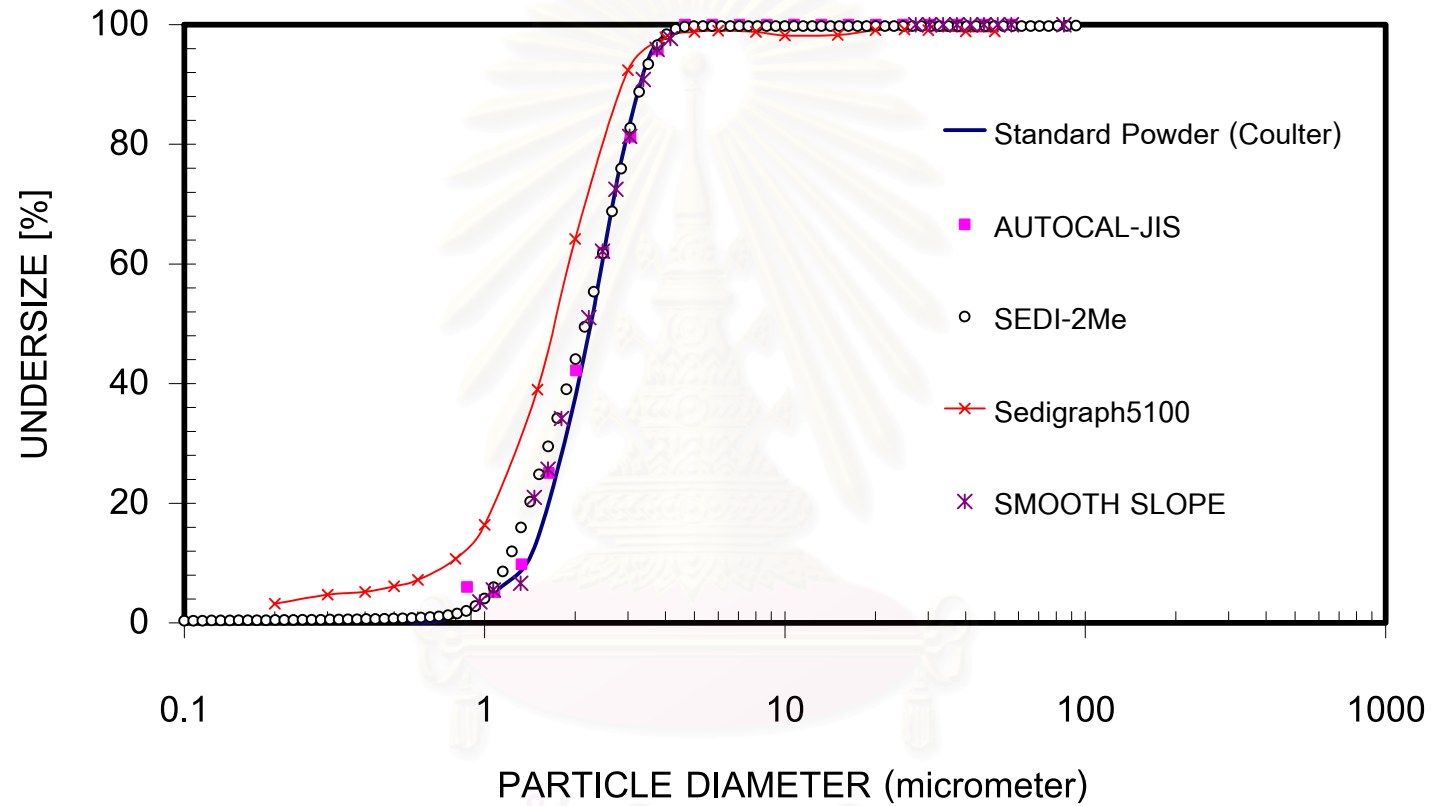
อนุภาคในเซลล์จะดูดซับพลังงานเอ็กซ์เรย์บางส่วน ดังนั้นจึงมีเพียงเปอร์เซ็นต์ของลำแสงเอ็กซ์เรย์ดั้งเดิมที่จะไปถึงตัวรับสัญญาณ ข้อมูลนี้จะเป็นข้อมูลดิบในการวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่อยู่ภายในเซลล์ตัวอย่าง แหล่งกำเนิดลำแสงเอ็กซ์เรย์และตัวรับสัญญาณจะติดตั้งอยู่กับที่ ขณะที่เซลล์จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งผ่านระหว่างแหล่งกำเนิดและตัวรับสัญญาณ ตัวเซลล์สำหรับบรรจุตัวอย่างจะประกอบด้วยกระจกโปร่งใสที่ซึ่งลำแสงเอ็กซ์เรย์สามารถส่องผ่านไปยังตัวรับสัญญาณได้ ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยมวลได้มาจากจำนวนครั้งของลำแสงเอ็กซ์เรย์ที่ส่องมาถึงตัวรับสัญญาณ จำนวนครั้งของลำแสงเอ็กซ์เรย์นี้จะนำมาคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคซึ่งแสดงในรูปร้อยละโดยมวลของอนุภาค ที่ขนาดของอนุภาคที่สนใจ

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคตัวอย่างทั้งหมดด้วยเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A นี้ ก่อนนำไปวัดการกระจายขนาดของอนุภาคได้นำอนุภาคตัวอย่างผ่านตะแกรง 50 mesh ก่อน และใช้ calgon 0.05% เป็นสารช่วยในการกระจายตัว ใช้ตัวกลางเป็นน้ำกลั่น

ในการแสดงผลจะเปรียบเทียบลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค กราฟการกระจายขนาดแบบสะสม (กรณีสเกลล็อก) จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคมาตรฐานที่วัดได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้งสามแบบ, เครื่องวิเคราะห์ Sedigraph 5100 V3.07A กับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง ยกเว้นอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่เนื่องจากอนุภาคชนิดนี้เกิดจากการประดิษฐ์ขึ้นเองจากอนุภาคมาตรฐาน 2 ประเภท (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 5.3.1)

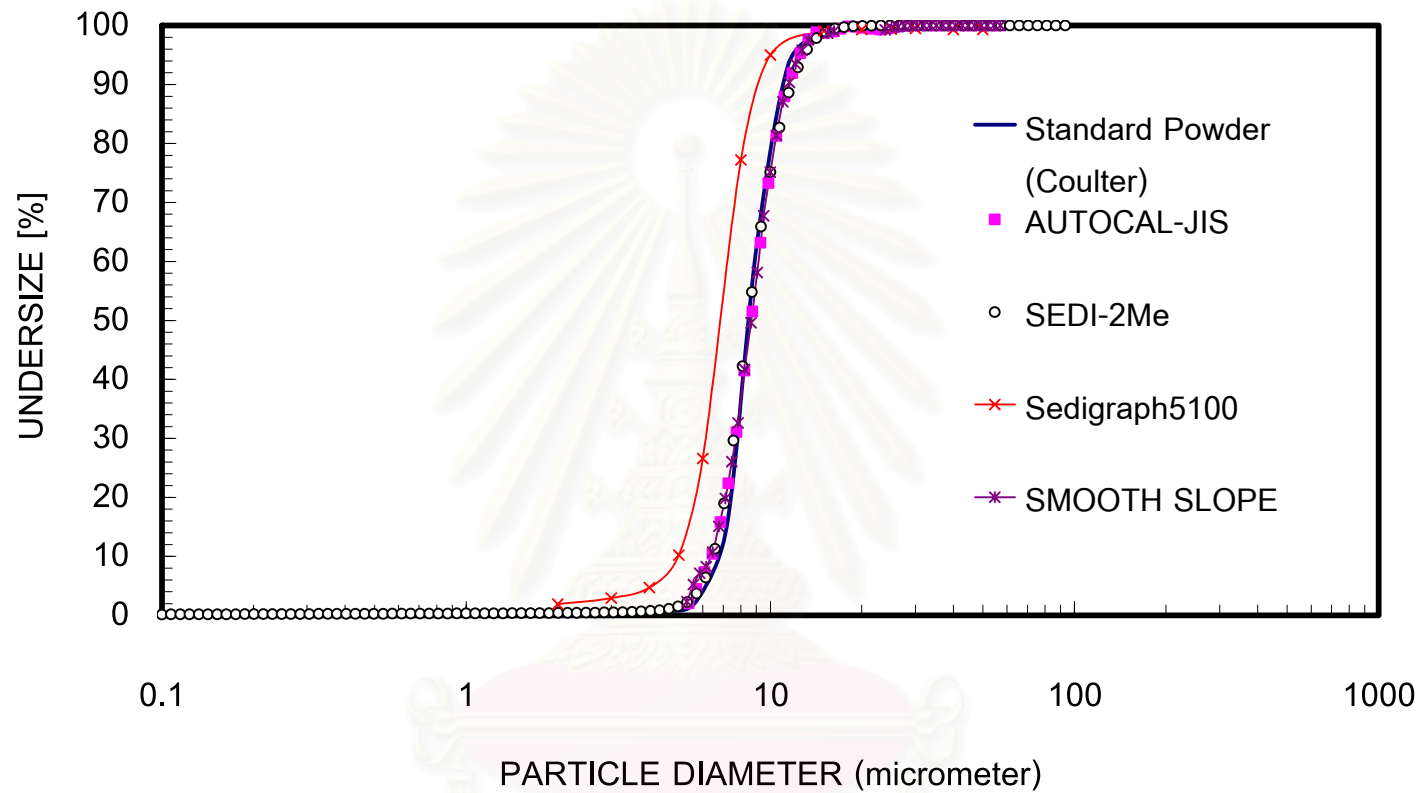
จากผลการทดลองพบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด ที่วัดโดยใช้เครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A มีลักษณะแตกต่างจากลักษณะการกระจายขนาดที่วัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นและค่าจากเอกสารอ้างอิงดังแสดงในรูป 5.65 - 5.71 ซึ่งความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของวิธีวัดการกระจายขนาดของเครื่องวิเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



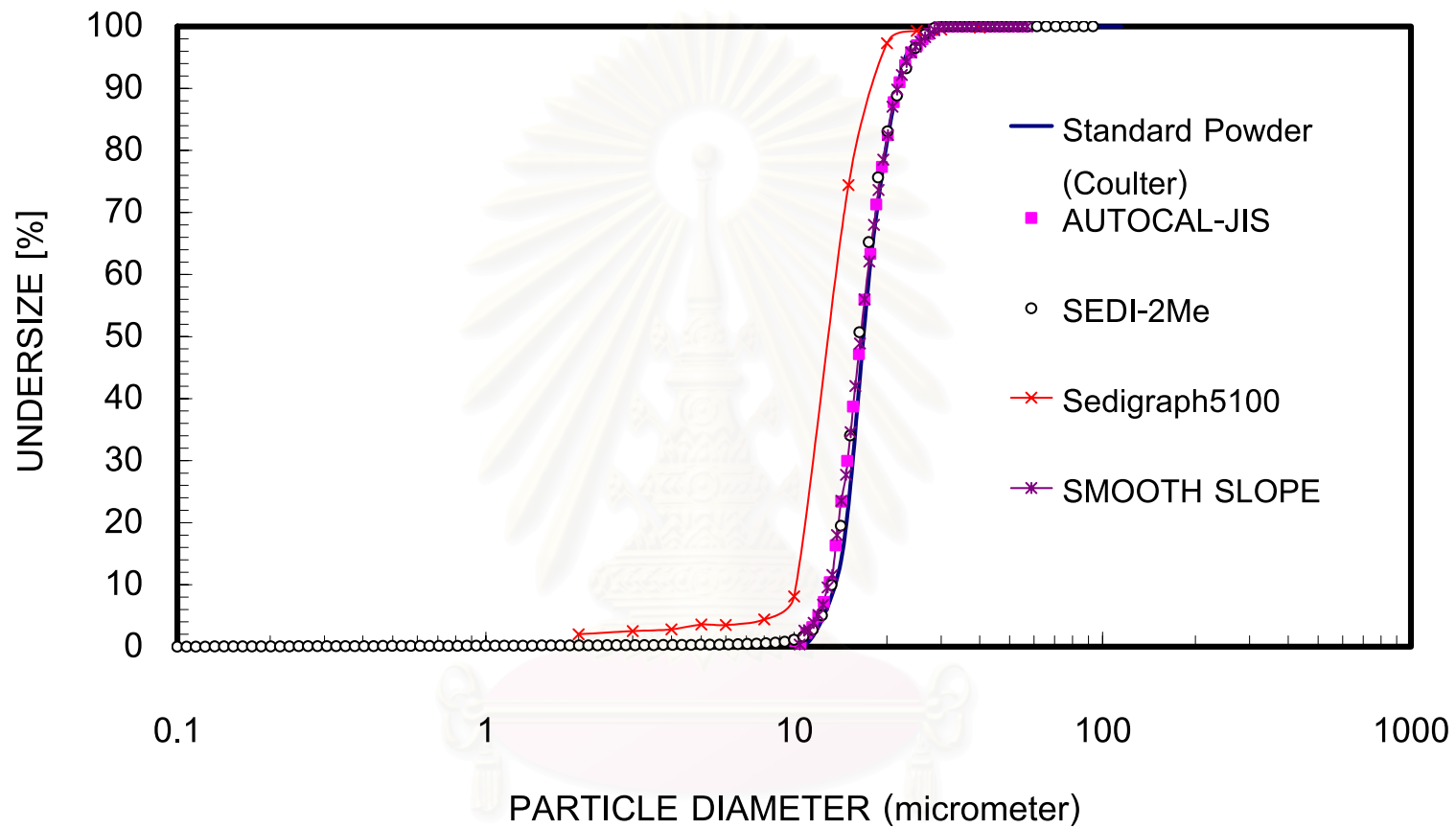
รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 1



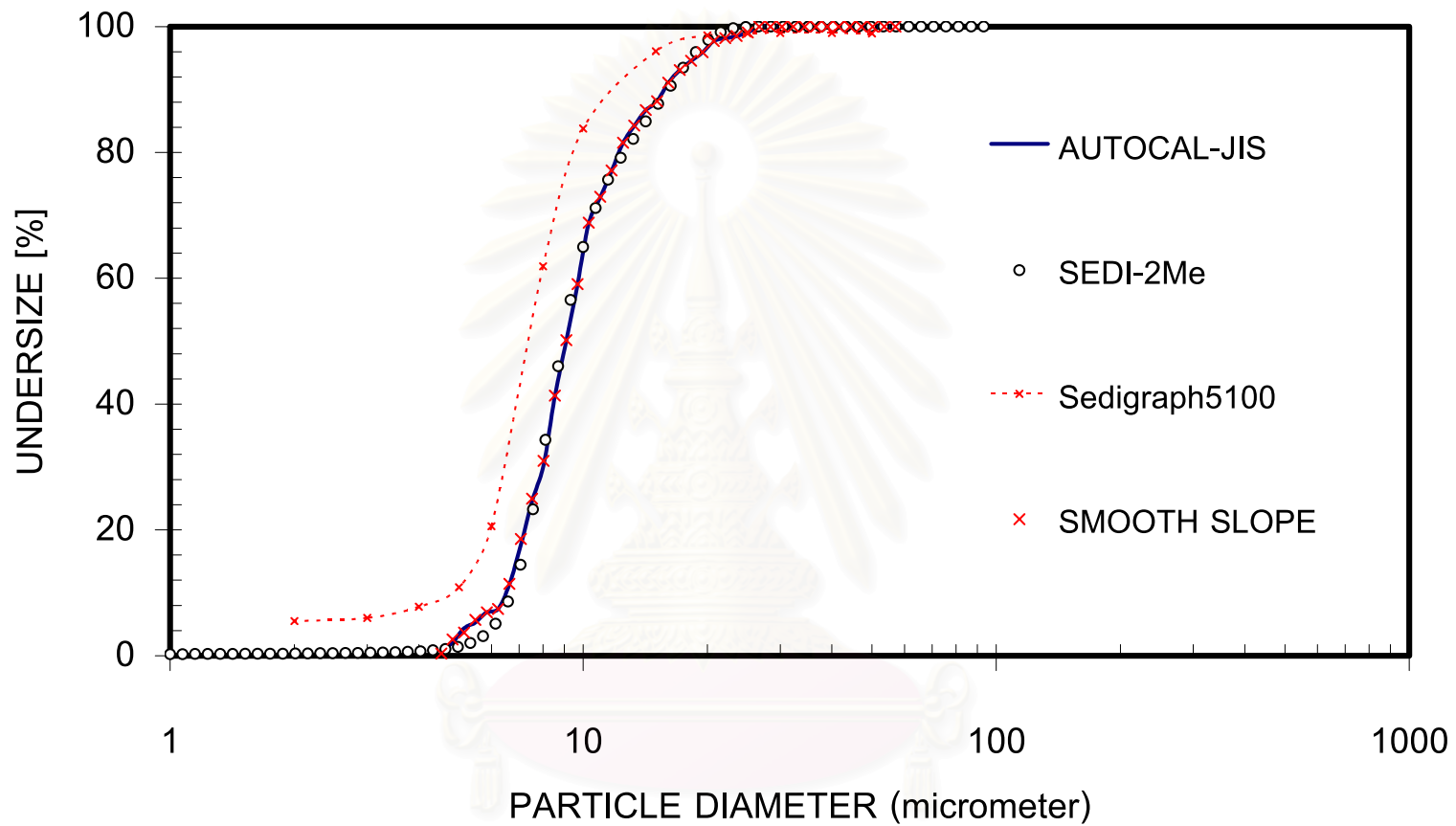


รูปที่ 5.53 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



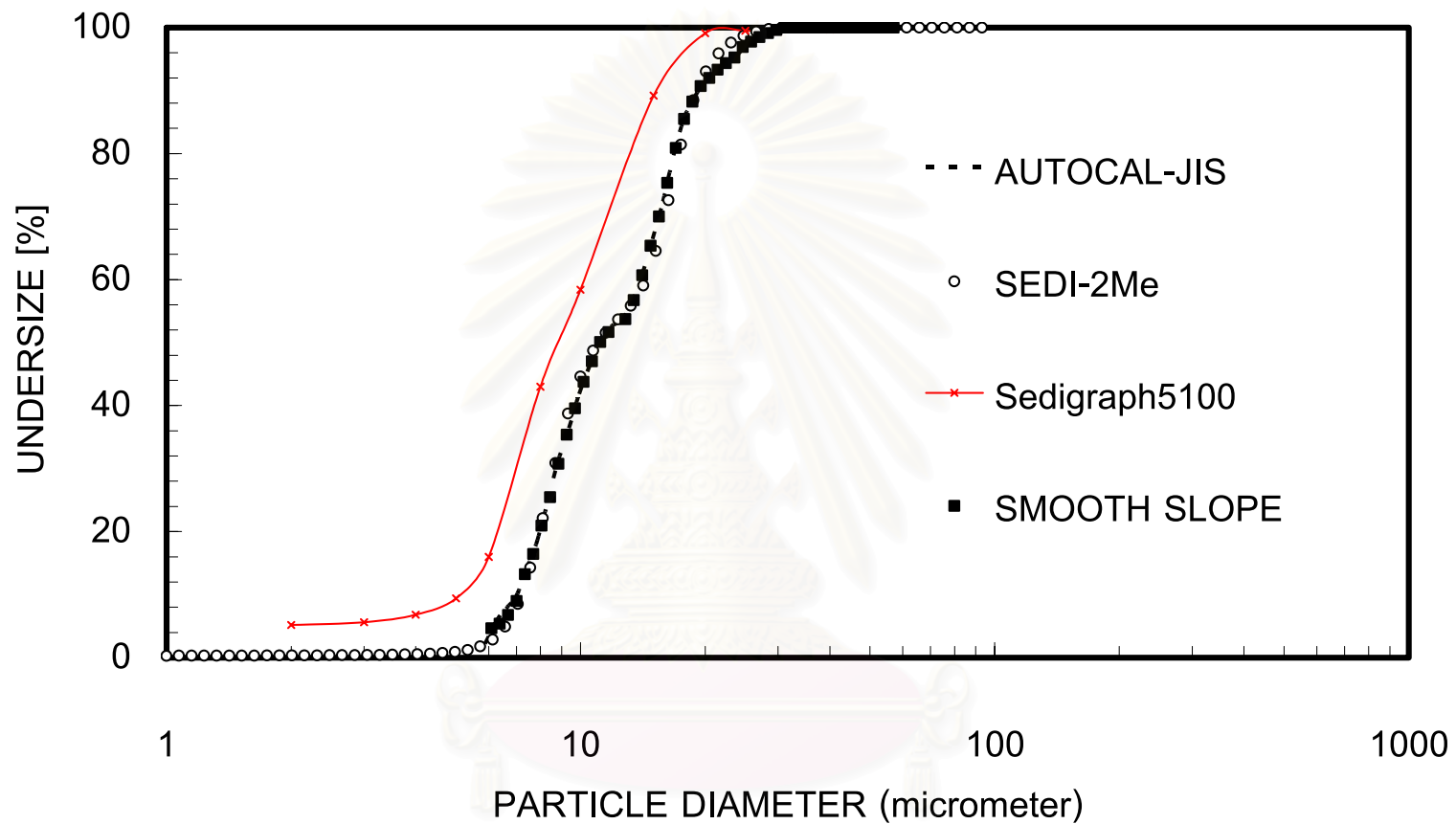
รูปที่ 5.54 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No. 4



รูปที่ 5.55 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A

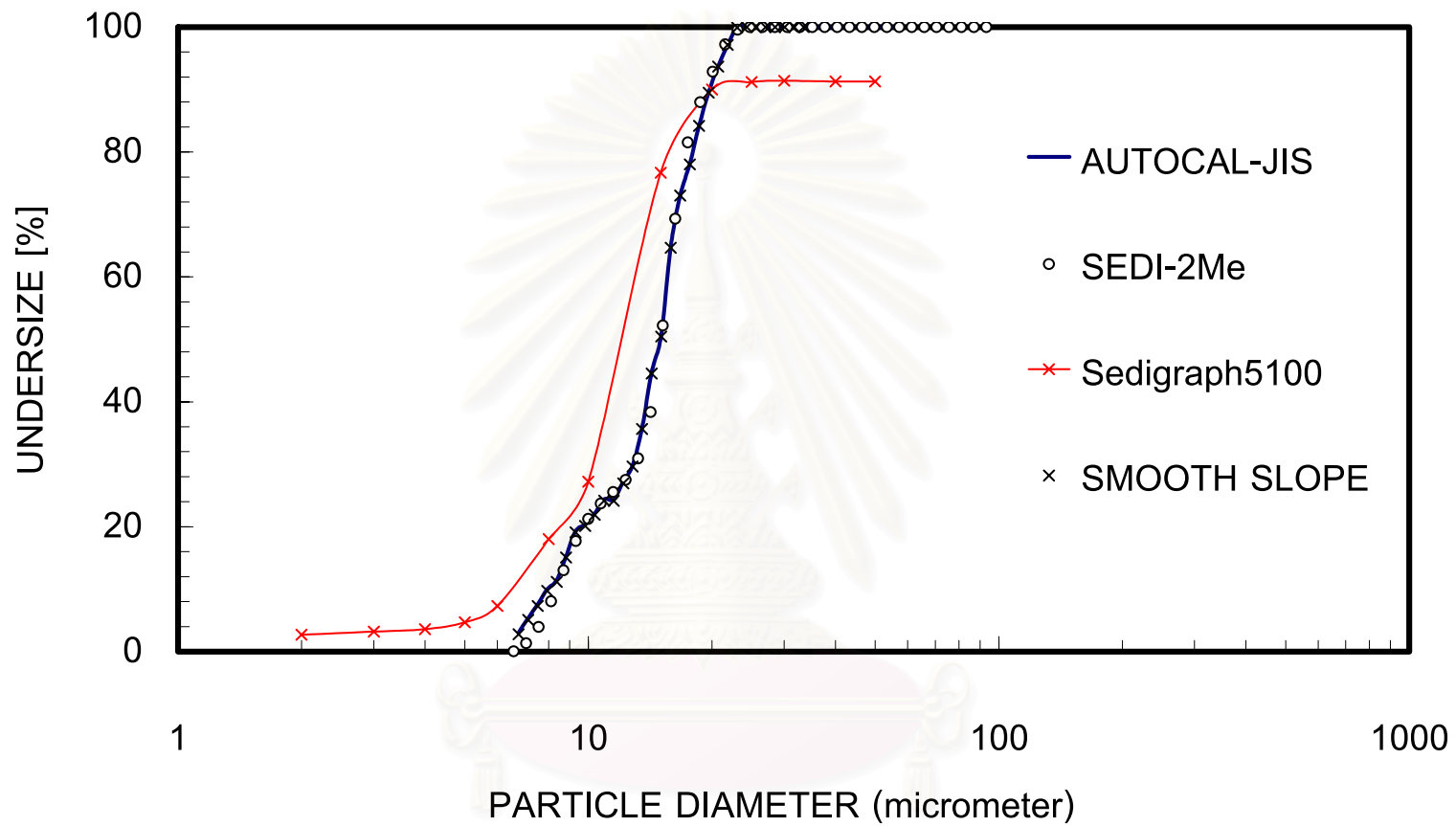
ของอนุภาค BIMODAL 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.56 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A

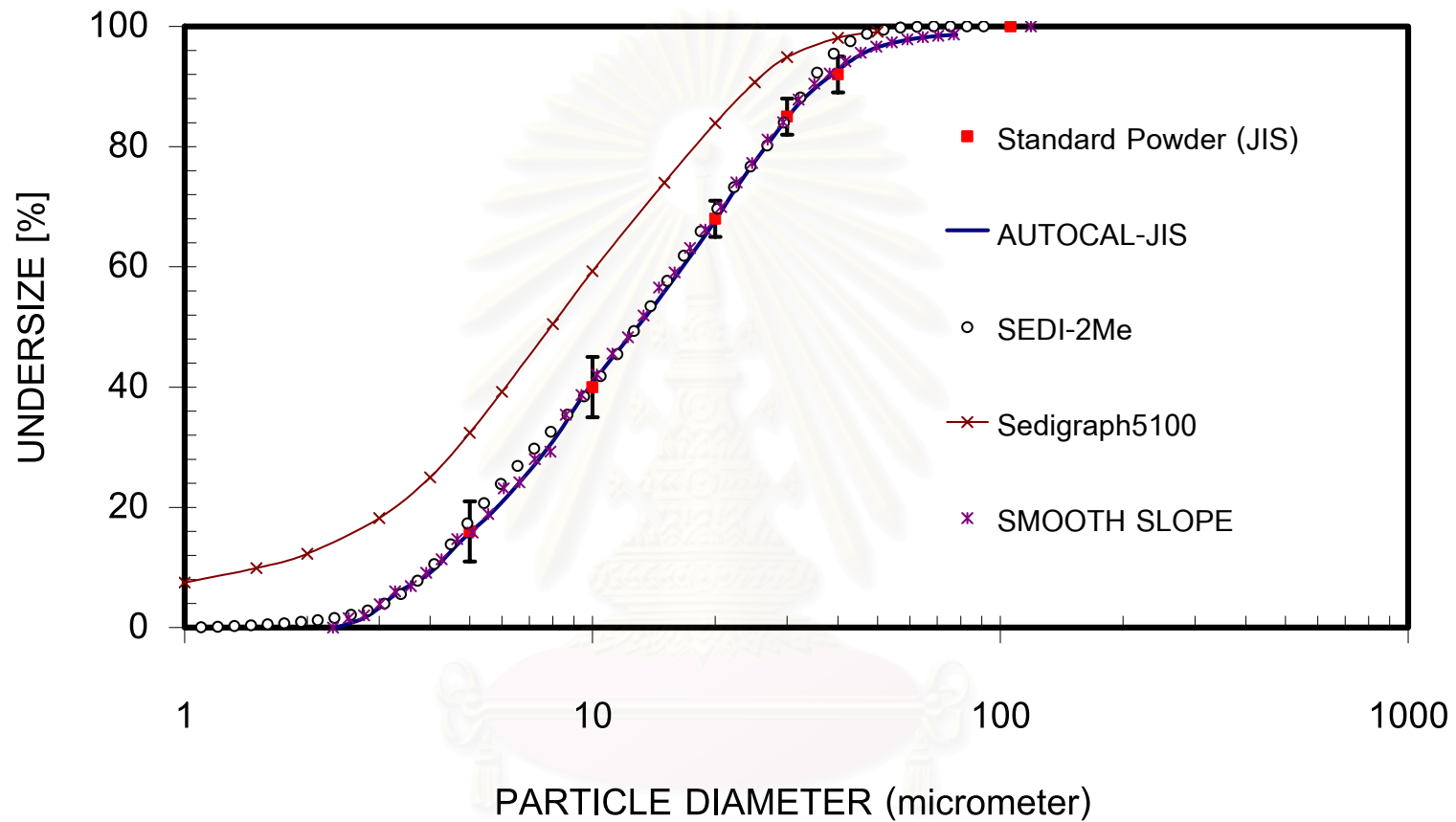
ของอนุภาค BIMODAL 2



รูปที่ 5.57 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น กับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A

ของอนุภาค BIMODAL 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.58 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A กับค่าจากเอกสารอ้างอิงของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No. 5

## บทที่ 6

### ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างอนุภาคในภาคอุตสาหกรรม

#### 6.1 อนุภาคในภาคอุตสาหกรรม

อนุภาคในภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์อนุภาคชนิดต่างๆ ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นกับผลจากเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่ผลิตขายในเชิงพาณิชย์ประกอบด้วย

##### 1. แป้ง

แป้งที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นเป็นแป้งที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเภสัชกรรม ดังนั้นการทราบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญยิ่งเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างแป้งที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท National Starch and Chemical (Thailand) จำกัด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

##### 1.1) แป้งข้าวโพด PURITY 21A (corn starch)

แป้งข้าวโพด PURITY 21A เป็นแป้งที่มีสีขาวเป็นพิเศษ มีการไหลตัวดี (free-flowing) เมื่อให้ความร้อนกับแป้งข้าวโพด Purity 21A ในระบบที่มีน้ำ แป้งจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและกลายเป็นเจลหลังจากปล่อยให้อุณหภูมิลดลง แป้งข้าวโพด PURITY 21A จะถูกใช้เป็นตัวยึด (binder), สารเติมแต่ง (filler) หรือเป็นสารที่ช่วยในการแตกตัว (disintegrant) ในการประยุกต์ใช้ในด้านเภสัชกรรมต่างๆ นอกจากนี้สีของแป้งชนิดนี้เด่นเป็นที่ต้องการอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเม็ดยามากมาย โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้

ชื่อ	:	Corn Starch NF
สี	:	ขาว
ลักษณะ	:	ผง
ความชื้น	:	สูงสุด 14%
pH	:	4.5 –7.0
เถ้า	:	สูงสุด 0.5%
ซัลเฟอไรโดออกไซด์	:	<10 ppm
เหล็ก	:	สูงสุด 20 ppm
ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Particle (Range diameter (SEM))	:	10 – 40 $\mu\text{m}$
ความหนาแน่นของ Particle	:	1.5 $\text{g/cm}^3$

## 1.2) แป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T (tapioca starch)

แป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T เป็นแป้งที่มีสีขาวเป็นพิเศษ มีการไหลตัวดี (free-flowing) เมื่อให้ความร้อนกับแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T ในระบบที่มีน้ำ แป้งจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและกลายเป็นเจลหลังจากปล่อยให้อุณหภูมิลดลง แป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T จะถูกใช้เป็นตัวยึด (binder), สารเติมแต่ง (filler) หรือเป็นสารที่ช่วยในการแตกตัว (disintegrant) ในการประยุกต์ใช้ในด้านเภสัชกรรมต่างๆ นอกจากนี้สีของแป้งชนิดนี้เด่นเป็นที่ต้องการอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเม็ดขยามากมาย โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้

ชื่อ	:	Tapioca Starch NF
สี	:	ขาว
ลักษณะ	:	ผง
ความชื้น	:	สูงสุด 14%
pH	:	4.5 –7.0
เถ้า	:	สูงสุด 0.5%
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	:	<10 ppm
เหล็ก	:	สูงสุด 20 ppm
ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Particle		
(Range diameter (SEM))	:	4 – 80 $\mu\text{m}$
ความหนาแน่นของ Particle	:	1.5 $\text{g/cm}^3$

## 2. แคลเซียมคาร์บอเนตตัวอย่างที่ 1

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนขาว นอกจากนี้ในการขุดเหมืองแร่หินปูนจะก่อให้เกิดฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ดังนั้นการทราบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคนอกจากใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์แล้วยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบกำจัดฝุ่นด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทปูนคุณภาพ จำกัด ขนาดของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 เฉลี่ย 1-2 ไมโครเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ชื่อ	:	Calcium carbonate (calcite)
สูตรเคมี	:	$\text{CaCO}_3$
ความหนาแน่นของParticle	:	2.711 $\text{g/cm}^3$
สี	:	ขาว

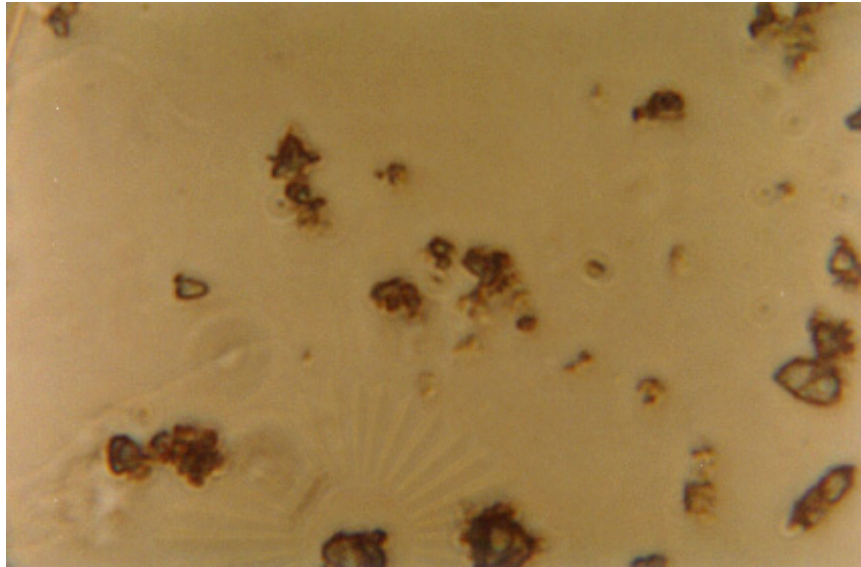




รูปที่ 6.1 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A  
(กำลังขยาย 100 เท่า)



รูปที่ 6.2 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T  
(กำลังขยาย 100 เท่า)



รูปที่ 6.3 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 (กำลังขยาย 100 เท่า)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 6.2 สารช่วยในการกระจายตัว

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารช่วยในการกระจายตัว เพื่อป้องกันการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) และช่วยให้อนุภาคที่กระจายอยู่ในสารแขวนลอยคงสภาพเป็นอนุภาคเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ ให้เหมาะสมกับอนุภาคในภาคอุตสาหกรรมแต่ละชนิดโดยอ้างอิงเอกสารวิธีมาตรฐานของอังกฤษสำหรับการหาการกระจายขนาดของอนุภาค BS 3406 Part 2 โดยใช้ปริมาณ 0.5 กรัม/ลิตร

ตัวกลางและสารช่วยในการกระจายตัวที่เลือกใช้ให้เหมาะสมกับอนุภาคแต่ละชนิดเป็นดังแสดงในตารางที่ 6.3 และมีรายละเอียดดังนี้

ชื่อ : Tetra - Sodium Pyrophosphate Decahydrate  
 สูตรเคมี :  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$   
 ผู้ผลิต : Fluka

ตารางที่ 6.1 ชนิดของอนุภาค ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบ และสารช่วยในการกระจายตัว

ชนิดอนุภาค	ตัวกลาง	สารช่วยในการกระจายตัว
แป้งข้าวโพด	2-methyl propanol	-
แป้งมันสำปะหลัง	2-methyl propanol	-
แคลเซียมคาร์บอเนต	น้ำกลั่น	tetra – sodium pyrophosphate decahydrate
		tetra – sodium pyrophosphate decahydrate

### 6.3 ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบอนุภาคแต่ละชนิดจากเอกสารวิธีมาตรฐานของอังกฤษสำหรับการหาการกระจายขนาดของอนุภาค BS 3406 Part 2 ในทำนองเดียวกันการเลือกใช้สารช่วยในการกระจายตัว ดังแสดงในตารางที่ 6.1 และมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) น้ำกลั่น

ชื่อ	: Water
สูตรเคมี	: H <sub>2</sub> O
ความหนาแน่น	: 1,000 kg/m <sup>3</sup>
ความหนืด	: 0.001 Pa.s

#### 2) 2-methyl propanol

Designation	: 2-methyl propanol
สูตรเคมี	: (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> OH
ความหนาแน่น	: 805 kg/m <sup>3</sup>
ความหนืด	: 0.0022 Pa.s
ผู้ผลิต	: APS AJAX FINECHEM

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**6.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCL-JIS.v2 เปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดที่คำนวณได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOACL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, โปรแกรมวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่อาศัยหลักการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลาง Det-Feret และค่าการกระจายขนาดที่ได้จากเครื่องมือที่ใช้เทคนิคกระเจิงแสง (Laser diffraction)**

ค่าการกระจายขนาดที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค CU-MTECT PARTICLE SIZE ANALYZER มี 2 แบบ คือค่าการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมที่ใช้วิธีวิเคราะห์ตามที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (โปรแกรม AUTOCL-JIS) ซึ่งแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท คือ โปรแกรมประมวลผล AUTOCL-JIS และโปรแกรมประมวลผล AUTOCL-JIS.v2 และค่าการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธีของทুমี่ในการวิเคราะห์ผล (โปรแกรม SEDI-2Me)

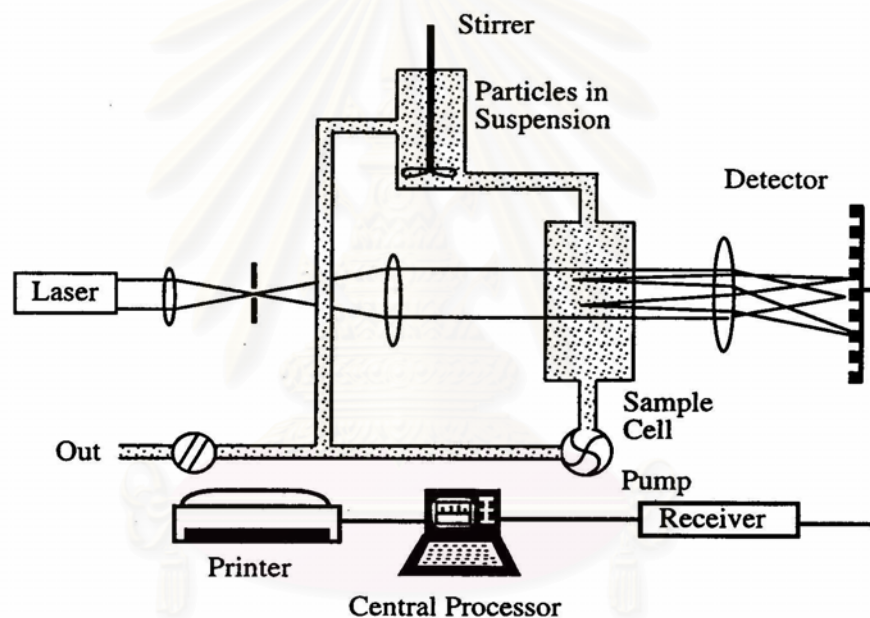
โปรแกรมประมวลผล AUTOCL-JIS นั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากของโปรแกรม (ดูรายละเอียดในบทที่ 3) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องเลือกเกณฑ์น้ำหนักที่ใช้ในการแบ่งข้อมูล, ป้อนจำนวนข้อมูลของชุดข้อมูลและจำนวนข้อมูลที่มีการใช้ซ้ำ และป้อนจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการประมวลค่าเพื่อให้สามารถพิตเส้นกราฟได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ในขั้นตอนการใส่ข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม SEDI-2Me เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค จะต้องใส่เกณฑ์ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยเลือกใช้ค่าที่โปรแกรมได้กำหนดไว้

ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ CU-MTECT PARTICLE SIZE ANALYZER ที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCL-JIS.v2 จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม AUTOCL-JIS เดิม และโปรแกรม SEDI-2Me นอกจากนี้ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้นี้ก็ยังสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S Particle Size Analyzer (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และเครื่อง Beckman Coulter LS230 (ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เครื่องวิเคราะห์ทั้งสองแบบเป็นเครื่องที่ใช้หลักการกระเจิงแสง (Laser diffraction based particle size analyzer) ในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค ซึ่งมีหลักการวัดค่าการกระจายขนาดของอนุภาคดังนี้

หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเครื่องวิเคราะห์ขนาดที่อาศัยเทคนิคกระเจิงแสง (หรือเรียกว่า Low-angle laser light-scattering instrument) คือ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ (laser beam) จะทำให้แสงเกิดการกระจาย (scatter) โดยที่มุมของการกระจายจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของ

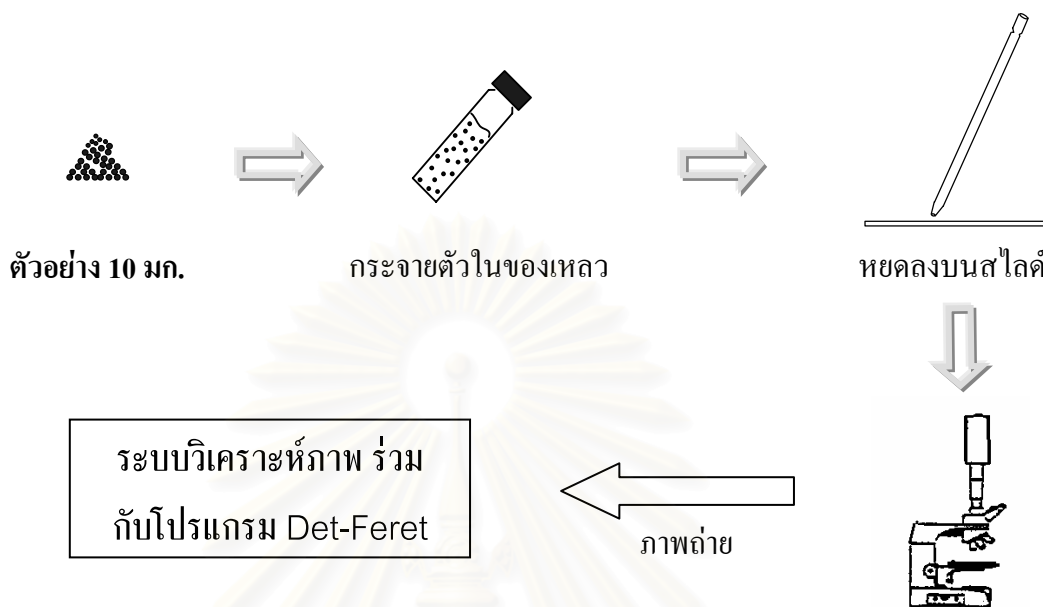
อนุภาค แสงที่ถูกทำให้กระจายทั้งหมดจะถูกเก็บรวบรวมโดยตัวรับสัญญาณ (detector) เพื่อนำมาประมวลการกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 6.4 ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่วัดได้จากเครื่องที่ใช้เทคนิคกระเจิงแสง (laser diffraction) เป็นค่าการกระจายขนาดโดยปริมาตร แต่เนื่องจากอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยปริมาตรที่วัดได้จากเครื่องที่ใช้เทคนิคกระเจิงแสง จึงมีค่าเท่ากับค่าการกระจายขนาดโดยมวล โดยทั่วไปขนาดอนุภาคเล็กที่สุดที่วัดได้โดยวิธีกระเจิงแสงคือประมาณ  $0.1 \mu\text{m}$



รูปที่ 6.4 หลักการการวิเคราะห์ห้ขนาดของเทคนิคกระเจิงแสง (Laser Diffraction)

อนึ่ง ยังได้เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากโปรแกรม DET-FERET ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแบบ Feret ซึ่งคือระยะทางระหว่างเส้นสัมผัสที่ขนานกันซึ่งอยู่ตรงข้ามกันของรูปแสดงเส้นรอบนอกของอนุภาค (particle profile) ซึ่งได้จากการนำอนุภาคส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และถ่ายภาพ แล้วนำภาพถ่ายที่ได้มาคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยโปรแกรม DET-FERET ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ดังนั้นค่าการกระจายขนาดของ

อนุภาคที่ได้จากโปรแกรมนี้เป็นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยจำนวน แล้วแปลงค่าเป็นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยมวลก่อนนำมาเปรียบเทียบค่า



รูปที่ 6.5 วิธีการวัดค่าการกระจายขนาดด้วยโปรแกรม DET-FERET

ในการแสดงผลค่าการกระจายขนาดของอนุภาค กราฟการกระจายตัวแบบสะสม จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL – JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI – 2Me ส่วนกราฟการกระจายตัวแบบสัมพัทธ์ จะแสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทั้งสามโปรแกรมข้างต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ชุดของสมการพหุนามของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS สำหรับตัวอย่าง อนุภาคในภาคอุตสาหกรรมแต่ละชนิด

อนุภาคตัวอย่าง	เกณฑ์ในการแบ่งช่วงข้อมูล	จำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการประมวลค่า		จำนวนข้อมูลของชุดข้อมูล / จำนวนข้อมูลที่มีการใช้ซ้ำ			เวลาในการทดลอง (วินาที)
		Normal scale	Semi-log	ข้อมูลส่วนที่ 1	ข้อมูลส่วนที่ 2	ข้อมูลส่วนที่ 3	
แป้งข้าวโพด	0.6 / 0.8	15	15	1,000 / 500	2,000 / 1,000	5,000 / 2,500	8,847
แป้งมันสำปะหลัง	0.6 / 0.8	15	15	500 / 250	1,000 / 500	5,000 / 2,500	8,765
แคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1	0.6 / 0.8	20	20	1,000 / 500	2,000 / 1,000	5,000 / 2,500	36,038



#### 6.4.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A

อนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A จะมีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่อมองในลักษณะสองมิติ จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 6.1)

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดจากข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (กราฟการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 6.6 และ 6.8) พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีค่าใกล้เคียงกันกับโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me แต่จะให้ค่าขนาดของอนุภาคสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม เช่นเดียวกับกราฟแสดงฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.9 อย่างไรก็ตามฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีความสมมาตร (symmetry) และมีความสูง (amplitude) มากกว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ

นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีบางจุดของข้อมูลในกราฟการตกตะกอนที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสามโปรแกรมมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วกลับลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงนี้ร่วมกับกราฟแสดงฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าจุดที่กราฟการตกตะกอนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นจุดเดียวกับที่กราฟฟังก์ชันการกระจายขนาดมีค่า amplitude สูงขึ้น ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 6.9

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบกับโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 จะมีขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นที่ %oversize มากกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ซึ่งเกิดมาจากการปรับเรียงความชันของชุดข้อมูล ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ค่าใกล้เคียงกันหมดทั้งสามโปรแกรม ซึ่งแสดงในตารางที่ 6.4

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคกับค่าที่วิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์อื่นๆ พบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสม (ดังแสดงในรูปที่ 6.6 และ 6.8) ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret และเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S แต่มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS 230

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดในกรณีที่ใช้สเกลปกติดังแสดงในรูปที่ 6.7 ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ, โปรแกรม Det-Feret และเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S จะมีลักษณะเป็น unimodal ที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 13, 11 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me มีลักษณะแยกเป็นสองยอดอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 8 และ 17 ไมโครเมตร ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 จะแสดงลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบกว้างและกราฟแยกเป็นหลายยอด

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคในกรณีสเกล semi-log ดังแสดงในรูปที่ 6.9 พบว่า ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS มีลักษณะแตกต่างจากในกรณีสเกลปกติ คือฟังก์ชันจะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาค 8 และ 19 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีลักษณะไม่แตกต่างจากในกรณีสเกลปกติ เช่นเดียวกับฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ที่ยังคงแยกเป็นสองยอดอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งของอนุภาค 7 และ 17 ไมโครเมตร ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret และเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S ยังคงแสดงลักษณะเป็น unimodal เช่นเดียวกับในกรณีสเกลปกติ ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 11 และ 21 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคแบบกว้างและแยกเป็นหลายยอด

จากตารางที่ 6.3 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงคือ เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 และค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาค ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าใกล้เคียงกันกับกับค่าที่วัดได้จากโปรแกรม Det-Feret และเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S แต่มีค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 อย่างมาก

จากตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากวิธีต่างๆ พบว่า การกระจายขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 จะมีการกระจายขนาดของ

อนุภาคที่กว้างที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากวิธีอื่น ขณะที่โปรแกรม Det-Feret ให้การกระจายขนาดของอนุภาคที่แคบที่สุดซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายขนาดดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.9

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมประมวลผล AUTO-CAL-JIS.v2 ที่มีการปรับเทียบความชันให้ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTO-CAL-JIS , โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me และ โปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการหาเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ Feret ของอนุภาค และเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 มีลักษณะที่แตกต่างจากวิธีอื่น และฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้ก็แสดงเป็นหลายยอด อันเนื่องมาจากผู้ทำการทดลองขาดความชำนาญในการใช้เครื่องวิเคราะห์, ขาดการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์ หรือเกิดจากการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ไม่ดี



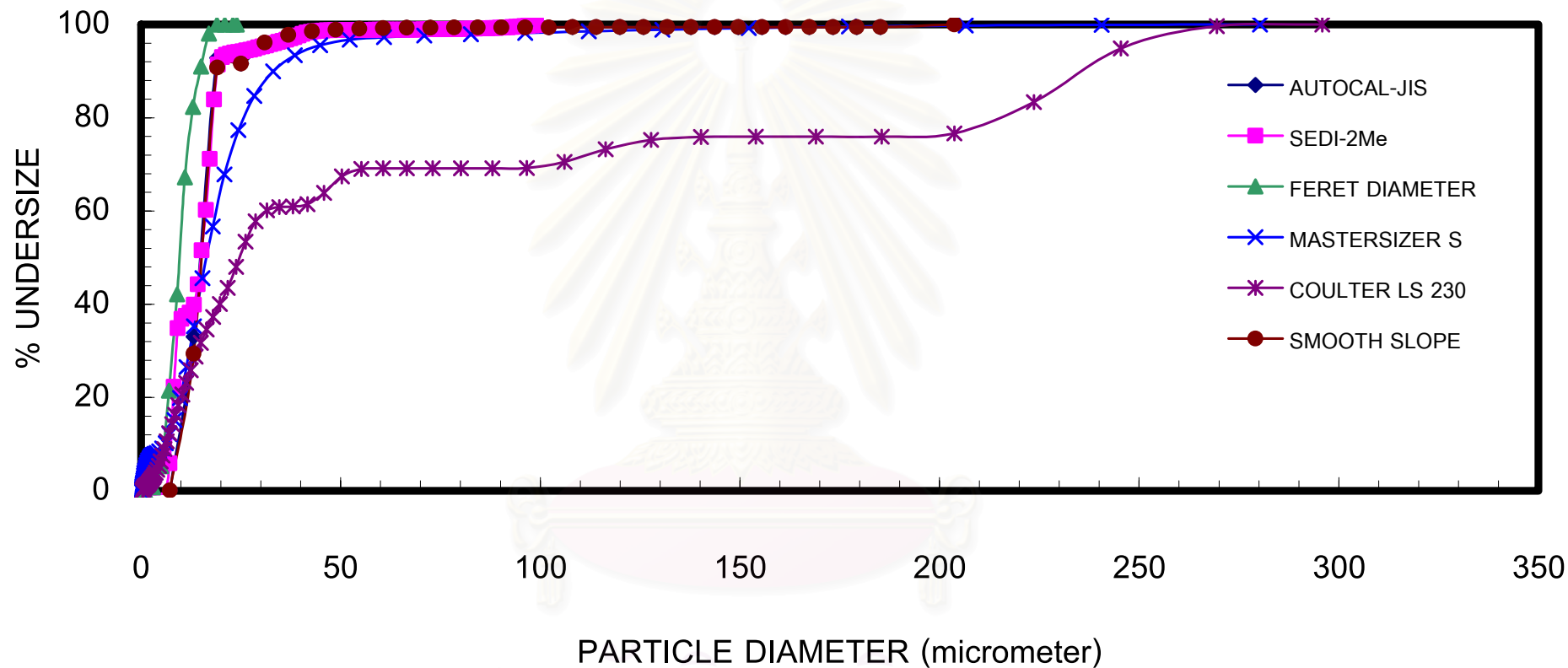
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A

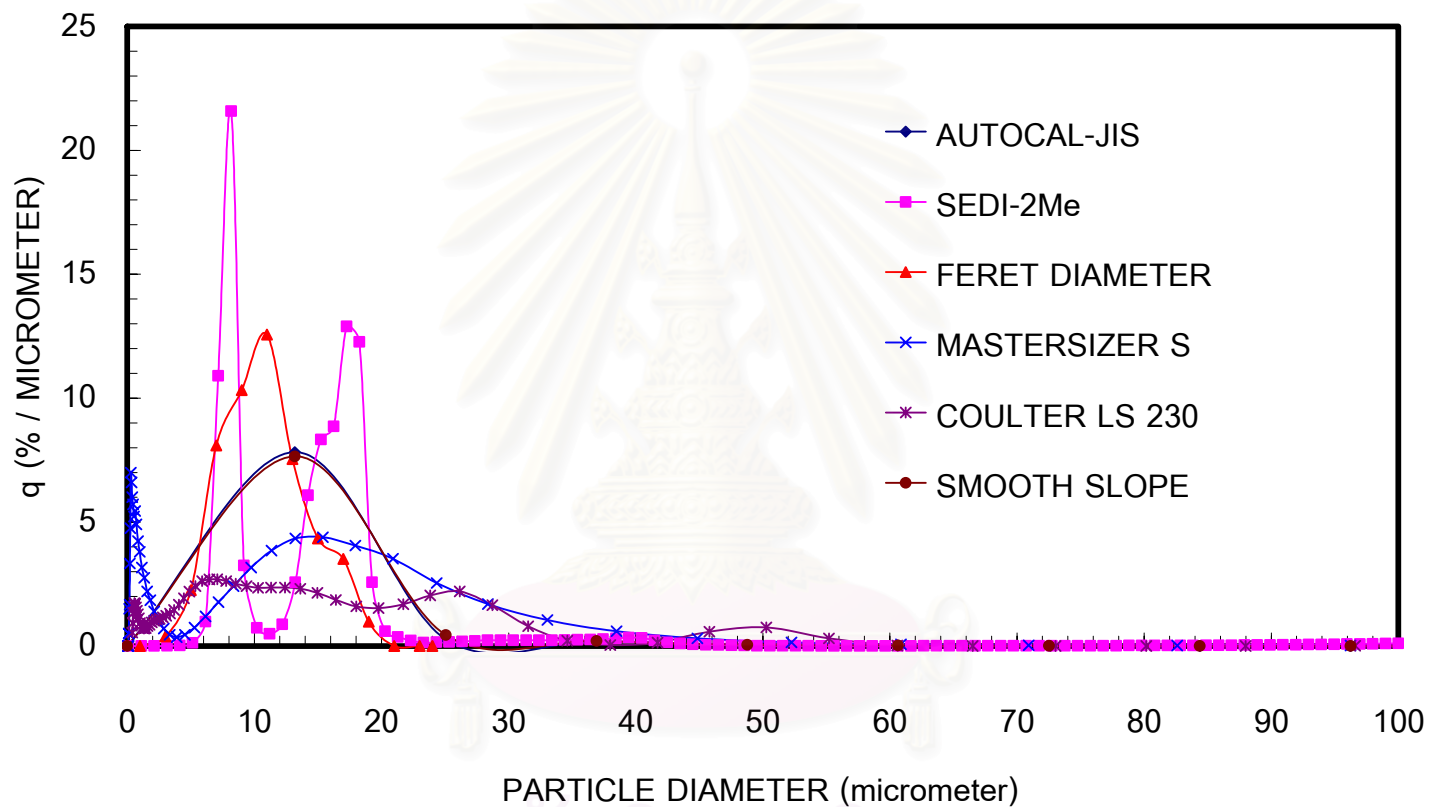
Oversize % ( on mass basis)	Particle size (micrometer)								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZER S	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
10	18.84	18.99	19.09	19.15	14.77	33.12	247.20	19.04	18.96
25	17.35	18.02	17.56	17.35	12.03	23.50	132.00	17.59	16.68
50	14.87	15.17	15.02	14.49	9.63	16.41	25.84	15.18	14.83
75	11.73	11.68	8.39	7.53	7.34	10.98	12.63	12.30	12.48
90	9.04	7.99	7.41	6.54	5.58	6.03	6.54	9.26	10.07

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแป้งข้าวโพด PURITY 21A

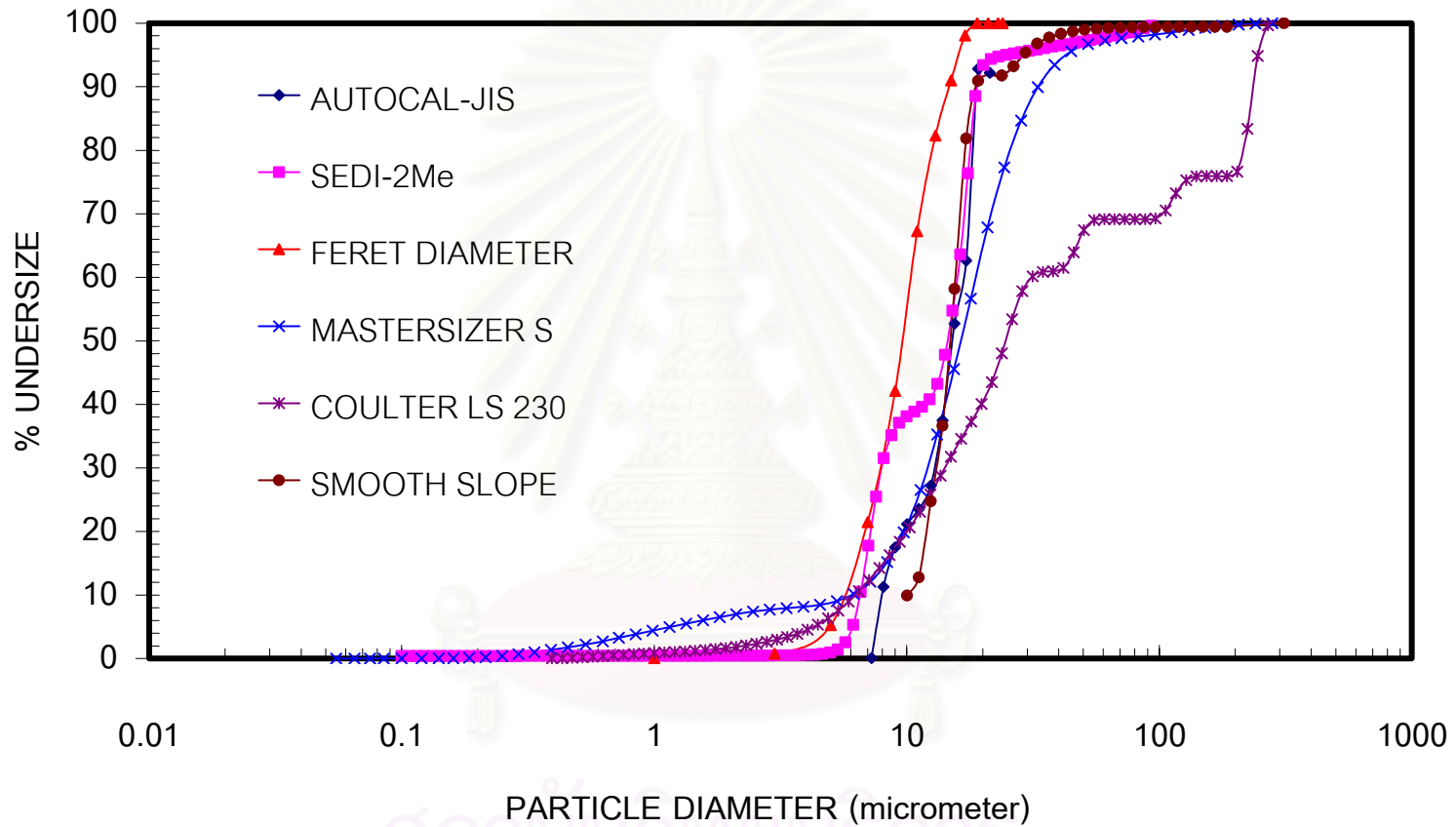
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน ของขนาด อนุภาค ( $\sigma_{fc}$ )	Analytical method								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZERS	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
$\sigma_{fc}$	1.23	1.23	1.22	1.26	0.66	1.71	4.07	1.22	1.19



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับ ค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ

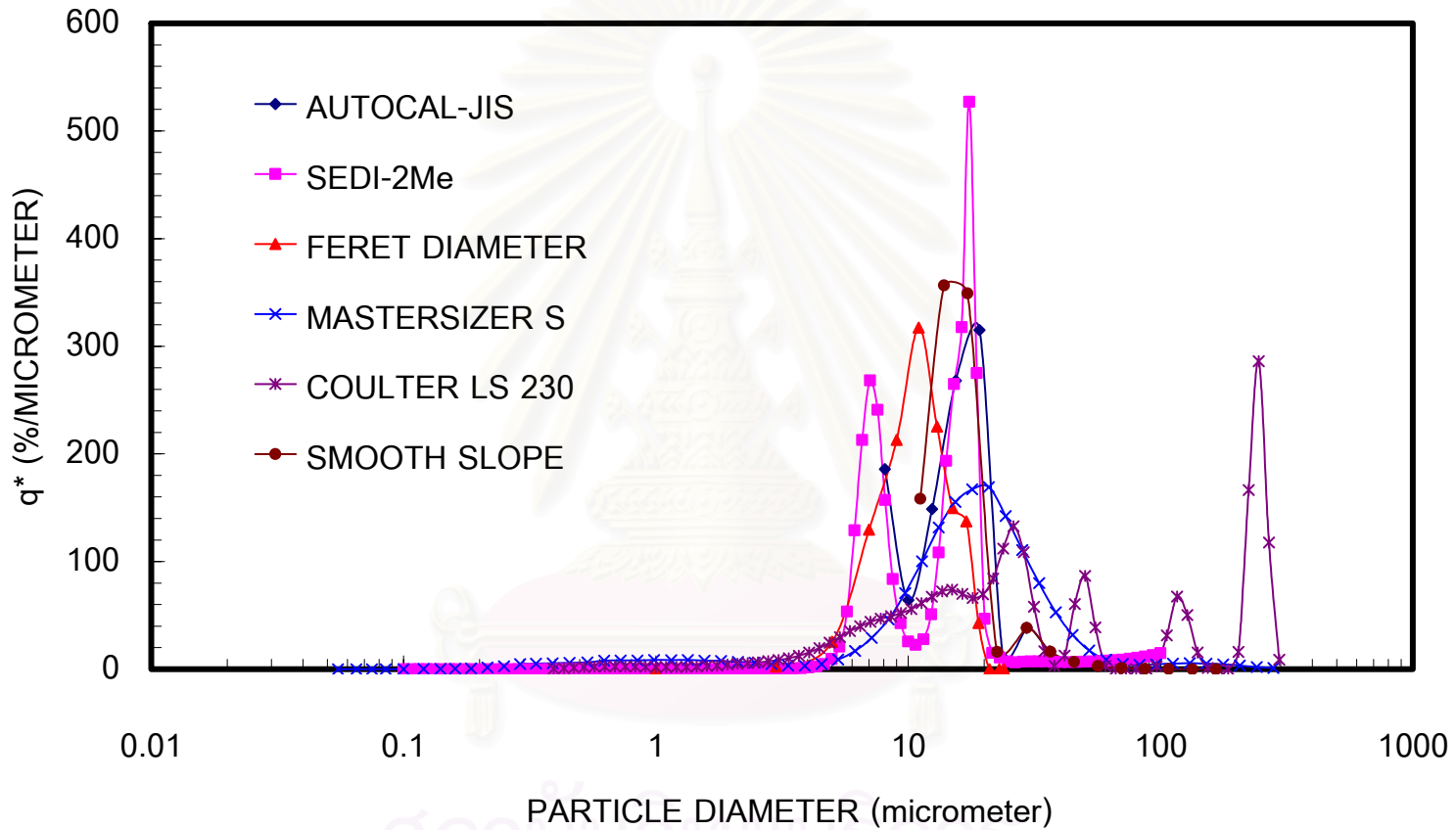


รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ



รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับ ค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและ หลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log





รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งข้าวโพด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

#### 6.4.2 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T

อนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T จะมีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่อมองในลักษณะสองมิติจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 6.2)

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดจากข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาคแป้ง PURITY 21T ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอน CU-MTEC PARTICLE SIZE ANALYZER (กราฟการตกตะกอนแสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.12) พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีบางจุดของข้อมูลในกราฟการตกตะกอนที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองโปรแกรมมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วกลับลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงนี้ ร่วมกับกราฟแสดงฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าจุดที่กราฟการตกตะกอนเกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างจะเป็นจุดเดียวกับที่กราฟฟังก์ชันการกระจายขนาด (ดังแสดงในรูปที่ 6.112 และ 6.114) มีค่า amplitude สูงสุดหรือต่ำสุด

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และ 6.13 พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดในกรณีที่ใช้สเกลปกติ ที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอดอย่างชัดเจน ณ ตำแหน่งของอนุภาคประมาณ 12 และ 48 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบจะมีลักษณะเป็นแบบ unimodal ณ ตำแหน่งของอนุภาคประมาณ 12 ไมโครเมตร สำหรับโปรแกรม AUTOCAL-JIS และที่ 16 ไมโครเมตรสำหรับโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 แต่เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคในกรณีที่ใช้สเกล semi-log ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีลักษณะแยกเป็นสามยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 12, 25 และ 46 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS จะมีลักษณะแยกเป็นสี่ยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 10, 16, 24 และ 37 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 16 และ 43 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งลักษณะฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้มีลักษณะค่อนข้างราบเรียบมากกว่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS อย่างไรก็ตามพบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me จะมีลักษณะฟังก์ชันที่มีความสูง (amplitude) และค่อนข้างราบเรียบมากกว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ด้วยหลักการวิเคราะห์อื่นๆ พบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสม (ดังแสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.12) ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS 230 โดยค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret จะให้ค่าขนาดของอนุภาคเล็กที่สุด ขณะที่ค่าการกระจายขนาดที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S ให้ค่าขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลในตารางที่ 6.5

จากตารางที่ 6.5 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS สองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงคือ เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 และค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาค ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL- ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากโปรแกรม Det-Feret ,เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดในกรณีที่ใช้สเกลปกติดังแสดงในรูปที่ 6.132 ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS มีลักษณะเป็น unimodal ที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 13 ไมโครเมตร ส่วนโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS มีลักษณะเป็น unimodal ที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 16 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me แยกเป็นสองยอดอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 12 และ 47.5 ไมโครเมตร ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret มีลักษณะแยกเป็นสามยอดที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 12, 27.5 และ 37.5 ไมโครเมตร สำหรับฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S มีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 0.3 และ 18 ไมโครเมตร ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 มีลักษณะแยกเป็นหลายยอด

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคในกรณีสเกล semi-log ดังแสดงในรูปที่ 6.13 พบว่า ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS มีลักษณะแตกต่างจากในกรณีสเกลปกติ คือฟังก์ชันจะแยกเป็นสี่ยอด ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 16 และ 43 ไมโครเมตร ตามลำดับ เช่นเดียวกับฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ที่แยกเป็นสาม

ยอดอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งของอนุภาค 12, 25 และ 45 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret ยังคงแยกเป็นสามยอดเช่นเดียวกับในกรณีสเกลปกติ ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 17.5, 27.5 และ 37.5 ไมโครเมตร ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S กลับแสดงลักษณะเป็น unimodal ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 21 ไมโครเมตร ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคแบบกว้างและแยกเป็นหลายยอด

จากตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากวิธีต่างๆ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ที่มีการปรับเรียงความชันมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS แต่มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me เมื่อเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าที่ได้ด้วยหลักการวิเคราะห์อื่นๆ พบว่า โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กรณีสเกลปกติมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Mastersizer S ส่วนกรณีสเกล semi-log จะให้ค่าสูงกว่าวิธีวิเคราะห์อื่นๆ โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret มีค่าต่ำที่สุด

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS แบบที่มีการปรับเรียงความชันให้ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคค่อนข้างสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, โปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการหาเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ Feret ของอนุภาค และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง นอกจากนี้จากกราฟเป็นที่น่าสนใจที่โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me สามารถวัดและวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคได้ค่อนข้างน่าเชื่อถือมากกว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ นอกจากนี้โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ยังสามารถทำนายค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่โปรแกรม AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบสามารถวิเคราะห์ได้

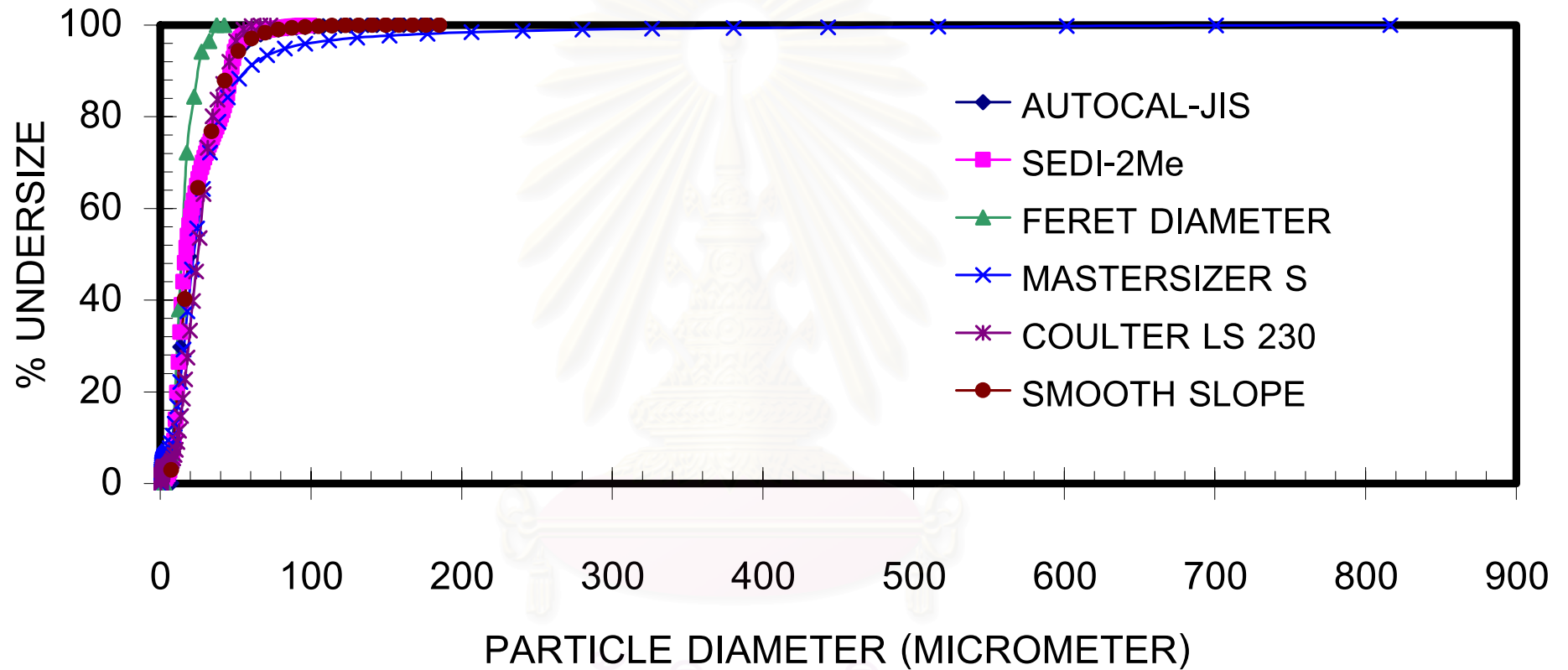
อย่างไรก็ตามพบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 มีลักษณะที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ อันเนื่องมาจากผู้ทำการทดลองขาดความชำนาญในการใช้เครื่องวิเคราะห์, ขาดการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์ หรือเกิดจากการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ไม่ดี

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T

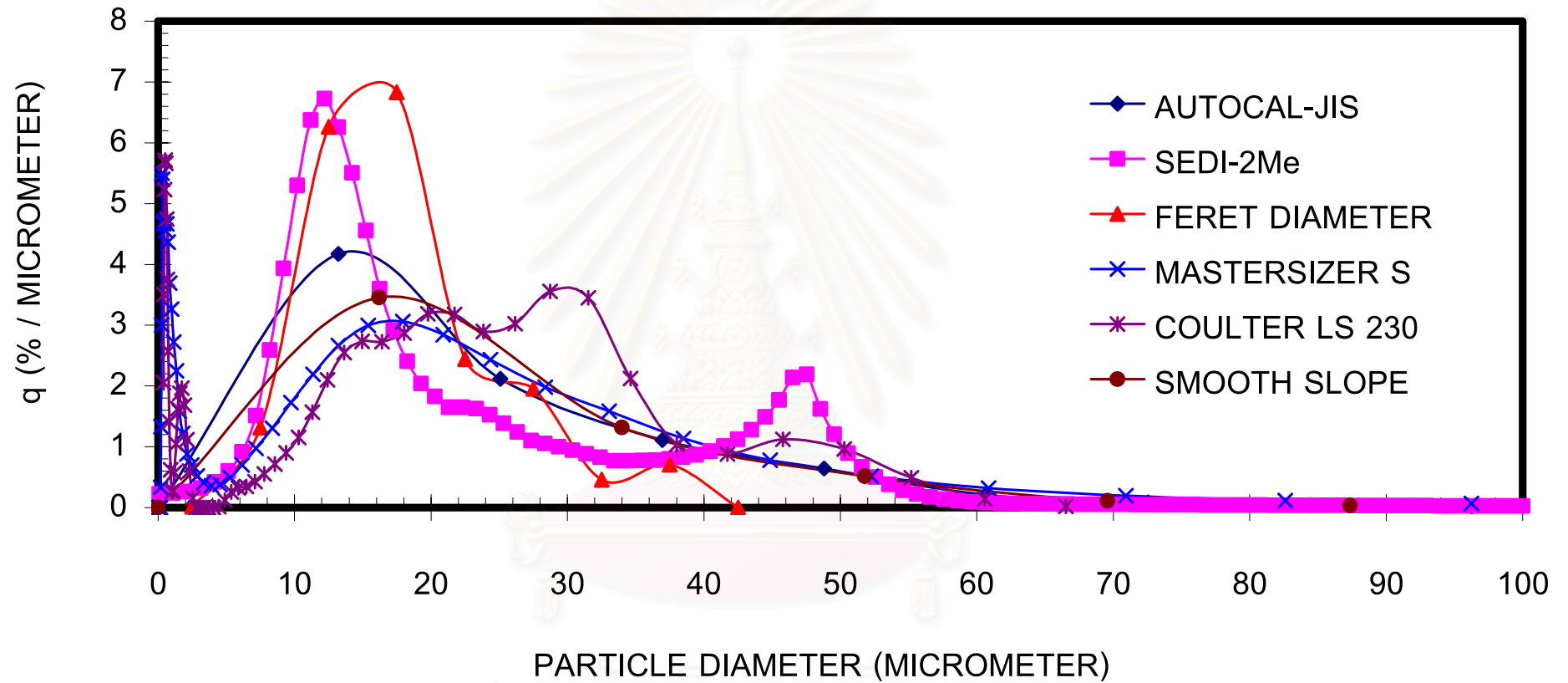
Oversize % ( on mass basis	Particle size (micrometer)								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZERS	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
10	45.48	45.15	47.15	55.44	25.37	57.11	46.12	45.77	45.41
25	31.70	31.69	33.87	33.84	18.66	35.32	33.81	32.69	31.27
50	19.33	19.30	16.81	16.28	14.26	22.18	26.20	19.77	19.47
75	12.27	11.48	11.99	11.62	10.42	14.09	17.99	12.55	13.06
90	9.27	8.68	9.33	9.43	8.03	8.04	12.30	11.36	9.18

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง PURITY 21T

ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ขนาดอนุภาค ( $\sigma_g$ )	Analytical method								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZERS	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS.v2	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
$\sigma_g$	2.10	2.09	2.61	2.80	0.63	2.02	1.35	2.02	2.08

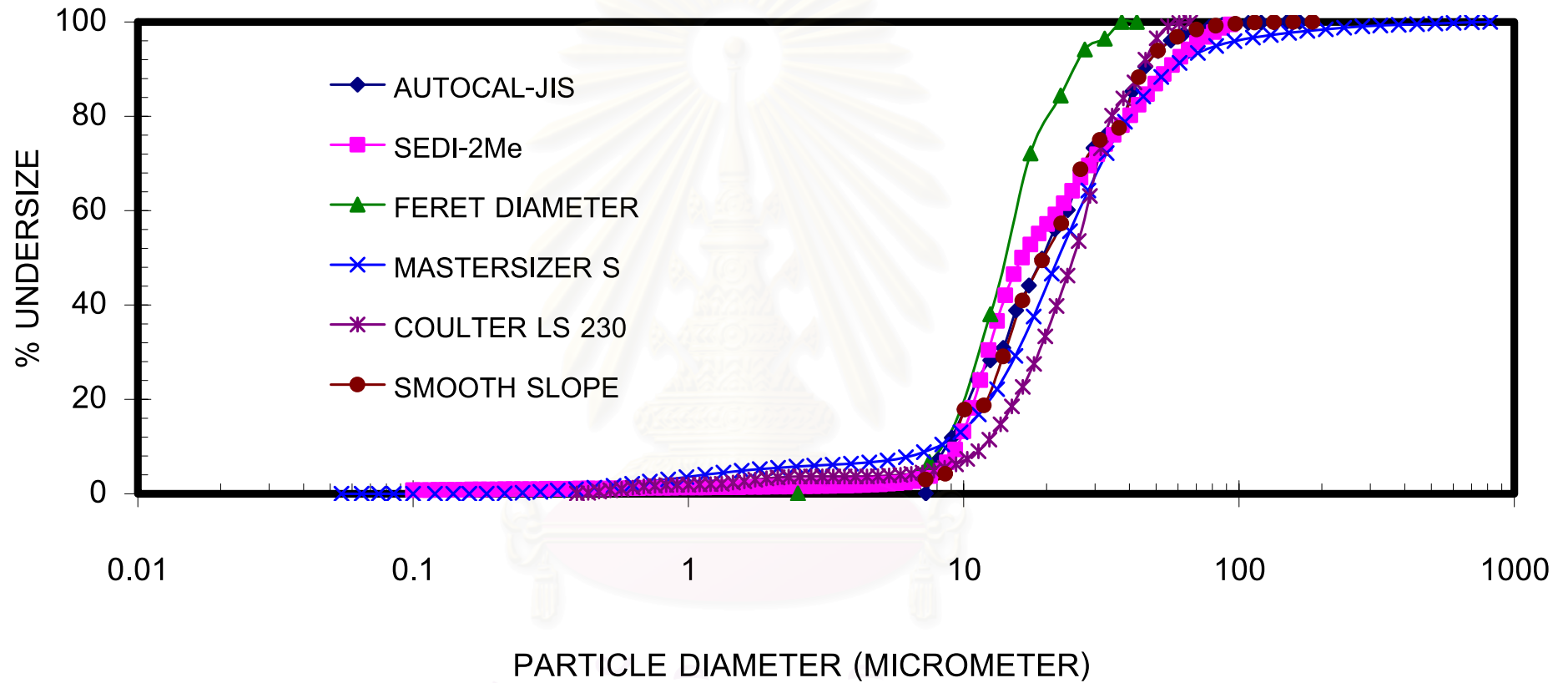


รูปที่ 6.10 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง และหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ

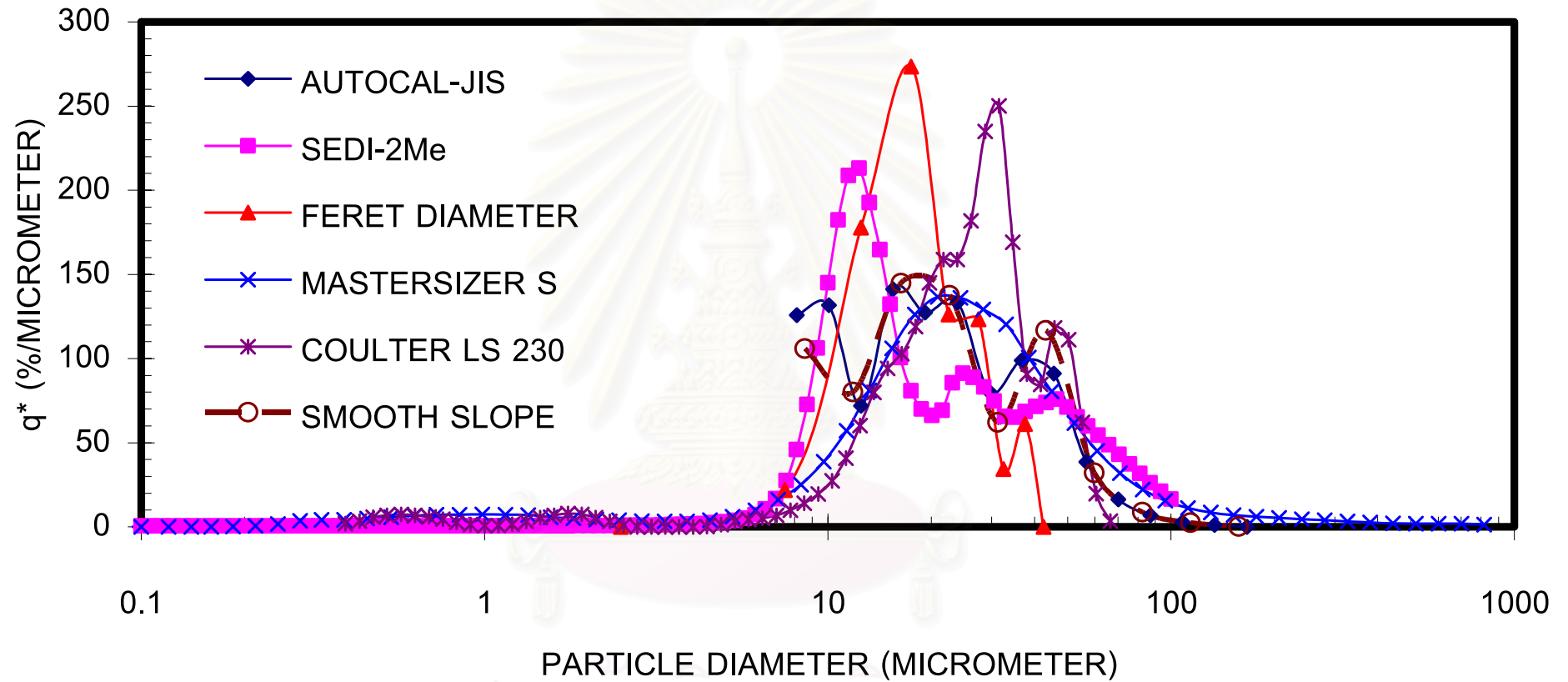


รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ





รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log



รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 กับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS, โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me, ค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

### 6.4.3 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตตัวอย่างที่ 1

ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดจากข้อมูลการตกตะกอนของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 ที่วัดได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าการกระจายขนาดจากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS กับโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me เช่นเดียวกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 6.8

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่า ฟังก์ชันการกระจายขนาดในกรณีที่ใช้สเกลปกติ ที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีลักษณะแยกเป็นสามยอดอย่างชัดเจน ณ ตำแหน่งของอนุภาคประมาณ 2, 4 และ 10 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS จะมีลักษณะเป็นแบบ unimodal ณ ตำแหน่งของอนุภาคประมาณ 4 ไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคในกรณีที่ใช้สเกล semi-log ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 1.7 และ 3.5 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS จะมีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งของขนาดของอนุภาคประมาณ 2.5 และ 4.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 จะมีลักษณะเป็น bimodal ที่ขนาดอนุภาค 2 และ 4.5 ไมโครเมตรเช่นเดียวกับที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม เพียงแต่ฟังก์ชันที่มีการปรับเรียบความชันจะให้กราฟที่ดูน่าเชื่อถือมากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me จะมีลักษณะฟังก์ชันที่มีความสูง (amplitude) มากกว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS ทั้งสองกรณี

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ส่วนใหญ่ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 มีขนาดค่อนข้างจิว ดังนั้นการแสดงผลวิเคราะห์การกระจายขนาดในรูปสเกล semi-log จะแสดงการกระจายขนาดของอนุภาคได้ดีกว่าการแสดงผลในรูปสเกลปกติ นอกจากนี้จากผลการทดลองที่ได้พบว่าโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me และโปรแกรม AUTOCAL-JIS ทั้งสองวิธีสามารถวัด

และวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคได้อย่างน่าเชื่อถือ อีกทั้งโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ยังสามารถทำนายค่าการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่โปรแกรม AUTOCAL-JIS สามารถวิเคราะห์ได้

เมื่อพิจารณาค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการอื่นพบว่า อนุภาคเคลือบคาร์บอน ตัวอย่างที่ 1 จะมีลักษณะirregular เมื่อบ่งในลักษณะสองมิติจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ผลจากการทดลองพบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me มีค่าใกล้เคียงกับค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS 230

จากตารางที่ 6.7 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงคือ เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 และค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยอาศัยหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาค ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่กำหนด ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบและโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากโปรแกรม Det-Feret ,เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดในกรณีที่ใช้สเกลปกติ ที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบมีลักษณะเป็น unimodal ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me แยกเป็นสามยอดอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 2, 3 และ 9 ไมโครเมตร ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret มีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 2.5 และ 7.5 ไมโครเมตร สำหรับฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S มีลักษณะแยกเป็น unimodal ที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 0.3 ไมโครเมตร ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 มีลักษณะแยกเป็นสองยอดที่ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 0.7 และ 8 ไมโครเมตร

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคในกรณีสเกล semi-log พบว่า ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบมีลักษณะแตกต่างจากในกรณีสเกลปกติ คือฟังก์ชันเป็นbimodal และฟังก์ชันการกระจายขนาด

ของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me เป็นbimodal เช่นกัน ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret ยังคงแยกเป็นสองยอด ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาคเดียวกับในกรณีสเกลปกติคือที่ขนาดของอนุภาค 2.5 และ 7.5 ไมโครเมตร หนึ่งฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S กลับแสดงลักษณะเป็นunimodal และมีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคกว้างทั้งในกรณีกราฟสเกลปกติและสเกล semi-log ส่วนฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคแบบกว้างและแยกเป็นสามยอด ณ ตำแหน่งขนาดของอนุภาค 0.8, 9 และ 20 ไมโครเมตร

**จากตารางที่ 6.8** เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากวิธีต่างๆ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงมีค่าสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ โดยที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret มีค่าต่ำที่สุด

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ให้ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคค่อนข้างสอดคล้องกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me โปรแกรม Det-Feret ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการหาเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ Feret ของอนุภาค แต่ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS.v2 ให้ลักษณะกราฟที่น่าเชื่อถือมากกว่าที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิม

อย่างไรก็ตามพบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง (เครื่องวิเคราะห์ Mastersizer S และ เครื่องวิเคราะห์ Coulter LS230) มีลักษณะที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ สาเหตุอาจเกิดเนื่องมาจากผู้ทำการทดลองขาดความชำนาญในการใช้เครื่องวิเคราะห์, ขาดการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์, โมเดลในการประมวลผลของเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดแตกต่างกัน หรือเกิดจากการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ไม่ดี

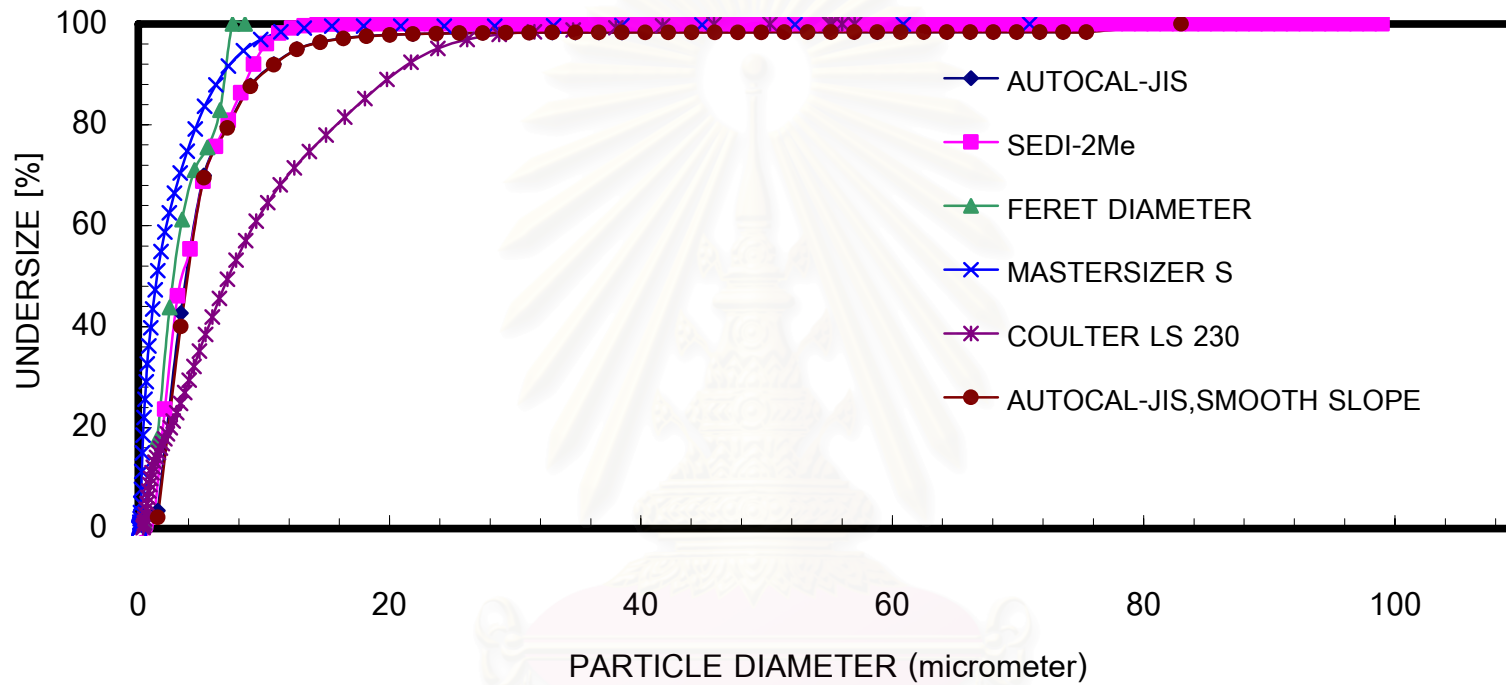
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1

Oversize % ( on mass basis	Particle size (micrometer)								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZER S	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
10	9.90	9.69	8.82	9.14	6.91	6.73	21.31	9.96	9.74
25	6.19	6.28	6.05	5.99	5.38	3.93	14.39	6.26	6.32
50	3.88	3.70	3.52	3.47	2.85	1.49	7.54	4.01	4.11
75	2.56	2.44	2.18	1.91	1.78	0.52	3.56	2.65	2.50
90	1.85	1.89	1.54	1.63	1.03	0.27	1.06	1.92	1.94

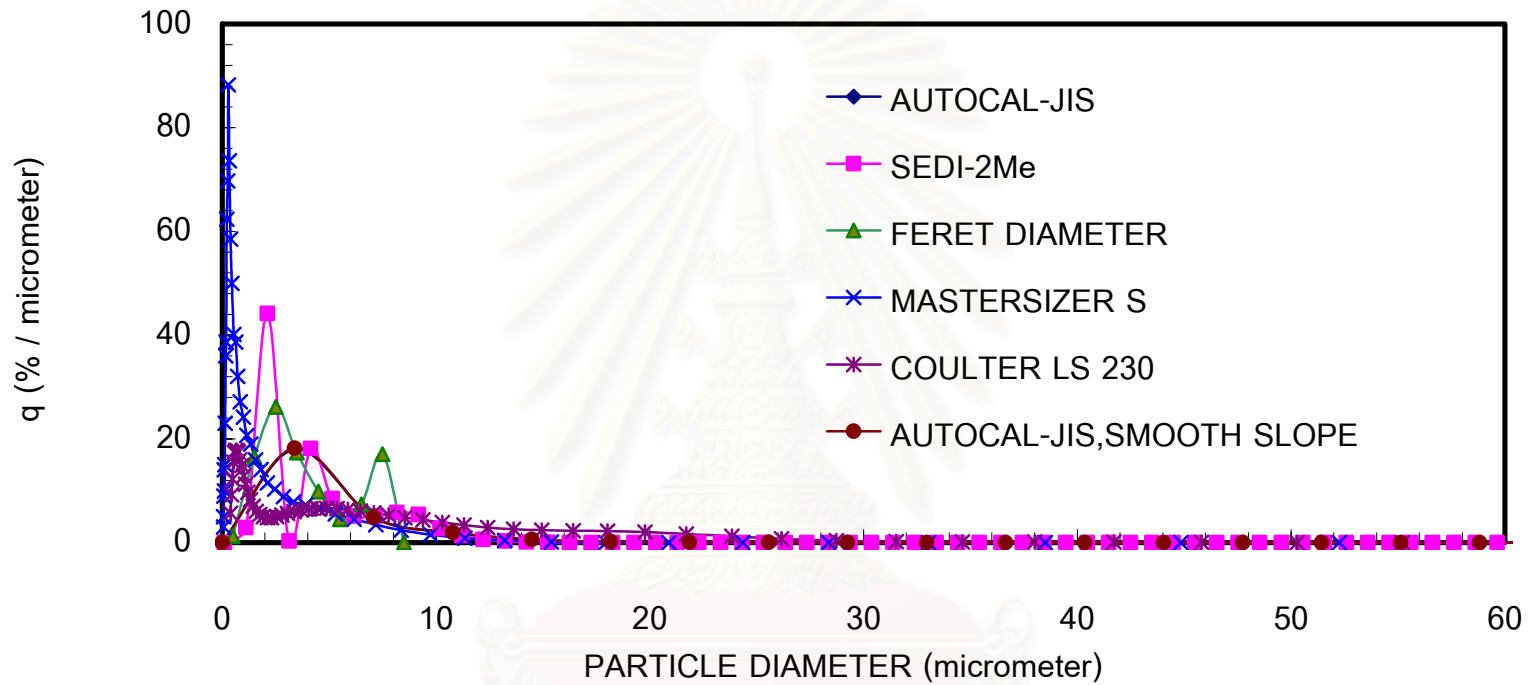
ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่คำนวณได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1

ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ขนาดอนุภาค ( $\sigma_g$ )	Analytical method								
	AUTOCAL-JIS		SEDI-2Me		FERET	MASTERSIZER S	COLTER LS230	AUTOCAL-JIS	
	Normal scale	Semi-log scale	Normal scale	Semi-log scale				Normal scale	Semi-log scale
$\sigma_g$	2.08	2.14	2.20	2.18	0.49	3.60	3.30	2.03	1.93

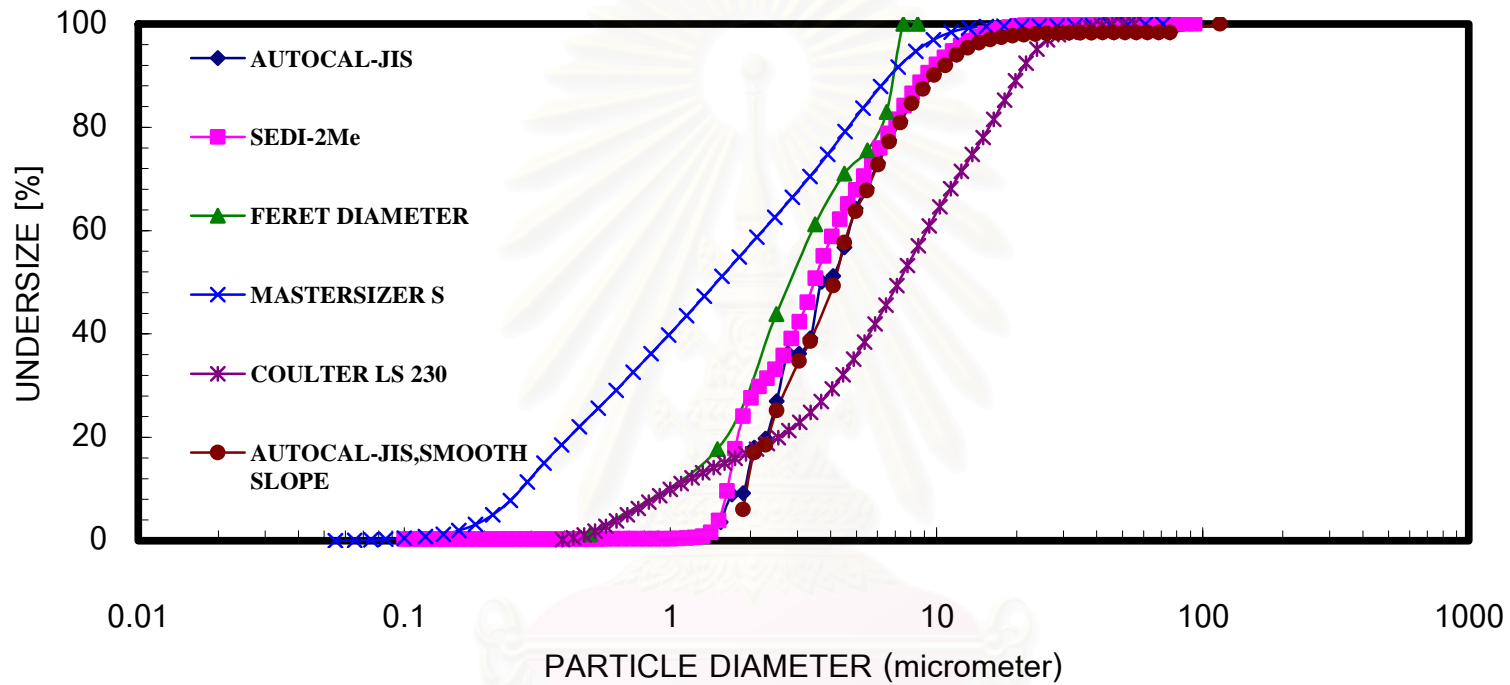


รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการปรับเรียบความชันและไม่มีและ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ

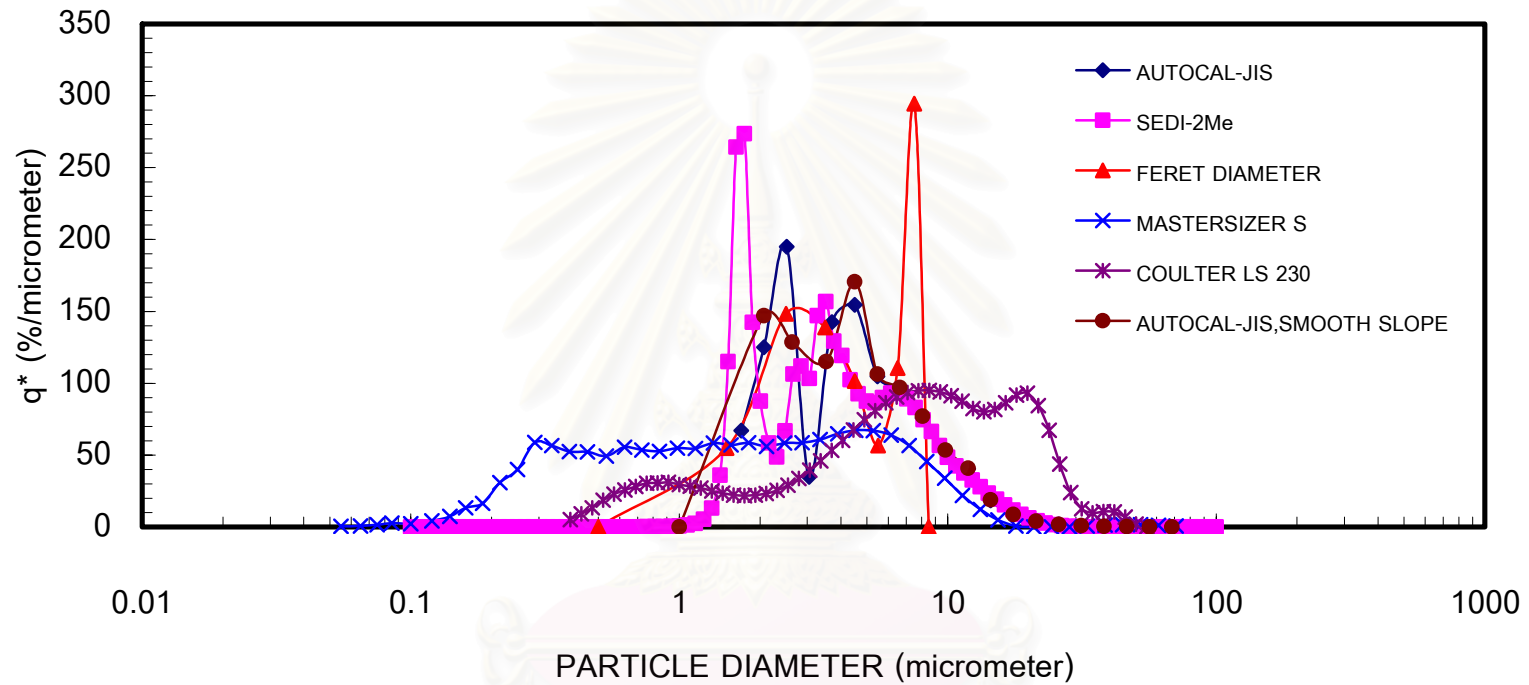




รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการปรับเรียบความชันและไม่มี และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกลปกติ



รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JISทั้งที่มี การปรับเรียบความชันและไม่มี และ โปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัด ได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้ สเกล semi-log



รูปที่ 6.17 เปรียบเทียบฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคเคลือบคาร์บอน ตัวอย่างที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งที่มีการปรับเรียบความชันและไม่มี และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me กับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงและหลักการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Feret ในกรณีที่ใช้สเกล semi-log

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

- จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยการใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองกับอนุภาคมาตรฐานที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการตกตะกอน (CU-MTEC Particle Size Analyzer) พบว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL- JIS.v2 สามารถวิเคราะห์หาค่าการกระจายขนาดแบบสะสม และฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคทั้งกรณีที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบแคบ และกรณีการกระจายขนาดแบบช่วงกว้างได้อย่างถูกต้อง ทั้งในกรณีของการคำนวณโดยใช้สเกลปกติ และการคำนวณโดยใช้สเกลล็อก แต่ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ (bimodal) พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสม และฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้ อาจมีผลกระทบบ้างเนื่องจากการแกว่งตัวของข้อมูลดิบในการทดลอง หนึ่งในบางกรณีฟังก์ชันการกระจายขนาดที่คำนวณได้อาจไม่แยกออกเป็น 2 ยอดอย่างเด่นชัดซึ่งผิดเพี้ยนจากความเป็นจริงของตัวอย่างอนุภาคที่กระจายขนาดแบบฐานนิยมคู่ ดังนั้นจึงควรเพิ่มความระมัดระวังหากใช้ AUTOCAL- JIS.v2 กับอนุภาคที่ไม่ใช่เป็นแบบฐานนิยมเดี่ยว

- จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานโดยการใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดที่อาศัยหลักการตกตะกอน Sedigraph 5100 V3.07A ยี่ห้อ Micromeritics (กรมวิทยาศาสตร์บริการ) พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด ที่วัดโดยใช้เครื่อง Sedigraph 5100 V3.07A มีลักษณะแตกต่างจากลักษณะการกระจายขนาดที่วัดโปรแกรมประมวลผลทั้งสามแบบและค่าจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างหรือขาดการเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดการกระจายขนาดและระดับความชำนาญของบุคคลที่ทำการทดลอง หนึ่งในส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์ที่ได้แตกต่างกันยังอาจเกิดจากการขาดการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์ Sedigraph 5100 อย่างสม่ำเสมอด้วย

- จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานโดยการใช้โปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 เปรียบเทียบกับโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม และโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me พบว่าโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ให้ผลไม่ค่อน

แตกต่างจากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม สำหรับอนุภาคมาตรฐานที่มีการกระจายแบบแคบ ขณะที่เมื่อพิจารณาค่าการกระจายขนาดของอนุภาคกลุ่มฐานนิยมพบว่า ได้ลักษณะฟังก์ชันการกระจายขนาดไม่แตกต่างจากที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม แต่ amplitude ที่ได้มีแนวโน้มมากกว่าที่ได้จากโปรแกรม AUTOCAL-JIS เดิม และค่าที่ได้ใหม่นี้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม SEDI-2Me ขณะที่ฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานกลุ่มการกระจายตัวแบบกว้างที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS.v2 ให้ค่าฟังก์ชันที่ราบเรียบมากกว่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS เดิม

อนึ่งโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบสามารถคำนวณค่าการกระจายขนาดได้เฉพาะในช่วงขนาดของอนุภาคที่มีผลการทดลองเท่านั้น ทำให้ฟังก์ชันการกระจายขนาดที่คำนวณได้ไม่สามารถครอบคลุมอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรได้ (ข้อมูลในช่วงเวลายาวมาก)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ผล โดยโปรแกรมประมวลผล AUTOCAL-JIS ทั้งสองแบบ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพิตเส้นกราฟการทดลองจะต้องมีความเหมาะสมกับจำนวนและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลการทดลองในแต่ละช่วง ในการพิตเส้นกราฟการทดลองถ้าใช้จำนวนจุดของข้อมูลน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถขจัดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลการทดลองได้ดี แต่ในทางกลับกันการใช้จำนวนจุดของข้อมูลในการพิตเส้นกราฟการทดลองในช่วงเวลาหลังสุดมากเกินไป จะทำให้สูญเสียรายละเอียดและน้ำหนักของข้อมูลในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลการทดลองอย่างรวดเร็ว
- 2) การแกว่งของค่าการกระจายขนาดแบบสะสม และฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของผลลัพธ์ (จำนวนแท่งของฮิสโตแกรม) ที่ต้องการหาค่า การแกว่งของผลลัพธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการหาค่าเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ของการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมและการคำนวณฟังก์ชันการกระจายขนาดขนาดของอนุภาคควรจำกัดอยู่ที่ประมาณ 20 จุด

■ ผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคจากภาคอุตสาหกรรมที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผลที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Det-Feret และเครื่องวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการกระเจิงแสง ปรากฏว่าได้ข้อสรุปดังนี้

- 1) การใช้หลักการวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันยอมให้ค่าการกระจายขนาดที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือต้นแบบเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดและโปรแกรมประมวลผลที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นเป็นการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้มวลเป็นฐานในการคำนวณ (mass basis) ขณะที่วิธีการวิเคราะห์ภาพเป็นการวัด

โดยใช้จำนวนอนุภาคเป็นฐานคำนวณ (number basis) ส่วนเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่อาศัยหลักการกระเจิงแสงของอนุภาคเป็นการวัดโดยใช้ปริมาตรเป็นฐานในการคำนวณ (volume basis)

- 2) การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องมือที่อาศัยหลักการกระเจิงของแสงเลเซอร์แบบเดียวกันแต่ผลิตโดยบริษัทแตกต่างกันก็จะให้ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดเนื่องมาจากการขาดการสอบเทียบเครื่องมือวิเคราะห์อย่างสม่ำเสมอ หรือเกิดจากความแตกต่างของรายละเอียดของเครื่องมือหรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล นอกจากนี้อาจเกิดจากการขาดความชำนาญของผู้ทำการทดลองในการเตรียมตัวอย่างและการใช้เครื่องมือด้วย
- 3) เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการกระจายขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTO-CAL-JIS.v2 พบว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จะมีลักษณะที่ราบเรียบและคูน่าเชื่อถือมากกว่าที่ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTO-CAL-JIS เดิม อย่างไรก็ตามโปรแกรมประมวลผล SEDI-2Me ให้ลักษณะฟังก์ชันที่ดีกว่าและมีข้อมูลมากกว่าในช่วงของอนุภาคขนาดเล็กกว่าฟังก์ชันการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผล AUTO-CAL-JIS ทั้งสองแบบ

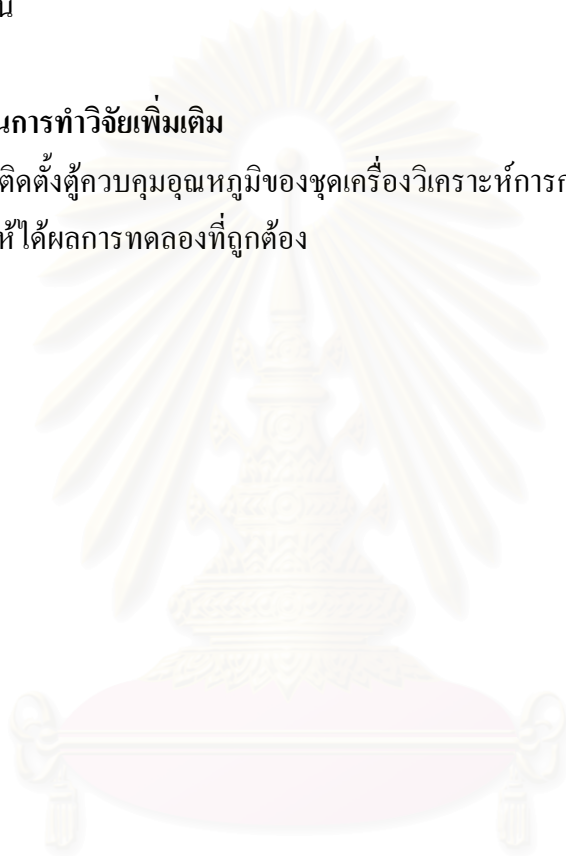
■ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อความถูกต้องของข้อมูลการทดลอง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคพบว่าถ้าใช้ปริมาณของอนุภาคตัวอย่างน้อยเกินไป (น้อยกว่า 0.1 กรัม) ข้อมูลที่ได้จะมีค่าใกล้ศูนย์มากเกินไป เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ประมวลผลจะทำให้เกิด ill condition ของสมการคณิตศาสตร์ได้ แต่ในทางกลับกัน คือ ถ้าใช้ปริมาณอนุภาคมากเกินไปอนุภาคจะตกตะกอนช้ากว่าปกติ เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคในช่วงความเข้มข้นสูงเกินไป อนึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณของอนุภาคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอน ควรจะมีปริมาณของอนุภาคสะสมอยู่บนจานรับน้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม เมื่ออนุภาคทุกขนาดตกตะกอนหมด
- 2) ในการเตรียมสารแขวนลอย ถ้าใช้เครื่องผสมแบบโซโมจิโนเซอร์ที่มีความเร็วรอบต่ำกว่า 5000 รอบ/นาที จะไม่สามารถทำให้อนุภาคบางชนิด เช่น ตัวอย่างฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตยังคงสภาพการเกาะรวมตัวกันในระดับหนึ่งโดยไม่เกิดการกระจายตัวในตัวกลางอย่างสมบูรณ์

- 3) การกระจายอุณหภูมิอย่างไม่สม่ำเสมอของสารแขวนลอยเนื่องจากการระเหยของน้ำจากผิวบน จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์การพาแบบธรรมชาติเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิ มีผลให้ความเร็วตกตะกอนของอนุภาคช้ากว่าปกติ
- 4) ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองจะทำให้ค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์เกิดการแกว่ง และยังรบกวนการตกตะกอนของอนุภาคในคอลัมน์ตกตะกอนด้วย จะต้องใช้มาตรการลดการสั่นสะเทือนอย่างเหมาะสม เช่น แผ่นยางกันสะเทือน

## 7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

ควรมีการติดตั้งตู้ควบคุมอุณหภูมิของชุดเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 8

### โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน

ความรู้ที่ได้จากการศึกษาวิธีการคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคในส่วนที่ 1 นั้น นับเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำจัดฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม ไซโคลนจัดเป็นอุปกรณ์กำจัดฝุ่นจากกระแสก๊าซในโรงงานอุตสาหกรรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อเด่นคือ มีโครงสร้างง่าย บำรุงรักษาง่าย สามารถนำมาใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงได้ อนึ่ง ในปัจจุบันมีการนิยมใช้ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสที่มีการเป่าลงด้วย เนื่องจากไซโคลนแบบนี้จะสามารถกำจัดฝุ่นที่มีขนาดจิวออกจากกระแสก๊าซได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะสร้างโปรแกรมสำหรับประเมินประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสทั้งที่มีและไม่มีลมเป่าลง โดยเลือกสมการของ H. Mothes และคณะ เนื่องจากได้มีรายงานว่าสมการเหล่านี้ทำนายค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง

#### 8.1 การทำนายค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นด้วยโมเดลของ Mothes and Loffler

H. Mothes และคณะ ได้เสนอโมเดลคำนวณหาประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสและก๊าซไหลย้อนออกในแนวแกนและมีกรวยติดตั้งที่ปลายทางออกของฝุ่น (Apex cone) ดังแสดงในรูปที่ 9.1 โดยแบ่งบริเวณภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 9.2 และสมการคำนวณหาประสิทธิภาพย่อยและประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นของไซโคลนแสดงดังตารางที่ 9.1

##### สมมติฐานของโมเดล

1. พิจารณาเฉพาะกรณีที่อนุภาคมีขนาดเท่ากันหมด
2. แบ่งพื้นที่ภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วน คือ บริเวณก๊าซไหลเข้า (region of entry), บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลง (region of particle removal with downward-directed flow), บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดเหนือท่อทางออกฝุ่น (region of particle removal above the outlet for the dust) และบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้น (region of particle removal with upward-directed flow)
3. การไหลภายในไซโคลนเป็นแบบลูกสูบ (Plug flow)
4. ความเข้มข้นของฝุ่นมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่คิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค



5. ตลอดจนการคำนวณ สมมติว่าขนาดของอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลง
6. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผนังส่วนทรงกระบอก, กรวย และท่อทางเข้ามีค่าเท่ากันและมีค่าในช่วง 0.00065 – 0.00075
7. ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ( $V_r(r_i)$ ) มีค่าคงที่ที่รัศมีของท่อทางออกก๊าซ ( $r_i$ ) ตลอดความยาวไซโคลอน
8. ความเร็วก๊าซในแนวแกน ( $V_z$ ) ไม่ขึ้นกับค่ารัศมี
9. รัศมีของไซโคลอนที่ใช้ในโมเดลมีค่าเป็น  $r_a^* = \sqrt{\frac{v_{cyclone}}{\pi h}}$
10. อนุภาคเกิดการผสมในแนวรัศมีอย่างสมบูรณ์ทุกบริเวณภายในไซโคลอน
11. อนุภาคในบริเวณเหนือช่องทางออกของฝุ่น(บริเวณที่ 3) เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ทั้งในแนวรัศมีและแนวแกน
12. สำหรับกรณีที่ให้อนุภาคเกิดการหลุดลอยกลับขึ้นมาใหม่ (Reentrainment) กำหนดให้ร้อยละอัตราการไหลก๊าซที่เข้าสู่บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดเหนือช่องทางออกของฝุ่นมีค่าเท่ากับ 10

### 8.1.1 ลักษณะโมเดล

ในโมเดลนี้แบ่งพื้นที่ในไซโคลอนออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. บริเวณก๊าซไหลเข้า (region of entry)
2. บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลง (region of particle removal with downward-directed flow)
3. บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดเหนือท่อทางออกฝุ่น (region of particle removal above the outlet for the dust)
4. บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้น (region of particle removal with upward-directed flow)

### 8.1.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของไหล (Fluid-mechanical parameters)

การไหลแบบปั่นป่วน 2-เฟส 3 มิติ ภายในไซโคลนสามารถอธิบายอย่างง่ายโดยบางส่วนของโมเดลเป็นโมเดลเชิงการทดลอง ซึ่งมีสมการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$V_e = \frac{\dot{V}}{b_e h_e} \quad (8.1)$$

$$V_d = \frac{\dot{V}}{\pi r_a^2} \quad (8.2)$$

$$\frac{V_{la}^*}{V_d} = \frac{r_a^2}{b_e h_e \beta^*} \quad (8.3)$$

$$\beta^* = \frac{V_e}{V_{la}^*} = 0.204 \frac{b_e}{r_a} + 0.889 \quad (8.4)$$

เมื่อ	$\dot{V}$	คือ	อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ไซโคลน
	$b_e$	คือ	ความกว้างของท่อทางเข้า
	$h_e$	คือ	ความสูงของท่อทางเข้า
	$r_a$	คือ	รัศมีของไซโคลน
	$V_{ea}^*$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวสัมผัส

และ  $\beta^*$  เป็นการคำนวณในกรณีการไหลแบบไม่มีแรงเสียดทาน

เมื่อพิจารณากรณีมีแรงเสียดทานในท่อทางเข้าและบริเวณผนังไซโคลนส่วนทรงกระบอก ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผนัง (wall-friction coefficient,  $\epsilon_e$ ) ดังนั้นความเร็วก๊าซในแนวสัมผัส ( $V_{ea}^*$ ) ที่รัศมีของไซโคลน ( $r_a$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{V_{la}}{V_d} = \frac{1}{\epsilon_e} \frac{1}{h_z^*} \left[ \left[ \sqrt{\frac{1}{4} + \epsilon_e h_z^* \frac{V_{ua}^*}{V_d}} \right] \frac{1}{2} \right] \quad (8.5)$$

$$\text{เมื่อ } h_z^* = \frac{h_e}{r_a} \left[ \frac{2\pi - \arccos\left\{\frac{b_e}{r_a} - 1\right\}}{2\pi} \right] + \frac{h_z}{r_a} \quad (8.6)$$

$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} \varepsilon_e &\rightarrow 0 ; \text{ ดังนั้น } V_{la} = V_{la}^* \text{ กรณีไม่คิดแรงเสียดทาน} \\ \varepsilon_e &\rightarrow \infty ; \text{ ดังนั้น } V_{la} = 0 \end{aligned}$$

เมื่อ	$V_{ua}$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวสัมผัสที่ผนังไซโคลอนเมื่อพิจารณาแรงเสียดทาน
	$V_{ua}^*$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวสัมผัสที่ผนังไซโคลอนเมื่อไม่พิจารณาแรงเสียดทาน
	$\varepsilon_e$	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผนังท่อทางเข้า
	$h_z$	คือ	ความสูงส่วนทรงกระบอกของไซโคลอนในรูปที่ 8.1

จากการใช้ค่าความเร็วก๊าซในแนวสัมผัสที่ผนังไซโคลอน จะสามารถคำนวณหาความเร็วในแนวสัมผัสของก๊าซที่ขึ้นกับรัศมีได้ ( $V_l$ )

$$V_l = \frac{V_{la}}{\frac{r}{r_a} \left[ 1 + D \left( 1 - \frac{r}{r_a} \right) \right]} \quad (8.7)$$

เมื่อ  $D$  คือ โมเมนต์เฉื่อยที่แตกเปลี่ยนระหว่างผนังกับก๊าซคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้

$$D = \frac{V_{ua}}{V_d} \varepsilon_d + \frac{\varepsilon_k}{\sin \varepsilon} \quad (8.8)$$

จากผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผนังไซโคลอนส่วนทรงกระบอก ( $\varepsilon_D$ ) , ที่ผนังไซโคลอนส่วนกรวย ( $\varepsilon_k$ ) และที่ผนังท่อทางเข้า ( $\varepsilon_e$ ) พบว่าสำหรับไซโคลอนผนังเรียบ ควรกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานดังนี้

$$0.0065 \leq \varepsilon_k = \varepsilon_D = \varepsilon_e \leq 0.0075$$

เนื่องจากความเร็วในแนวสัมผัสของก๊าซขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาค ดังนั้น ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวไปแล้วจะคำนวณให้ค่าที่ถูกต้องเมื่ออนุภาคมีความเข้มข้นต่ำ

สำหรับความเร็วในแนวรัศมีของก๊าซ ( $V_r$ ) สมมติว่า

1. ความเร็วก๊าซในแนวรัศมีที่ผนังหรือรัศมีของไซโคลน ( $V_r(r_w) = 0$ )
2. ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ที่รัศมีของท่อทางออก ( $V_r(r_o)$ ) มีค่าคงที่ตลอดความยาวของไซโคลน ดังสมการ

$$V_r(r_i) = \frac{\dot{V}_0}{2\pi r_i (h - h_e)} \quad (8.9)$$

สำหรับความเร็วของก๊าซในแนวแกน ( $V_z$ ) สมมติว่าไม่ขึ้นกับรัศมี นอกจากนี้โครงสร้างของไซโคลนทั้งส่วนทรงกระบอกและส่วนกรวยจะถูกแทนที่ในโมเดลด้วยสัดส่วนทรงกระบอก (cylindrical geometry) ขณะที่เมื่อพิจารณาในแง่ residence time ปริมาตรทั้งหมดของไซโคลนจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง จากข้อตระหนักดังกล่าวนี้ โมเดลจึงได้พิจารณาแล้วว่าแทนที่จะเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของไซโคลน ( $h$ ) ซึ่งมีผลต่อค่าความเร็วในแนวรัศมีของก๊าซ ( $V_r(r_i)$ ) ที่เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของไซโคลน แต่ควรที่จะเปลี่ยนค่ารัศมีของไซโคลน ( $r_a$ ) แทน ฉะนั้นรัศมีของไซโคลนที่ใช้ในโมเดลจึงคำนวณได้จาก

$$r_a^* = \sqrt{\frac{V_{cyclone}}{\pi h}} \quad (8.10)$$

เมื่อ  $V_{cyclone}$  คือ ปริมาตรไซโคลน

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเร็วของก๊าซในแนวแกน ( $V_z$ ) ได้จาก

$$V_z(Z) = \frac{\dot{V}_0(h-z)}{\pi(r_a^{*2} - r_i^2)(h-h_i)} \quad (8.11)$$

และคำนวณค่าอัตราการไหลในทิศทาง-ทิศขึ้น ได้จาก

$$\dot{V}_z(Z) = \dot{V}_o \frac{h-z}{h-h_t}; h_t \leq z \leq h \quad (8.12)$$

เมื่อ  $\dot{V}_z$  คือ อัตราการไหลก๊าซในแนวแกน  
 $Z$  คือ ระยะทางที่สนใจ

### โมเดลสำหรับการกำจัดอนุภาค

ในการคำนวณหาการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงในแนวแกนภายในไซโคลอน จะสมมุติว่าเกิดผสมของอนุภาคในแนวรัศมีได้อย่างสมบูรณ์ภายในทุกๆบริเวณของโมเดล อนึ่ง อนุภาคจะไหลเข้าสู่ไซโคลอนด้วยความเข้มข้น  $C_0$  ที่อัตราการไหล  $\dot{V}_o$

#### 1. บริเวณก๊าซไหลเข้าไซโคลอน (Region of Entry (1))

ภายในบริเวณทางเข้าของไซโคลอน อนุภาคจะเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วของก๊าซ ขณะที่อนุภาคที่อยู่ใกล้ผนังไซโคลอนจะสะสมบนผนังไซโคลอนด้วยความเร็วตกตัว (Velocity of settling) ส่งผลให้เกิดคุณสมบัติการของอนุภาค ดังสมการ

$$\frac{d}{dz}(\dot{V}_o C_1(z)) = -2\pi r_a^* j_1(r_a^*) \quad (8.13)$$

โดยสามารถคำนวณหาความเร็วของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลอนได้จาก

$$W(r_a^*) = \frac{\Delta\rho x^2 v_l^2(r_a^*)}{18\mu r_a^*} \quad (8.14)$$

ดังนั้น ฟลักซ์ ของอนุภาคที่สะสมบนผนัง,  $j_1(r_a^*)$  จะมีค่า

$$j_1(r_a^*) = W(r_a^*) C_1(Z) \quad (8.15)$$

เมื่อ	$C_1(z)$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่นภายในบริเวณที่ 1 ณ ระยะทาง $z$
	$j_1(r_a^*)$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลน
	$w(r_a^*)$	คือ	ความเร็วของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลน
	$\Delta\rho$	คือ	ผลต่างระหว่างความหนาแน่นฝุ่นที่แท้จริงและความหนาแน่นของอากาศ
	$x$	คือ	ขนาดของอนุภาค
	$\mu$	คือ	ความหนืดของอากาศ

## 2. บริเวณที่เกิดการกำจัดอนุภาคที่ซึ่งก๊าซมีทิศไหลลง (Region of particles removal with downward-directed flow (2))

ความเข้มข้นของอนุภาคในบริเวณนี้คำนวณได้จากมวลของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลนและมวลของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนโดยการพาและการแพร่ยังไปบริเวณที่ 4 ซึ่งสามารถคำนวณหา  $C_2(z)$  ได้จาก

$$\frac{d}{dz}(\dot{V}(z)C_2(z)) = -2\pi r_a^* j_2(r_a^*) + 2\pi r_i j_{2,4}(r_i) \quad (8.16)$$

และฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลน คำนวณได้จาก

$$j_2(r_a^*) = W(r_a^*)C_2(z) \quad (8.17)$$

เมื่อ	$C_2(z)$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่นภายในบริเวณที่ 2 ณ ระยะทาง $z$
	$j_2(r_a^*)$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลนภายในบริเวณที่ 2

หนึ่งทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบพา ระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 จะขึ้นกับค่าความเร็วของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลนที่สัมพันธ์กับก๊าซ ว่ามีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่าค่าความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ( $V_r(r_i)$ ) ส่วนการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบแพร่ จะระบุได้จากผลต่างของความเข้มข้นของอนุภาคระหว่าง 2 บริเวณ โดยที่ความแตกต่างระหว่างรัศมี  $r_a^* - r_i$  ถูกเลือกเป็นค่าความยาวจำเพาะ (characteristic length) การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบแพร่นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และค่าผลต่างของความเข้มข้น ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ระหว่างบริเวณที่ 2 และบริเวณที่ 4,  $j_{2,4}(r_i)$  ดังสมการ

$$j_{2,4}(r_i) = -D_p \frac{C_2(Z) - C_4(Z)}{r_a^* - r_i} + \{W(r_i) - V_r(r_i)\}C_4(Z); \quad W(r_i) \geq V_r(r_i) \quad (8.18)$$

$$j_{2,4}(r_i) = -D_p \frac{C_2(Z) - C_4(Z)}{r_a^* - r_i} + \{W(r_i) - V_r(r_i)\}C_2(Z); \quad W(r_i) \leq V_r(r_i) \quad (8.20)$$

โดยสามารถคำนวณความเร็วของอนุภาคที่วิ่งชนผนัง ณ รัศมีของท่อทางออกได้จาก

$$W(r_i) = \frac{\Delta \rho x^2 V_u^2(r_i)}{18 \mu r_i} \quad (8.19)$$

เมื่อ	$D_p$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค
	$C_4(z)$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่นภายในบริเวณที่ 4 ณ ระยะทาง z
	$W(r_i)$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ

### 3. บริเวณที่เกิดการกำจัดอนุภาคเหนือท่อทางออกของฝุ่น (Region of particle removal above the outlet for the dust (3))

การกำจัดอนุภาคในบริเวณนี้อธิบายได้โดยการที่อนุภาคที่สะสมบนผนังไซโคลนเกิดการหลุดลอยกลับขึ้นมาใหม่ (Reentrainment) และการผสมอนุภาคในแนวรัศมีและแนวแกนภายในบริเวณนี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จากรูปที่ 8.2 สมการดุลมวลในบริเวณนี้คือ

$$j_2(l)\pi(r_a^{*2} - r_i^2) - j_4(l)\pi r_i^2 - j_3(r_a^*)2\pi r_a^2(h-l) = 0 \quad (8.21)$$

โดยที่ฟลักซ์ของอนุภาค  $j_3(r_a^*)$  จะประกอบด้วยอนุภาคที่สะสมบนผนัง และอนุภาคที่สะสมบนผนังแล้วเกิดหลุดลอยกลับขึ้นมาใหม่ ดังสมการ

$$j_3(r_a^*) = W(r_a^*)C_3 - \frac{\dot{m}_w}{2\pi r_a^*(h-l)} \quad (8.22)$$

อนึ่ง สมมุติว่าก๊าซไหลเข้าสู่บริเวณที่ 3 มีค่าเป็น 10% ของอัตราการไหลก๊าซขาเข้า ดังนั้นคำนวณหาค่าความยาวจำเพาะ (characteristic length) ได้จากสมการ

$$l = h - \left( \frac{h - h_t}{10} \right) \quad (8.23)$$

เมื่อ	$j_2(l)$	คือ	ฟังก์ชันของอนุภาคในบริเวณที่ 2 ณ ระยะทาง 1
	$j_4(l)$	คือ	ฟังก์ชันของอนุภาคในบริเวณที่ 4 ณ ระยะทาง 1
	$j_3(r_a^*)$	คือ	ฟังก์ชันของอนุภาคในบริเวณที่ 3 ณ หน้าไซโคลน
	1	คือ	ความยาวจำเพาะ
	$\dot{m}_w$	คือ	อัตราการไหลมวลของอนุภาคที่เกิดหลุดลอยออกจากหน้าไซโคลน

#### 4. บริเวณที่เกิดการกำจัดอนุภาคที่ซึ่งกำขมิทิศไหลขึ้น (Region of particle removal with upward-directed flow (4))

ในบริเวณนี้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของอนุภาคได้จากมวลของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านระหว่างบริเวณที่ 2 และบริเวณที่ 4 ดังสมการ

$$\frac{d}{dz} (\dot{V}(Z)C_4(Z)) = -2\pi r_i j_{2,4}(r_i) \quad (8.24)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของอนุภาคในแต่ละบริเวณสรุปได้ดังตารางที่ 8.1 โดยมีสภาวะขอบเขตดังนี้

1.  $C_1(h_t) = C_2(h_t)$
2.  $C_3 = C_4(l)$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 8.1.3 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคภายในไซโคลอน

สมการคำนวณหาความเข้มข้นของแต่ละบริเวณสรุปได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 สมการแสดงประสิทธิภาพย่อยและประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นด้วยไซโคลอนของ Mothes

และ Loffler

$$\text{Grade and Overall Efficiency} \quad F = \dot{m}_w \left( Q \frac{H-1}{H-S} \right) \quad (\text{A-16})$$

$$c_1(z) = c_0 \exp \left[ - \frac{2\pi r_a^* w(r_a^*) (z - a/2)}{Q} \right] \quad (\text{A-1}) \quad E = 1 + w(r_a^*) 2\pi r_a^* (H-1) \left( Q \frac{H-1}{H-S} \right) \quad (\text{A-17})$$

$$c_3 = \frac{c_2(l) + \dot{m}_w \left( Q \frac{H-1}{H-S} \right)}{1 + w(r_a^*) 2\pi r_a^* (H-1) \left( Q \frac{H-1}{H-S} \right)} \quad (\text{A-2}) \quad \text{grade efficiency, } \eta \quad \eta = 1 - \frac{c_4(S)}{c_0} \quad (\text{A-18})$$

$$c_2(z) = R_1 \left( \frac{H-z}{H-S} \right)^{m_1} + R_2 \left( \frac{H-z}{H-S} \right)^{m_2} \quad (\text{A-3}) \quad \text{overall collection efficiency} \quad \eta_o = \frac{\int_0^\infty m_{in} \eta \, dD_p}{\int_0^\infty m_{in} \, dD_p} \quad (\text{A-19})$$

$$c_4(z) = R_1 \left( \frac{m_1 - A}{B} \right) \left( \frac{H-z}{H-S} \right)^{m_1} + R_2 \left( \frac{m_2 - A}{B} \right) \left( \frac{H-z}{H-S} \right)^{m_2} \quad (\text{A-4})$$

$$m_{1,2} = \frac{A+D}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{A+D}{2} \right)^2 - (AD - BC)} \quad (\text{A-5})$$

for  $w(D/2) \geq v_r(D/2)$

$$A = \frac{2\pi r_a^* w(r_a^*) (H-S)}{Q} + \frac{D_e/2 D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} \quad (\text{A-6})$$

$$B = - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} [w(D/2) - v_r(D/2)] (H-S)}{Q} \quad (\text{A-7})$$

$$C = \frac{D_e/2 D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} \quad (\text{A-8})$$

$$D = B - 1 \quad (\text{A-9})$$

for  $w(D/2) < v_r(D/2)$

$$A = \frac{2\pi r_a^* w(r_a^*) (H-S)}{Q} - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} [w(D/2) - v_r(D/2)] (H-S)}{Q} - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} - 1 \quad (\text{A-10})$$

$$B = - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} \quad (\text{A-11})$$

$$C = \frac{2\pi \frac{D_e}{2} D_s (H-S)}{Q(r_a^* - D/2)} - \frac{2\pi \frac{D_e}{2} [w(D/2) - v_r(D/2)] (H-S)}{Q} \quad (\text{A-12})$$

$$D = B - 1 \quad (\text{A-13})$$

boundary conditions

$$c_2(S) = c_1(S)$$

$$c_4(l) = c_3$$

constants in the general solution

$$R_1 = c_1(S) - R_2 \quad (\text{A-14})$$

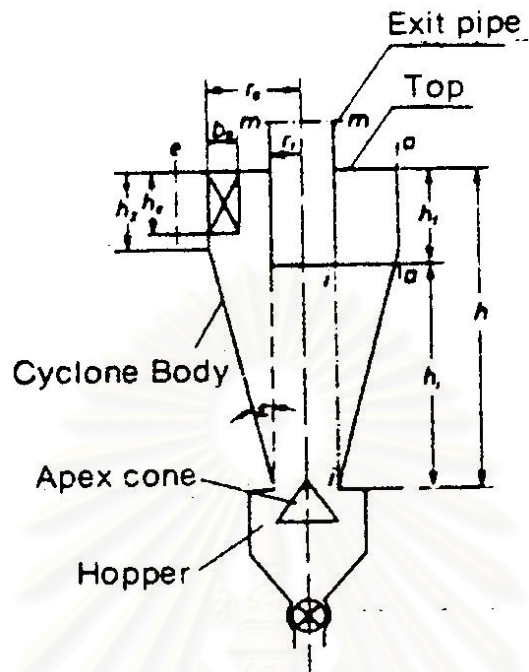
$$R_2 = \frac{c_1(S) + F \left[ \left( \frac{H-1}{H-S} \right)^{m_2} \left( 1 - \frac{E(m_1 - A)}{B} \right) \right]}{1 - \left( \frac{B - E(m_2 - A)}{B - E(m_1 - A)} \right) \left( \frac{H-1}{H-S} \right)^{m_1 - m_2}} \quad (\text{A-15})$$

เมื่อ	a	คือ	ความสูงของทางเข้าของก๊าซสกปรกของไซโคลน (m)
	A, B, C, D	คือ	ตัวแปรในการคำนวณ (-)
	b	คือ	ความกว้างของทางเข้าของก๊าซสกปรกของไซโคลน (m)
	$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4$	คือ	ความเข้มข้นของอนุภาค ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
	$d_{50}$	คือ	ขนาดตัดของอนุภาค (m)
	$D_e$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทางออก (m)
	$\bar{D}_p$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางเชิงน้ำหนักเฉลี่ยของอนุภาค (m)
	$D_s$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยของแก๊สในก๊าซ (effective mean diffusivity, $\text{m}^2/\text{s}$ )
	H	คือ	ความสูงทั้งหมดของไซโคลน (m)
	l	คือ	natural length (m)
	$m_{in}$	คือ	มวลของอนุภาคที่มีขนาด $D_p$ ในสารป้อน
	Q	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
	$r_a^*$	คือ	corrected radius (m)
	S	คือ	ความลึกของท่อทางออก (m)
	$v_r$	คือ	ความเร็วในแนวรัศมี (m)
	w	คือ	ความเร็วในการตกตะกอน (m/s)

จากค่าความเข้มข้นฝุ่นที่คำนวณได้ จะสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยของการจับฝุ่นของไซโคลนได้จาก

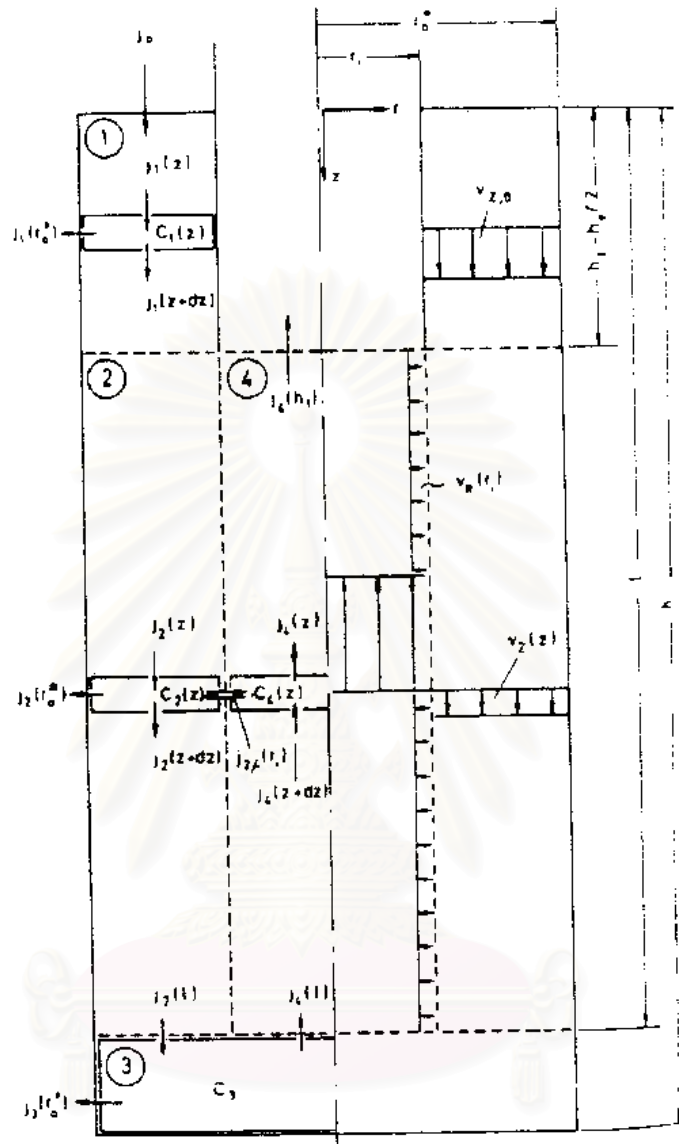
$$T(x) = 1 - \frac{C_4(h_r)}{C_0} \quad (8.25)$$

เมื่อ	$T(x)$	คือ	ประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน (-)
	X	คือ	ขนาดของอนุภาค (เมตร)
	$C_4(h_r)$	คือ	ความเข้มข้นของฝุ่น ณ ระดับท่อทางออกของก๊าซ ที่ขนาดของอนุภาค x
	$C_0$	คือ	ความเข้มข้นของฝุ่นที่ป้อนเข้าสู่ไซโคลน ที่ขนาดของอนุภาค x



รูปที่ 8.1 ไซโคลนที่ใช้ในโมเดล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



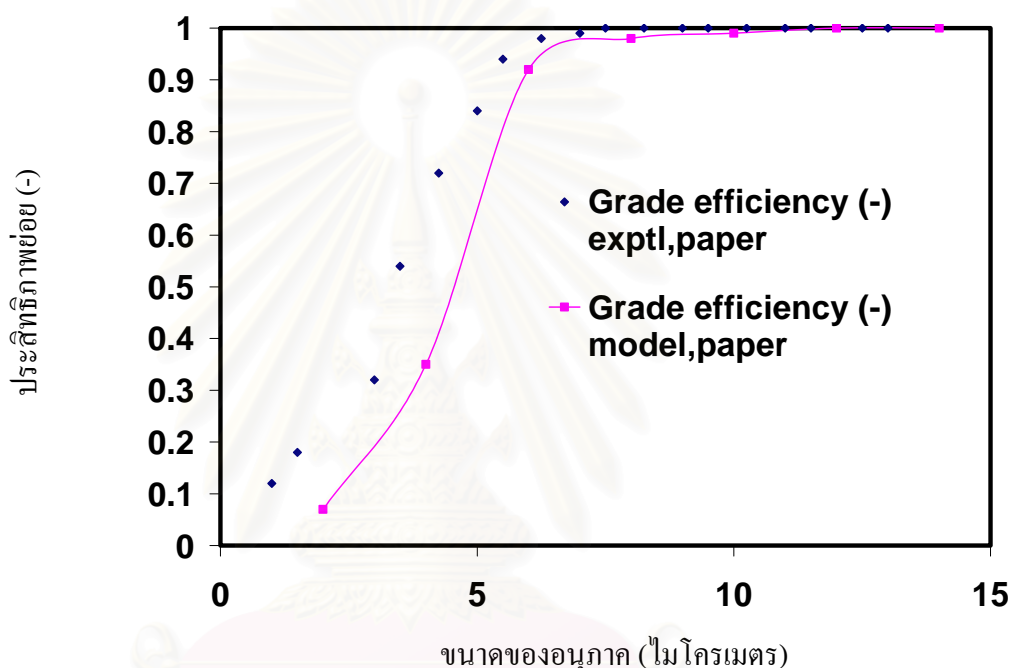
รูปที่ 8.2 แสดงการแบ่งบริเวณภายในโมเดล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 8.1.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมของ Mothes และ Loffler กับข้อมูลการทดลอง

G.Ravi และคณะ (2000) ได้นำโมเดลของ Mothes และ Loffler มาทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส ซึ่ง G.Ravi และคณะพบว่า ค่าที่ทำนายได้จากโปรแกรมยังคงแตกต่างจากผลการทดลอง ซึ่งเห็นได้ชัดสำหรับอนุภาคนาขนาดเล็กกว่า 6 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่

8.3



รูปที่ 8.3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นที่ความเร็ว 11 เมตร/วินาที ของไซโคลนที่คำนวณได้จากโมเดล Mothes และ Loffler กับค่าจากผลการทดลอง

#### 8.1.5 จุดอ่อนของโมเดล Mothes และ Loffler

ผลจากโมเดลสรุปได้ว่าโมเดล Mothes และ Loffler ยังมีจุดอ่อนดังนี้

1. โมเดลนี้ไม่คิดการเกิดการชนกัน หรือรวมตัวกันของอนุภาค ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอนุภาคนาขนาดเล็กจะเกิดการรวมตัวกันซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นของไซโคลนสูงขึ้น
2. โมเดลนี้จำเป็นต้องทราบค่าอัตราการไหลมวลของอนุภาคที่เกิดการหลุดลอยกลับขึ้นใหม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไม่สามารถทราบได้

3. เมื่อนำชุดสมการคำนวณหาความเข้มข้นมาคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคด้วยวิธี Runge Kutta พบว่า ไม่สามารถกำหนดค่า initial condition ในการแก้สมการสำหรับคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคในบริเวณที่ 2 และ 4 ณ ตำแหน่งความสูงที่กำลังสนใจภายในไซโคลนได้
4. boundary condition ที่ 2 ในตารางที่ 9.1 จะไม่เป็นจริงเมื่อกำหนดว่าภายในไซโคลนเกิด reentrainment

## 8.2 โปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสชนิดมีและไม่มีการเป่าลง

จากโมเดลของ Mothes และ Loffler ซึ่งมีลักษณะการไหลภายในไซโคลนเป็นแบบลูกสูบ (plug flow) และเพื่อแก้ไขจุดอ่อนของโมเดลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 8.1.2 ดังนั้นโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นของไซโคลนที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จึงคำนวณหาความเข้มข้นฝุ่นภายในไซโคลนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการแบ่งพื้นที่ภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับโมเดล Mothes and Loffler แต่ภายในแต่ละส่วนจะแบ่งออกเป็นถึงเล็กๆหลายถึงต่ออนุกรมกันเปรียบเสมือนการนำถังกวน (CSTR) มาเรียงต่อกันจำนวน  $n$  ถัง หนึ่งสำหรับไซโคลนแบบที่มีการเป่าลง (blowdown) จะทำการเป่าทิ้งออกจากด้านข้างของบริเวณที่ 3 ของโมเดล

นอกจากนี้โปรแกรมได้ใช้สมการคำนวณหาพารามิเตอร์ของไหล (Fluid-mechanic parameters) เช่นเดียวกับในโมเดลของ Mothes and Loffler โดยใช้สมการที่ (8.1-8.10)

ในกรณีที่มีการเป่าลง อัตราการไหลของก๊าซที่ไหลออกไปที่ทางออกด้านบนไซโคลนจะน้อยกว่าอัตราการไหลเข้าของก๊าซ ดังนั้นสมการคำนวณหาความเร็วของก๊าซในแนวรัศมีเป็น

$$V_r(r_i) = \frac{V_{out}}{2\pi r_i (h - h_i)} \quad (8.26)$$

เมื่อ  $V_{out}$  คือ ผลต่างระหว่างอัตราการไหลก๊าซขาเข้าและอัตราการไหลของก๊าซที่ถูกเป่าทิ้ง

### 8.2.1 สมมติฐานของโมเดล

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงได้กำหนดสมมติฐานของโมเดลไว้ดังนี้

1. พิจารณาเฉพาะกรณีที่อนุภาคมีขนาดเท่ากันหมด
2. แบ่งพื้นที่ภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วน คือ บริเวณก๊าซไหลเข้า (region of entry), บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลง (region of particle removal with downward-directed flow), บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดเหนือช่องทางออกฝุ่นที่อยู่ด้านล่าง (region of particle removal above the outlet for the dust) และบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้น (region of particle removal with upward-directed flow)
3. การไหลภายในไซโคลนเป็นแบบลูกสูบ (Plug flow) ซึ่งสามารถจำลองได้โดยใช้ถังกวนแบบสมบูรณ์ (CSTR) จำนวน  $n$  ถึงต่ออนุกรมกัน โดยที่  $n$  มีค่ามากกว่า  $\gg 1$  เช่น 26 ถึง
4. ความเข้มข้นของฝุ่นภายในไซโคลนมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่ต้องคิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค
5. ตลอดระยะเวลาของการคำนวณ ขนาดของอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลง
6. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผนังส่วนทรงกระบอก, กรวย และช่องทางเข้ามีค่าเท่ากัน อนึ่ง Mothes และ Loffler ได้แนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.0007 แต่สามารถกำหนดค่าใหม่ได้
7. ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ( $V_r(r_i)$ ) มีค่าคงที่ที่รัศมีของช่องทางออกก๊าซ ( $r_i$ ) ตลอดความยาวไซโคลน
8. ค่ารัศมีสมมูลย์ของไซโคลนที่ใช้ในโมเดลมีค่าเป็น  $r_a^* = \sqrt{\frac{v_{cyclone}}{\pi h}}$
9. มีการผสมอนุภาคในแนวรัศมีอย่างสมบูรณ์ทุกบริเวณภายในไซโคลน
10. บริเวณเหนือช่องทางออกด้านล่างของฝุ่น (บริเวณที่ 3) มีการผสมอนุภาคกันอย่างสมบูรณ์โดยกำหนดให้จำนวนถังภายในบริเวณที่ 3 มีค่าเป็น 1 เสมอ
11. สำหรับกรณีที่ไซโคลนมีการเป่าลง (blowdown) จะทำการเป่าทิ้งออกจากด้านข้างของบริเวณที่ 3 ของโมเดล

### 8.2.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของไหล (fluid-mechanical parameters)

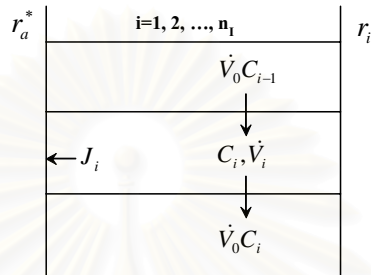
การคำนวณสมการในหัวข้อนี้ คิดเหมือนในหัวข้อ 8.1.2 โดยใช้สมการที่ (8.1-8.10)

### 8.2.3 การคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคภายในไซโคลน

สมการคำนวณหาความเข้มข้นของอนุภาคจะแบ่งออกตามพื้นที่ในไซโคลนดังนี้

#### 1. สมการควบคุมมวลบริเวณที่ใกล้ไหลเข้าไซโคลน (1)

ความเข้มข้นฝุ่นในบริเวณนี้สามารถคำนวณได้จากสมการควบคุมมวลดังนี้



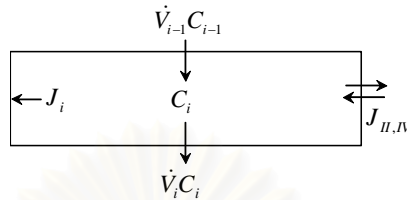
$$\frac{d}{dt} C_i = \frac{\dot{V}_0}{V_i} C_{i-1} - \frac{\dot{V}_0}{V_i} C_i - j_i \frac{A_i}{V_i} \quad (8.27)$$

เมื่อ	$C_i$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่น ณ ตำแหน่งถึง $i$
	$V_i$	คือ	ปริมาตรของถัง $i$
	$A_i$	คือ	พื้นที่ของผนังไซโคลนในส่วนที่อนุภาคตกบนผนังภายในถึงที่สนใจ
	$j_i$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลนคำนวณได้จากสมการที่ (8.15)
	$\dot{V}_0$	คือ	อัตราการไหลก๊าซเข้า
และ	$i$	คือ	ตำแหน่งถึงซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $n_i$



## 2. สมการควบคุมบริเวณที่เกิดการกักตุนภาคที่ซึ่งก๊าซมีพิษไหลลง (2)

ความเข้มข้นฝุ่นในบริเวณนี้สามารถคำนวณได้จากสมการควบคุมดังนี้



$$\frac{d}{dt}(V_i C_i) = \dot{V}_{i-1} C_{i-1} - \dot{V}_i C_i - J_i A_i + J_{i,II-IV} A_{II-IV} \quad (8.28)$$

เมื่อ	$C_i$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่น ณ ตำแหน่งถึง $i$
	$V_i$	คือ	ปริมาตรของถึง $i$
	$A_i$	คือ	พื้นที่ของผนังไซโคลอนในส่วนที่อนุภาคตกบนผนังภายในถึงที่สนใจ
	$j_i$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลอนคำนวณได้จากสมการที่ (8.15)
	$j_{i,II-IV}$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 คำนวณได้จากสมการที่ (8.29) และ (8.30)
	$A_{II-IV}$	คือ	พื้นที่ระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ที่อนุภาควิ่งผ่านภายในถึงที่สนใจ
	$\dot{V}_i$	คือ	อัตราการไหลก๊าซ
และ	$i$	คือ	ตำแหน่งถึงซึ่งมีค่าตั้งแต่ $n_1 + 1$ ถึง $n_{II}$

2.1 กรณี  $w(r_i) - V_r(r_i) \geq 0$  จะคำนวณหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ได้จาก

$$J_{i,II-IV} = -D_p \frac{C_i - C_{i+n}}{r_a^* - r_i} + \{w(r_i) - V_r(r_i)\} C_{i+n} \quad (8.29)$$

เมื่อ	$n$	คือ	$n_{total} + n_1 + 3 - 2i$
	$D_p$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค
	$W(r_i)$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ
	$V_r(r_i)$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ

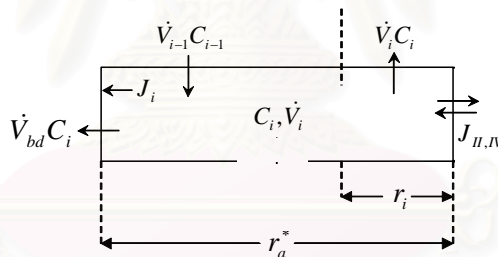
2.2 กรณี  $w(r_i) - V_r(r_i) < 0$  จะคำนวณหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ได้จาก

$$J_{i,II-IV} = -D_p \frac{C_i - C_{i+n}}{r_a^* - r_i} + \{w(r_i) - V_r(r_i)\} C_i \quad (8.30)$$

เมื่อ	$n$	คือ	$n_{\text{total}} + n_1 + 3 - 2i$
	$D_p$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค
	$W(r_i)$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ
	$V_r(r_i)$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ

### 3. สมการดุลมวลบริเวณที่เกิดการกำจัดอนุภาคเหนือท่อทางออกของฝุ่น (3)

ในบริเวณที่ 3 กำหนดให้จำนวนถังมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ และสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นได้จาก



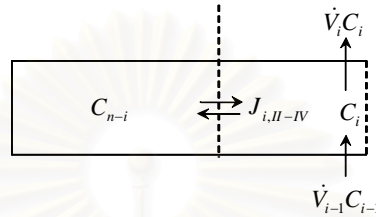
$$\frac{d}{dt} (V_i C_i) = \dot{V}_{i-1} C_{i-1} - \dot{V}_{bd} C_i - \dot{V}_i C_i - J_i A_{III} \quad (8.31)$$

เมื่อ	$C_i$	คือ	ความเข้มข้นฝุ่น ณ ตำแหน่งถัง i
	$V_i$	คือ	ปริมาตรของถัง i
	$A_{III}$	คือ	พื้นที่ของผนังไซโคลนในส่วนที่อนุภาคตกบนผนังภายในถังที่สนใจ
	$j_i$	คือ	ฟลักซ์ของอนุภาคที่ตกบนผนังไซโคลนคำนวณได้จากสมการที่ (8.15)
	$\dot{V}_i$	คือ	อัตราการไหลก๊าซ
	$\dot{V}_{bd}$	คือ	อัตราการไหลก๊าซที่เป่าทิ้ง

และ  $i$  คือ ตำแหน่งถั่งมีค่า  $n_{II} + 1$  เท่ากับ  $n_{III}$

#### 4. สมการควบคุมบริเวณที่เกิดการกำจัดอนุภาคที่ซึ่งกำขมีทิศไหลขึ้น (4)

ความเข้มขึ้นฝุ่นในบริเวณนี้สามารถคำนวณได้จากสมการควบคุมดังนี้



$$\frac{d}{dt}(V_i C_i) = \dot{V}_{i-1} C_{i-1} - \dot{V}_i C_i - J_{i,II-IV} A_{II-IV} \quad (8.32)$$

4.1 ถ้า  $w(r_i) - V_r(r_i) \geq 0$  จะคำนวณหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ได้จาก

$$J_{i,II-IV} = -D_p \frac{C_{n-i} - C_i}{r_a^* - r_i} + \{w(r_i) - V_r(r_i)\} C_{i+n} \quad (8.33)$$

4.2 ถ้า  $w(r_i) - V_r(r_i) < 0$  จะคำนวณหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ได้จาก

$$J_{i,II-IV} = -D_p \frac{C_{n-i} - C_i}{r_a^* - r_i} + \{w(r_i) - V_r(r_i)\} C_{n-1} \quad (8.34)$$

เมื่อ  $C_i$  คือ ความเข้มขึ้นฝุ่น ณ ตำแหน่งถั่ง  $i$

$V_i$  คือ ปริมาตรของถั่ง  $i$

$J_{i,II-IV}$  คือ ฟลักซ์ของอนุภาคที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 คำนวณได้จากสมการที่ (8.33) และ (8.34)

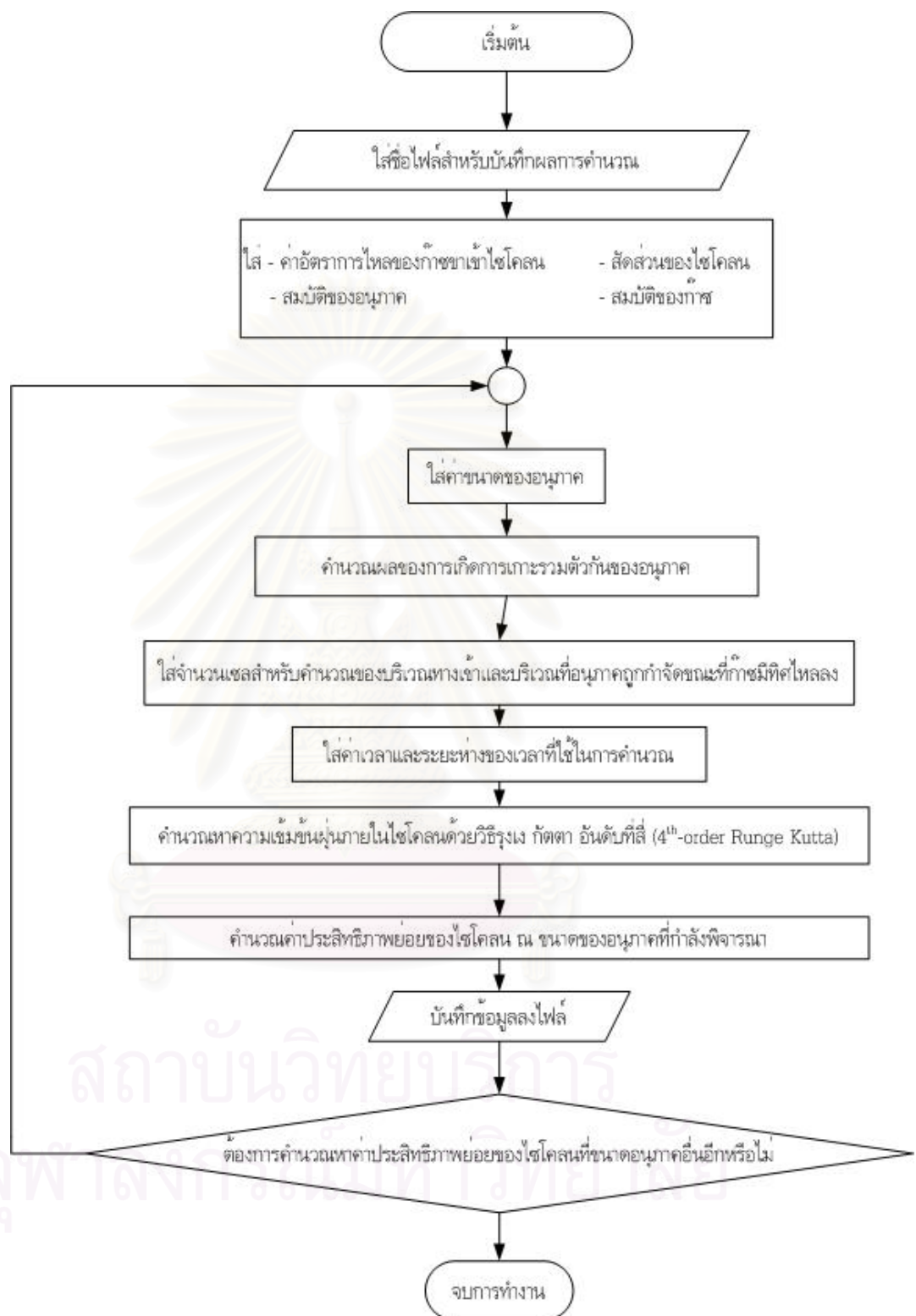
$A_{II-IV}$	คือ	พื้นที่ระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ที่อนุภาควิ่งผ่านภายในถึงที่สนใจ
$\dot{V}_i$	คือ	อัตราการไหลก๊าซ
$i$	คือ	ตำแหน่งถังซึ่งมีค่าตั้งแต่ $n_{II}+1$ ถึง $n_{total}$
$n$	คือ	$n_{total} + n_I + 3 - 2i$
$D_p$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาค
$W(r_i)$	คือ	ความเร็วของอนุภาค ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ
$V_r(r_i)$	คือ	ความเร็วก๊าซในแนวรัศมี ณ รัศมีของท่อทางออกก๊าซ

จากนั้นนำสมการอนุพันธ์ทั้งหมดไปแก้สมการหาคำตอบ โดยวิธี Runge Kutta

### 8.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 8.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยการจับฝุ่นของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสชนิดมีและไม่มีกรเปาลงที่ประดิษฐ์ขึ้น

## บทที่ 9

### ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดสอบความถูกต้องของ โปรแกรมประเมินประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ทำนายได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น กับข้อมูลการทดลองที่ได้จากเอกสาร

#### 9.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ

9.1.1 ข้อมูลอ้างอิงจากบทความ ซึ่งเขียน โดย G. Ravi, Santosh K. Gupta, and M.B. Ray

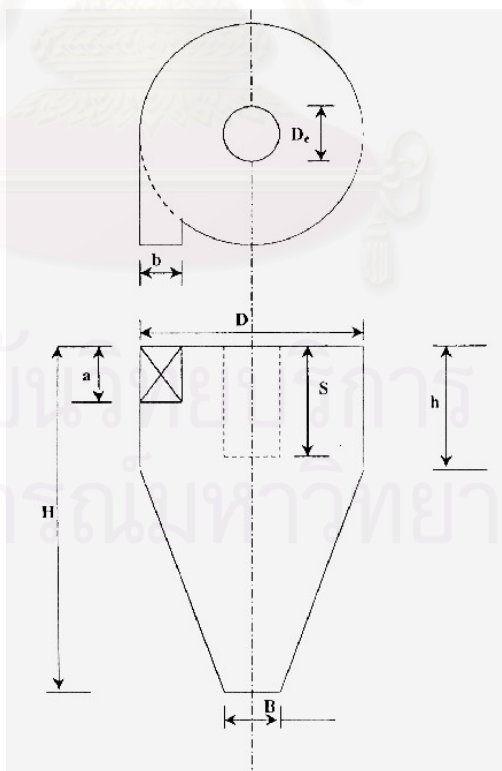
ไซโคลนที่ใช้ในการทดลองที่กล่าวถึงในบทความนี้ เป็นไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 10.1 และได้ใช้โมเดลของ Mothes และ Loffler ในการทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 รายละเอียดข้อมูลของไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง

ไซโคลน	
รายละเอียด	ค่า
จำนวนไซโคลน	1
D,m	0.4
De/D	0.5
B/D	0.375
H/d	4
S/D	0.5
h/D	1.2
a/D	0.5
b/D	0.069, 0.135

ตารางที่ 9.1 รายละเอียดข้อมูลของไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

สมบัติ และ ค่าตัวแปร	
ความหนาแน่นของก๊าซ, $\text{kg/m}^3$	1.14
ความหนืดของก๊าซ, Pa.s	$18 \cdot 10^{-6}$
ความหนาแน่นของของแข็ง $\text{kg/m}^3$	2700
สมบัติของก๊าซที่ไหลเข้า	
ความเร็วก๊าซขาเข้า, m/s	21.7, 11
อัตราการไหลก๊าซขาเข้า, Q, $\text{m}^3/\text{s}$	0.1194
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางมัธยฐานโดยมวลของอนุภาค, $D_p$ , micrometer	3.55
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการกระจายขนาดของอนุภาค	0.21



รูปที่ 9.1 ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ใช้ในการทดลองของ G.Ravi และคณะ

G. Ravi และคณะได้เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้จากโมเดลของ Mothes และ Loffler กับผลการทดลองที่ความเร็วก๊าซ 21.7 และ 11 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 9.2 และ 9.3

ตารางที่ 9.2 ค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ความเร็วก๊าซเข้า 21.7 m/s

ผลการทดลอง		ผลที่ได้จากโมเดล	
เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพการจับฝุ่น (-)	เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพการจับฝุ่น (-)
1.00	0.15	2.00	0.23
1.50	0.26	3.00	0.6
3.50	0.86	3.50	0.86
4.25	0.98	4.25	0.98
5.00	0.98	5.00	0.98
5.50	0.98	5.50	0.98
12.50	0.95	10.00	1.00
13.00	0.96	12.00	1.00
		14.00	1.00



ตารางที่ 9.3 ค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 m/s

ผลการทดลอง		ผลที่ได้จากโมเดล	
เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพการจับฝุ่น (-)	เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพการจับฝุ่น (-)
1.00	0.12	2.00	0.07
1.50	0.18	4.00	0.35
3.00	0.32	6.00	0.92
3.50	0.54	8.00	0.98
4.25	0.72	10.00	0.99
5.00	0.84	12.00	1.00
5.50	0.94	14.00	1.00
6.25	0.98		
7.00	0.99		
7.50	1.00		
8.25	1.00		
9.00	1.00		
9.50	1.00		
10.25	1.00		
11.00	1.00		
11.50	1.00		
12.50	1.00		
13.00	1.00		

### 9.1.2. ข้อมูลอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของ H. Mothes (1988)

มีรายละเอียดดังนี้

- อัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้า :  $0.04861 \text{ m}^3/\text{s}$
- ความกว้างของทางเข้า :  $0.03 \text{ m}$
- ความสูงของทางเข้า :  $0.1 \text{ m}$
- รัศมีของไซโคลน :  $0.095 \text{ m}$
- รัศมีของฝุ่นขาออก :  $0.037 \text{ m}$
- ความเข้มข้นของอนุภาคขาเข้า :  $0.0005 \text{ kg/m}^3$
- มุมของส่วนกรวยของไซโคลน (cone angle):  $7.5^\circ$
- รัศมีของท่อทางออกก๊าซ :  $0.037 \text{ m}$
- ความสูงของไซโคลน :  $0.522 \text{ m}$
- ความยาวของท่อทางออกก๊าซ :  $0.132 \text{ m}$
- ความหนาแน่นของอนุภาค :  $2700 \text{ kg/m}^3$

H. Mothes ได้เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่ได้จากโมเดลที่ประดิษฐ์ขึ้นกับผลการทดลองที่ความเร็วก๊าซ 16 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 9.4

ตารางที่ 9.4 ผลการทดลองค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่น  
ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 16 m/s

เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ประสิทธิภาพการจับฝุ่น (-)
0.50	0.01-0.03
1.00	0.26
2.00	0.80
4.00	0.97

ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนจำเป็นจะต้องเลือกค่าปริมาณก๊าซที่มีการไหลผ่านระหว่างบริเวณที่มีการกำจัดอนุภาคฝุ่นของไซโคลนที่เหมาะสม รวมทั้งเลือกค่าจำนวนถังทั้งหมดที่เหมาะสมในการคำนวณ อนึ่ง ในงานวิจัยนี้เลือกเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 100 วินาที และใช้ค่าระยะห่างของเวลา (step size) เท่ากับ 0.001 วินาที

## 9.2 การเลือกค่าปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านบริเวณที่ 2 และ 4 ที่เหมาะสม

เนื่องจากในโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยไซโคลนที่ประดิษฐ์ขึ้น จะแบ่งบริเวณภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. บริเวณที่ก๊าซไหลเข้าไซโคลน (Region of Entry)
2. บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลง (Region of Particle Removal with Downward-Directed Flow)
3. บริเวณที่เกิดการหลุดลอยของอนุภาคกลับขึ้นมาใหม่ (Region of Particle Removal Above the Outlet for the Dust)
4. บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้น (Region of Particle Removal with Upward-Directed Flow)

นอกจากนี้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะมีการยอมให้ก๊าซไหลผ่านระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ดังนั้นจึงได้เลือกค่าปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านระหว่างสองบริเวณดังกล่าวนี้ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพย่อยการเก็บอนุภาคฝุ่นได้ใกล้เคียงผลการทดลองมากที่สุด

ในขั้นตอนนี้จะเลือกอนุภาคที่ความเร็วขาเข้า 11 m/s และใช้จำนวนถังในแต่ละบริเวณเป็น 50 : 100 : 1 : 100

จากผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 9.1 - 9.4 พบว่า เมื่อกำหนดให้ปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านระหว่างบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลงและบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้นมีค่าเป็น 100% ของปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าสู่ไซโคลนจะให้ค่าประสิทธิภาพย่อยที่ใกล้เคียงกับค่าจากเอกสารอ้างอิงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่กำหนดให้ปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านระหว่างบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลลงและบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้นมีค่าเป็น 90% และ 5% ของปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าสู่ไซโคลน

สรุปได้ว่าการไหลและการกำจัดอนุภาคภายในไซโคลนจะมีการกระจายความเข้มข้นฝุ่นภายในไซโคลนดังนี้คือ เมื่อมีฝุ่นถูกป้อนเข้าสู่ไซโคลน ฝุ่นเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขาเข้า (1) จากนั้นจะเคลื่อนที่ลงเข้าสู่บริเวณการกำจัดอนุภาคที่มีทิศการไหลลง (2) ซึ่งความเข้มข้นฝุ่นในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากปริมาณฝุ่นที่ไหลกลับเข้ามาจากบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยมีทิศการไหลขึ้น (4) จากนั้นเมื่อฝุ่นเคลื่อนที่จนถึงท่อทางออกของฝุ่น ฝุ่นส่วนหนึ่งถูกกำจัดลงถึงเก็บฝุ่น ขณะที่ฝุ่นบางส่วนจะไหลวนย้อนกลับขึ้นมาเข้าสู่บริเวณการกำจัดอนุภาคที่มีทิศการไหลขึ้น ความเข้มข้นฝุ่นในบริเวณนี้จะลดลงเรื่อยๆ ขณะที่ก๊าซไหลออกทางท่อออกของก๊าซ

### 9.3. การเลือกจำนวนถังที่เหมาะสมในการคำนวณ

ในขั้นตอนนี้จะทำการเลือกจำนวนถังที่เหมาะสมในการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลของอนุภาคที่ความเร็วก๊าซขาเข้าดังแสดงในตารางที่ 9.1 และ 9.2

เนื่องจากโมเดลจะแบ่งพื้นที่ภายในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วน ดังนั้นจำนวนถังที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปตามบริเวณภายในไซโคลนด้วย สำหรับโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะกำหนดให้จำนวนถังในบริเวณที่เกิดการหลุดลอยของอนุภาคกลับขึ้นมาใหม่เท่ากับหนึ่งเสมอ และจำนวนถังของบริเวณที่ก๊าซไหลลงจะต้องมีค่าเท่ากับจำนวนถังของบริเวณที่ก๊าซไหลขึ้นเสมอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกจำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละบริเวณแบ่งเป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 9.4

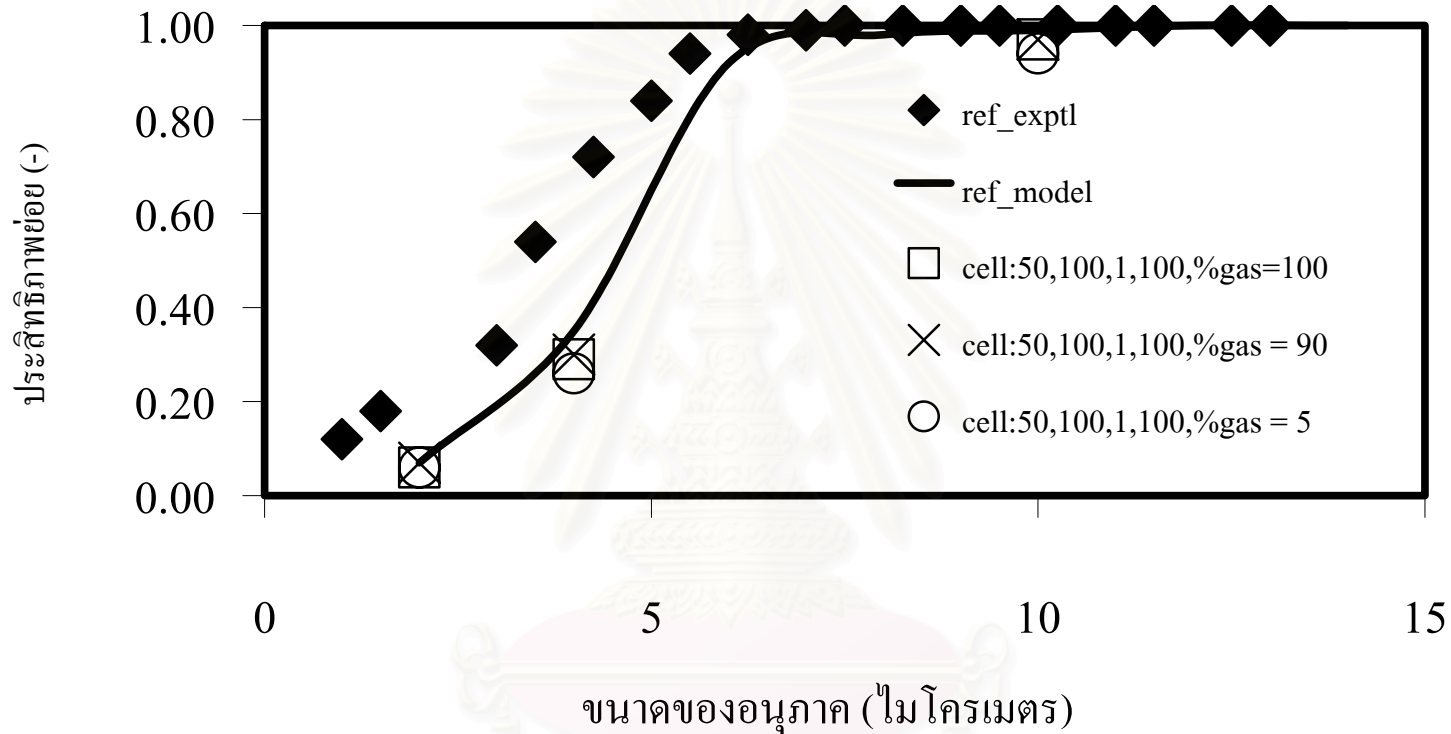
ตารางที่ 9.4 จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละบริเวณภายในไซโคลน

กรณี	บริเวณที่ก๊าซไหลเข้า ไซโคลน	บริเวณที่ก๊าซไหลลงและ ก๊าซไหลขึ้น	จำนวนถังทั้งหมด
1	50	100	251
2	20	40	101
3	5	10	26

จากผลการคำนวณพบว่า จำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 26 ถัง (กรณี 3) ก็ให้ค่าประสิทธิภาพย่อยใกล้เคียงหรือเท่ากับกับกรณีใช้จำนวนถังทั้งหมดเท่ากับ 101 ถัง และ 251 ถัง ซึ่งแสดงว่าการไหลภายในโมเดลไซโคลนจะเป็นแบบ Plug flow ดังแสดงในรูปที่ 9.2, 9.3 และ 9.4 ดังนั้นในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยของการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยไซโคลนจะเลือกจำนวนถังในการคำนวณสำหรับบริเวณที่ก๊าซไหลเข้า : บริเวณที่ก๊าซไหลลง : บริเวณที่อนุภาคเกิดการหลุดลอยกลับมาใหม่ : บริเวณที่ก๊าซไหลขึ้น เป็น 5 : 10 : 1 : 10

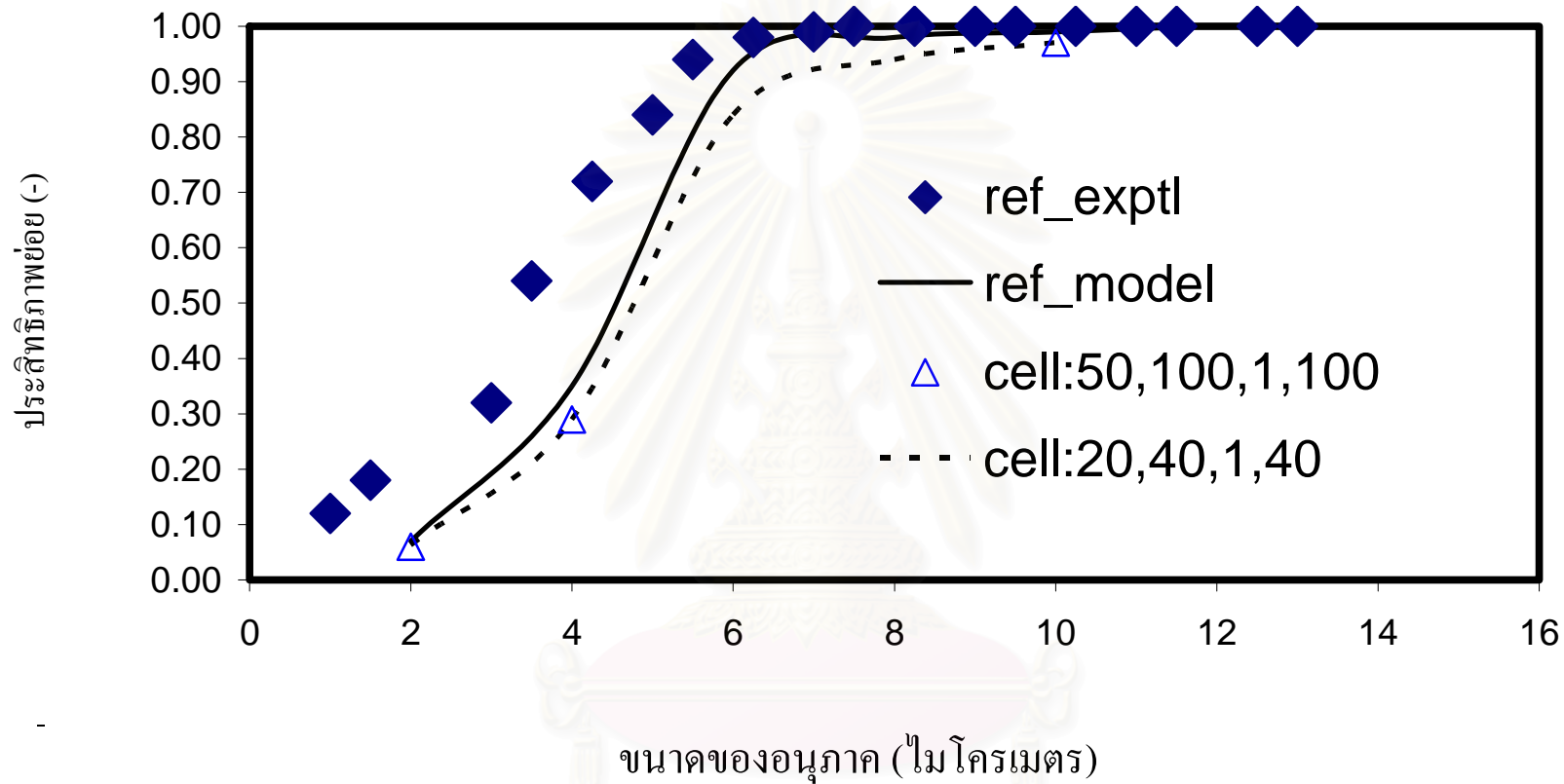
จากข้อมูลในหัวข้อ 9.2 และ 9.3 จะคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยจำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 26 ถัง และกำหนดปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านบริเวณที่ 2 และ 4 เป็น 100% ของปริมาณก๊าซที่ไหลเข้ามาทั้งหมดสำหรับไซโคลนแบบที่ไม่มีการเป่าลง (blowdown)

อนึ่ง เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเปรียบเทียบกับค่าจากเอกสารอ้างอิงพบว่า โปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้ต่ำกว่าความเป็นจริง สาเหตุน่าจะเกิดจากการที่โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นไม่ได้คำนึงผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและผลของความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลดังกล่าว ด้วย

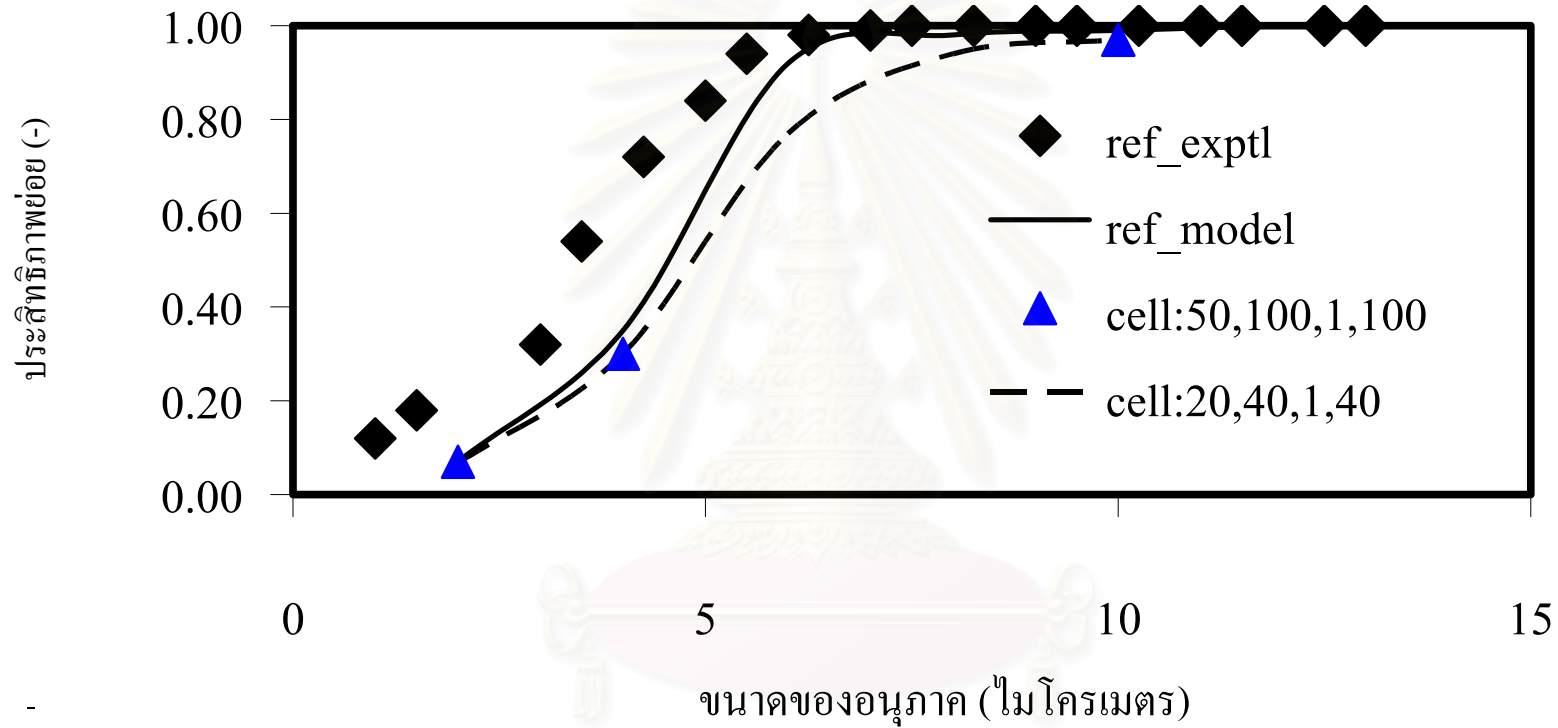


รูปที่ 9.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่าร้อยละอัตราการไหลของ ก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 เมตร/วินาทีและใช้จำนวนถังในการคำนวณทั้งหมดเป็น 251 ถัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

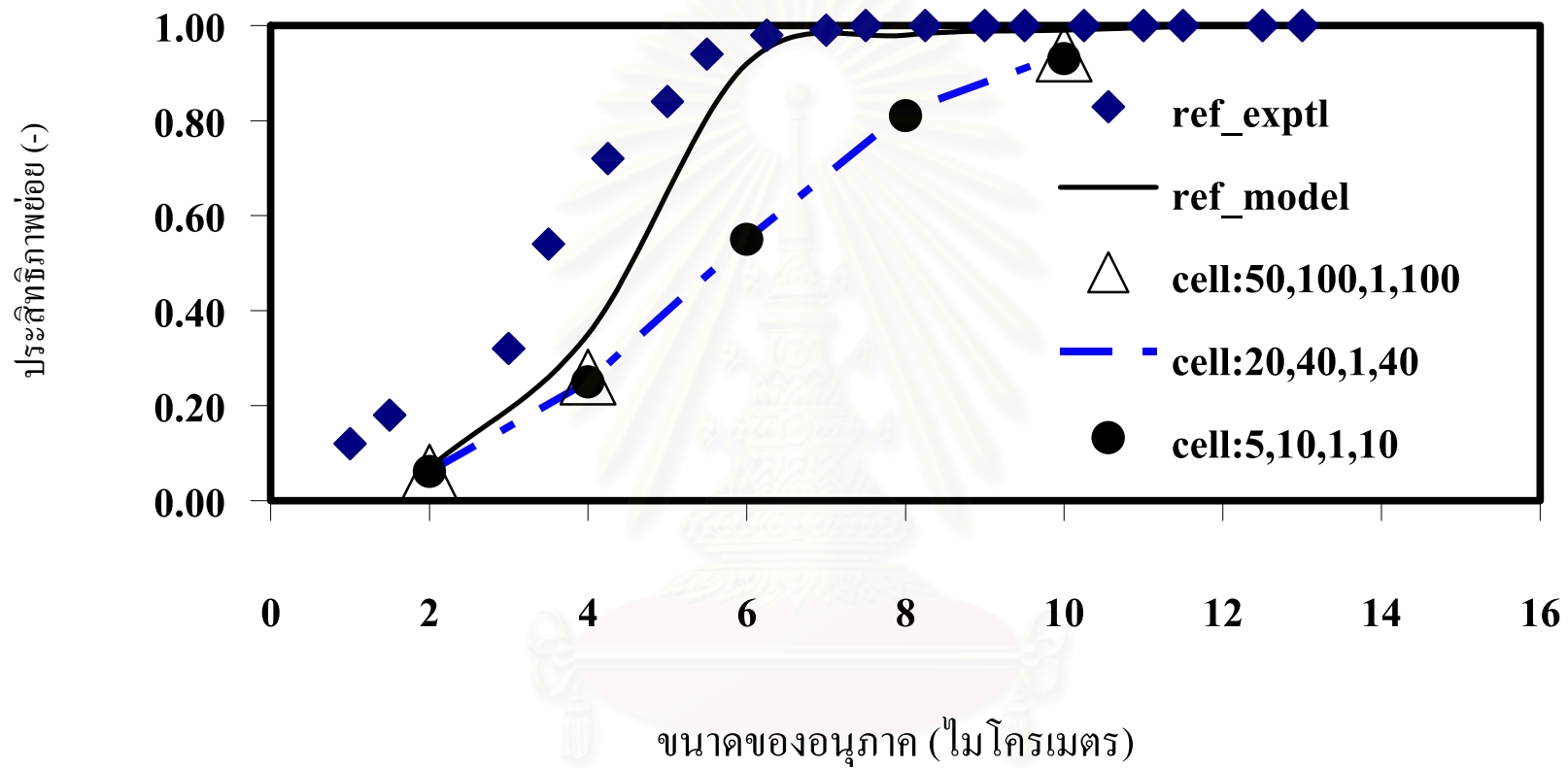


รูปที่ 9.3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่าจำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251 และ 101 ถัง ที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการไหลของ ก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากับ 100



รูปที่ 9.4 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่าจำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251 และ 101 ถัง ที่ความเร็วก๊าซเข้า 11 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการไหลของ ก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากับ 90





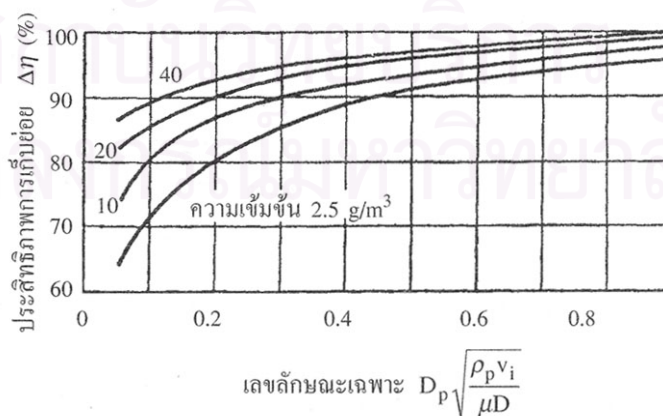
ปที่ 9.5 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับค่าที่ได้จากผลการทดลองและผลจากโปรแกรมของ G.Ravi และคณะ (2000) เมื่อเปลี่ยนค่าจำนวนถังที่ใช้ในการคำนวณเป็น 251 101 และ 26 ถึง ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการไหลของ ก๊าซที่แลกเปลี่ยนระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากับ 5

#### 9.4 อิทธิพลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) ต่อค่าประสิทธิภาพย่อย

ในส่วนแรกของหัวข้อนี้ จะขอกล่าวถึงนิยามของคำศัพท์ที่จะใช้ในการอธิบายผลการคำนวณดังนี้

- **ขนาดของอนุภาค** คือ ขนาดของอนุภาคที่มีความเร็วของการตกเท่ากับค่าความเร็วของอนุภาคที่สนใจและมีความหนาแน่นเท่ากับค่าความหนาแน่นแท้จริงของวัตถุที่ประกอบขึ้นเป็นอนุภาค
- **ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ( $\alpha$ )** คือ ตัวคูณสำหรับชดเชยขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าไซโคลนที่สูง
- **ขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผล (Effective size)** คือ ขนาดของอนุภาคที่ได้คำนึงผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นไว้ด้วยแล้ว โดยมีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดของอนุภาคที่สนใจกับตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ (2544) ได้กล่าวถึงผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลน ดังนี้ ถ้าความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซสกปรกมีสูงกว่าค่าๆหนึ่งแล้ว อนุภาคฝุ่นบางส่วนจะตกตัวบนผนังของไซโคลนได้ก่อนที่จะได้รับแรงกระทำจากแรงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนจะเพิ่มค่าอย่างเด่นชัด รูปที่ 9.6 แสดงตัวอย่างหนึ่งของผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคต่อประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่น



รูปที่ 9.6 ตัวอย่างของผลของความเข้มข้นของสารอนุภาคในก๊าซต่อประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลน

นอกจากนี้ในความเป็นจริงแล้วอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดการเกาะรวมตัวกัน (Agglomeration) ได้ค่อนข้างดี ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นในหัวข้อ 9.2 และ 9.3 พบว่าโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้ต่ำกว่าความเป็นจริง โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 4 -5 ไมโครเมตร ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นไม่ได้พิจารณาผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค ตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าที่มีค่าสูง ดังนั้นในหัวข้อนี้ จะพิจารณาการชดเชยผลดังกล่าวนี้ ซึ่งจะอธิบายในรูปของผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) ของอนุภาค

ผู้ทำวิจัยได้ทดลองสุ่มใส่ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ( $\alpha$ ) เพื่อคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผล ดังแสดงในตารางที่ 9.5 และรูปที่ 9.7 พบว่า ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันยังมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีความเร็วก๊าซขาเข้าเพิ่มขึ้นแล้ว ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจะลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะเกิดการชนกัน เกาะรวมตัวกันยังมีน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อใช้ค่าขนาดของอนุภาคเป็นขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่ใช้ค่า  $\alpha$  ในการคำนวณกับกรณีที่ใช้ค่าขนาดของอนุภาคเป็นขนาดของอนุภาคที่ป้อนเข้าโปรแกรม พบว่าค่าประสิทธิภาพย่อยที่ใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลในการคำนวณสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้อย่างถูกต้อง เมื่อพิจารณาผลของการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคและผลของความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าดังแสดงในรูปที่ 9.8- 9.10

จากตารางที่ 9.5 พบว่า เมื่อชนิดอนุภาคเดียวกัน มีความเร็วก๊าซขาเข้าเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วก๊าซขาเข้าที่ต่ำลง ดังนั้นจึงได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคที่กำลังพิจารณาและความเร็วก๊าซขาเข้าต่อตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ในรูปของสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ดังแสดงในสมการที่ (9.1) ซึ่งอยู่ในรูปแบบไร้หน่วย โดยขนาดของอนุภาคไร้หน่วยที่นำมาคำนวณจะอยู่ในรูปของขนาดของอนุภาคที่สนใจหารด้วยขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดสำหรับคิดผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ในสมการนี้ได้กำหนดให้มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ต้องคำนึงถึงผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันเท่ากับ 6 ไมโครเมตร ส่วนเทอมของความเร็วก๊าซขาเข้าจะอยู่ในรูปความเร็วก๊าซขาเข้าที่สนใจหารด้วยความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ย โดยทั่วไปแล้วจะนิยมให้ความเร็วก๊าซไหลเข้าในไซโคลนในช่วง 10-20 เมตร/วินาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ย 15 เมตร/วินาที

สมการ (9.1) ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่เกิดการเกาะรวมตัวกันได้โดย ขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลจะเป็นผลคูณระหว่างขนาดของอนุภาคที่สนใจคูณด้วยตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน

$$\alpha' = a + b \times d'_p + c \times v'_i + d \times d_p'^2 + e \times d'_p \times v'_i + f \times v_i'^2 \quad (9.1)$$

เมื่อ $d'_p$	คือ ขนาดของอนุภาคไร้มิติซึ่งได้จากการหารขนาดของอนุภาคที่สนใจด้วยขนาดของอนุภาคใหญ่สุด (-)
$v'_i$	คือ ความเร็วไร้มิติซึ่งได้จากการหารความเร็วก๊าซขาเข้าด้วยความเร็วก๊าซเฉลี่ย (-)
a,b,c,d,e,f	คือ สัมประสิทธิ์จากการทดลอง (-)
$\alpha$	คือ ตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค (-)

เนื่องจากอนุภาคที่นำมาอ้างอิงในหัวข้อ 9.1.1 และ 9.1.2 มีสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์ในรูปแบบ (9.1) ดังนี้

$$\alpha' = 3.200 + 2.996 \times d'_p - 0.946 \times v'_i + 0.717 \times d_p'^2 + 1.062 \times d'_p \times v'_i - 0.062 \times v_i'^2 \quad (9.2)$$

โดยมีค่า  $R^2 = 0.707$

และ ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5-6 ไมโครเมตร

ความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

เมื่อเปรียบเทียบตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลอง สุ่มค่าและค่าที่ได้จากสมการ(9.2) พบว่า ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันที่ได้จากสมการ (9.2) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังในรูปที่ 9.7

จากสมการที่ (9.2) สามารถนำมาคำนวณหาค่าขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงแล้วนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยในการจับฝุ่นของไซโคลนได้ ดังแสดงในรูปที่ 9.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการนำสมการที่ (9.2) ประเมินขนาดของอนุภาคใหม่ที่เกิดการเกาะรวมตัวกัน พบว่าสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

สรุปได้ว่าโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของการจับฝุ่นของไซโคลนแบบที่มีการเป่าลงได้ค่อนข้างน่าเชื่อถือ

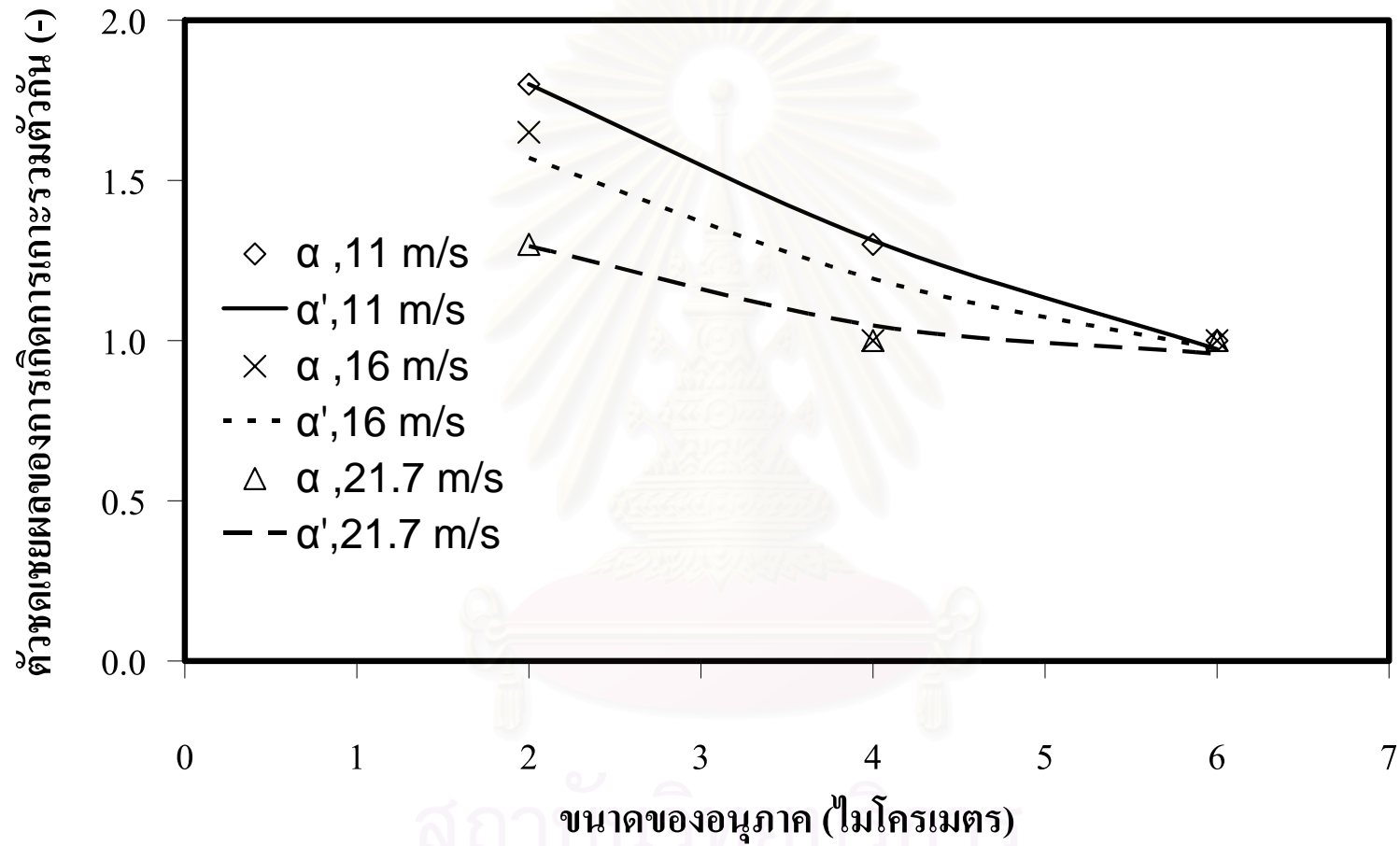


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

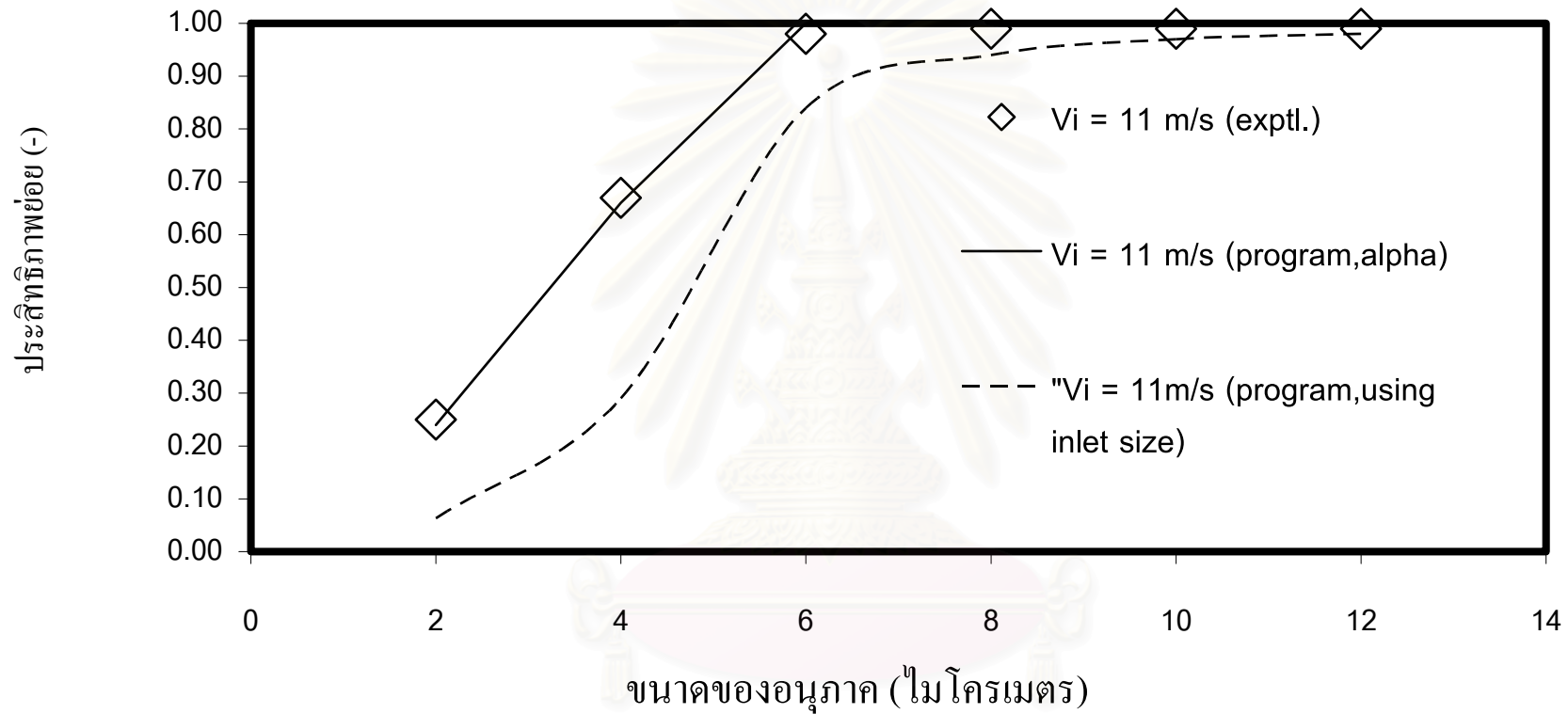
ตารางที่ 9.5 ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคเอกสารอ้างอิง 9.1

ขนาดของอนุภาค (ไมครอน)	$\alpha$ (-)			$\alpha'$ (-)		
	$V_i = 11\text{m/s}$	$V_i = 16\text{ m/s}$	$V_i = 21.7\text{ m/s}$	$V_i = 11\text{m/s}$	$V_i = 16\text{ m/s}$	$V_i = 21.7\text{ m/s}$
2	1.8	1.6	1.3	1.8	1.6	1.3
4	1.4	1.0	1.0	1.3	1.2	1.0
6	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

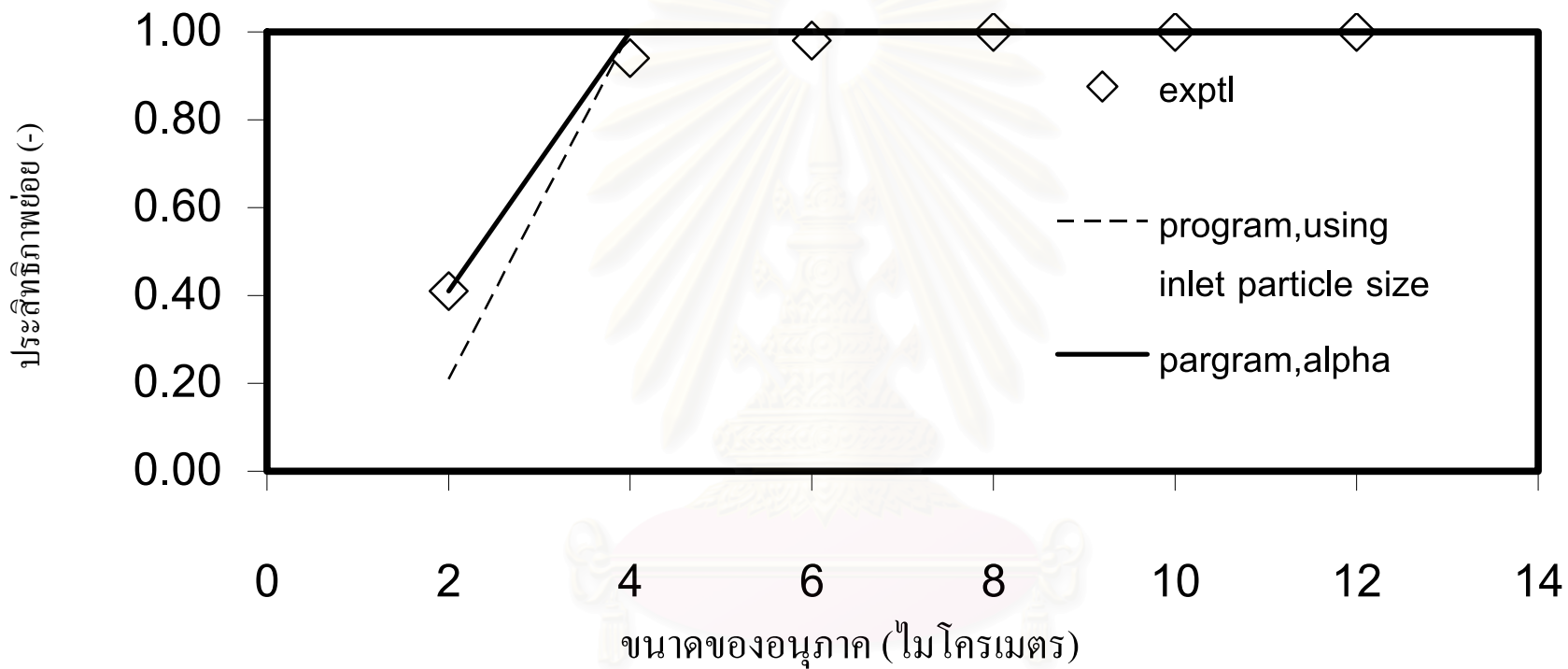


รูปที่ 9.7 เปรียบเทียบตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลองสุ่มค่า ( $\alpha$ ) และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )

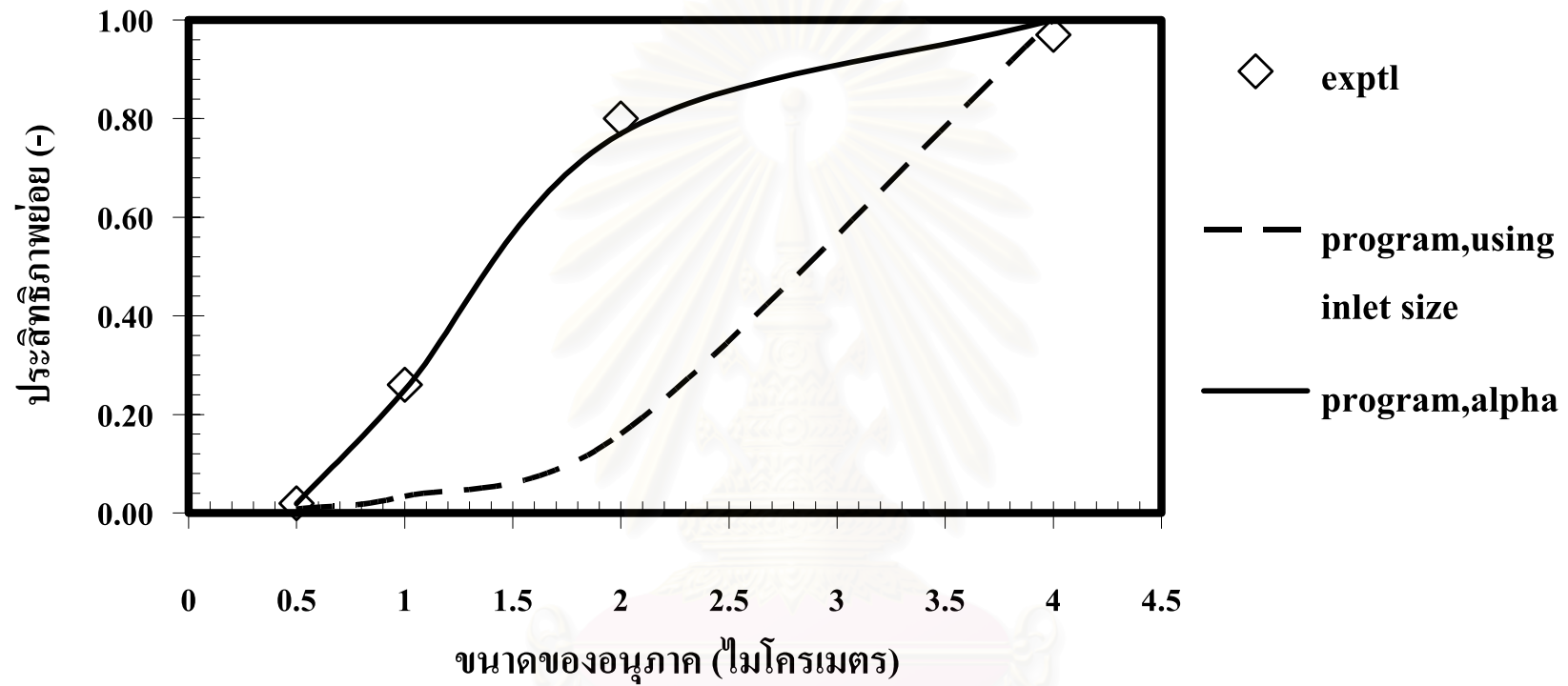


รูปที่ 9.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ G. Ravi ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 m/s ของไซโคลนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha$  และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ

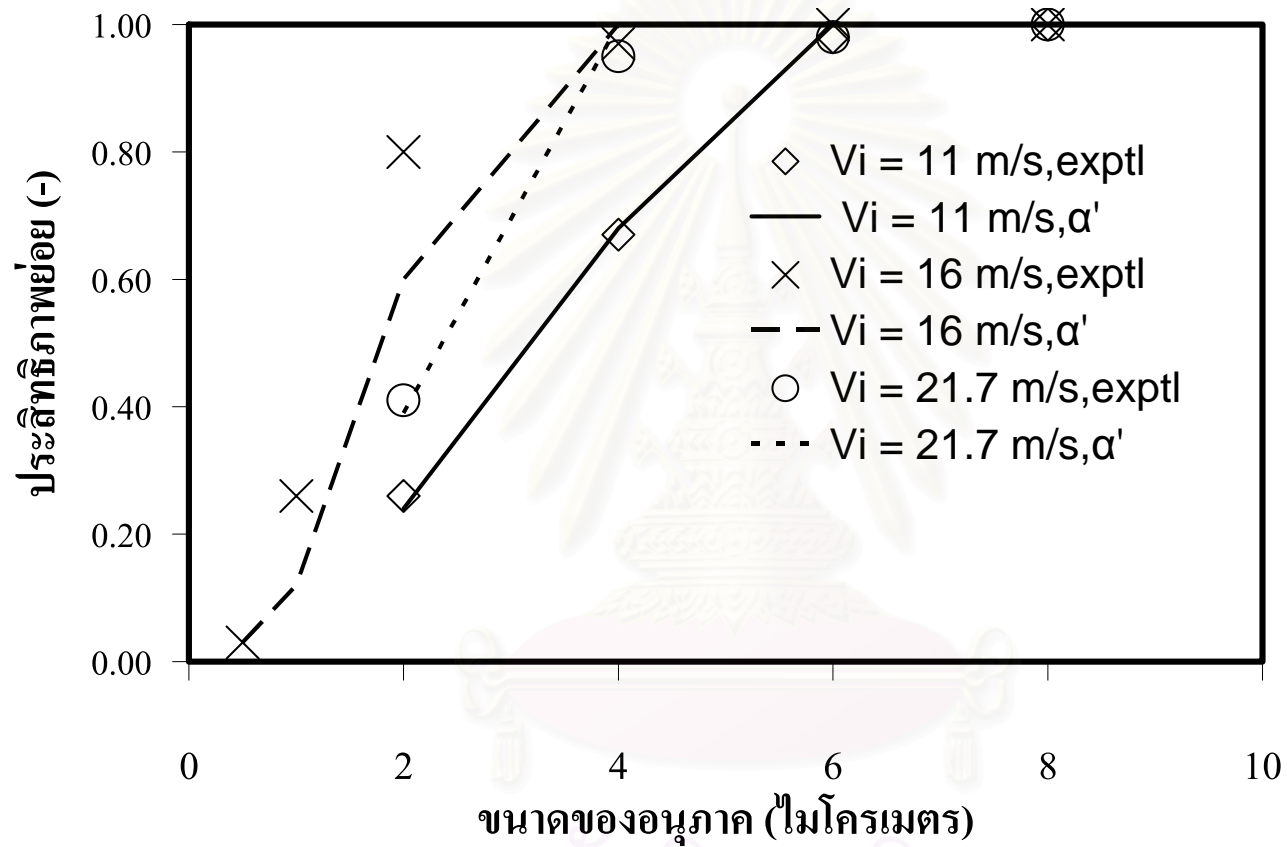




รูปที่ 9.9 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ G. Ravi ที่ความเร็วก๊าซเข้า 21.7 m/s ของไซโคลนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha$  และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ



รูปที่ 9.10 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ Mothes ที่ความเร็วก๊าซเข้า 16 m/s ของไซโคลนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha$  และค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคที่สนใจ



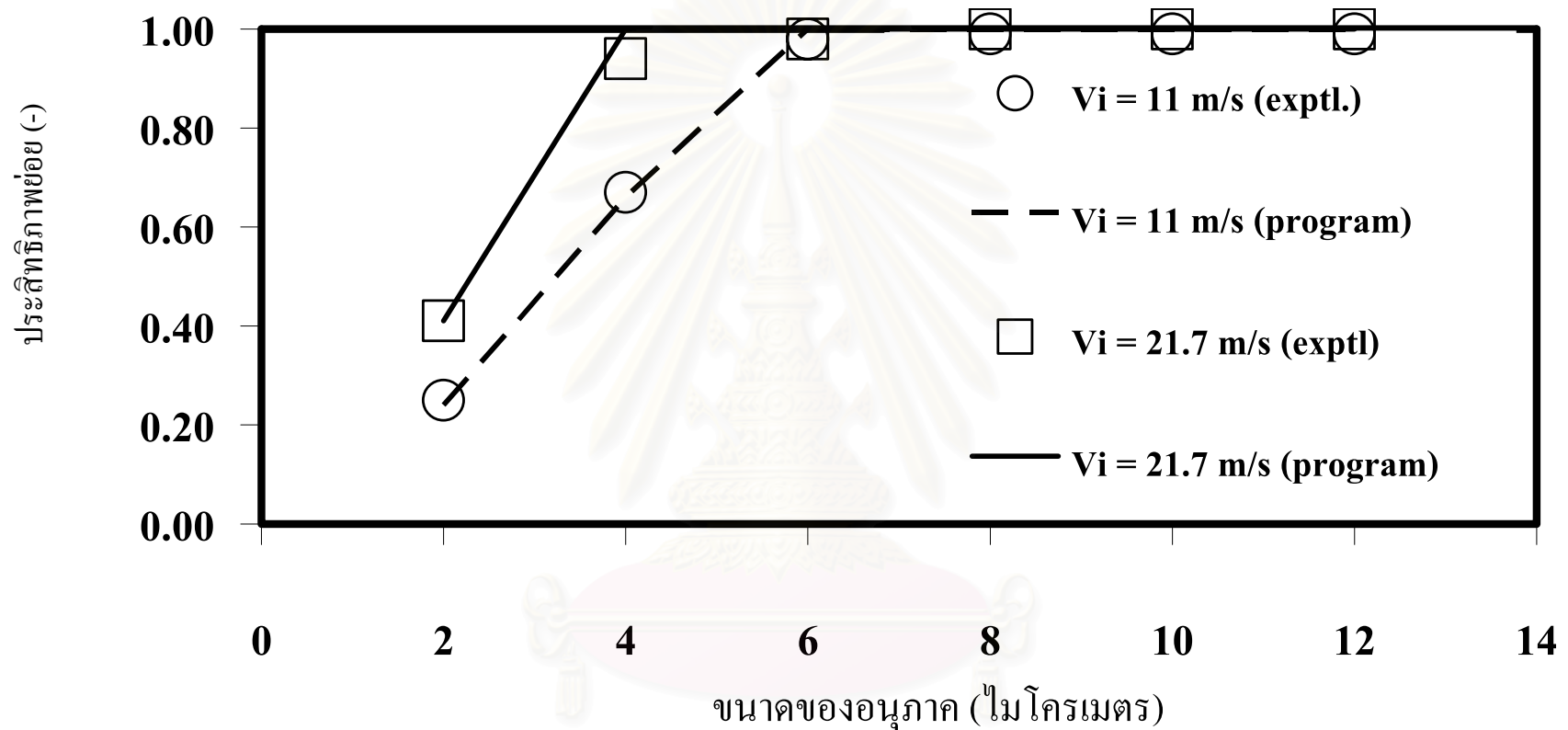
รูปที่ 9.11 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่น ของไซโคลนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับ ค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha'$

### 9.5 อิทธิพลของความเร็วก๊าซขาเข้าต่อค่าประสิทธิภาพย่อย

เมื่อความเร็วก๊าซขาเข้าสูงขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งโปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนที่ประดิษฐ์ก็สามารถทำนายได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 9.12



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 9.12 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นในชุดการทดลองของ G. Ravi ที่ความเร็วก๊าซขาเข้า 11 และ 21.7 m/s ของไซโคลนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับ ค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากค่า  $\alpha$

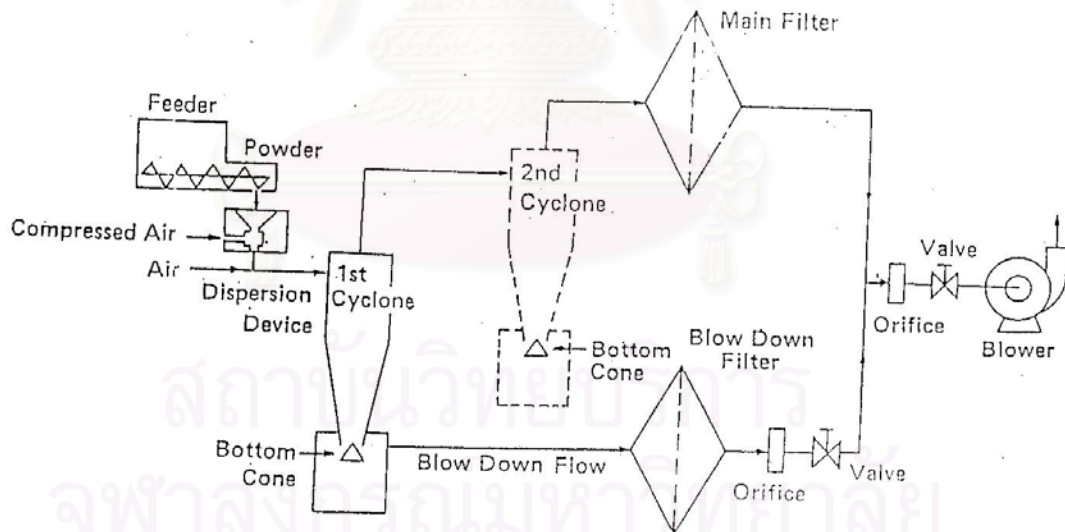
## บทที่ 10

### ผลการทำนายค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลนแบบมีการเป่าลง (Blowdown)

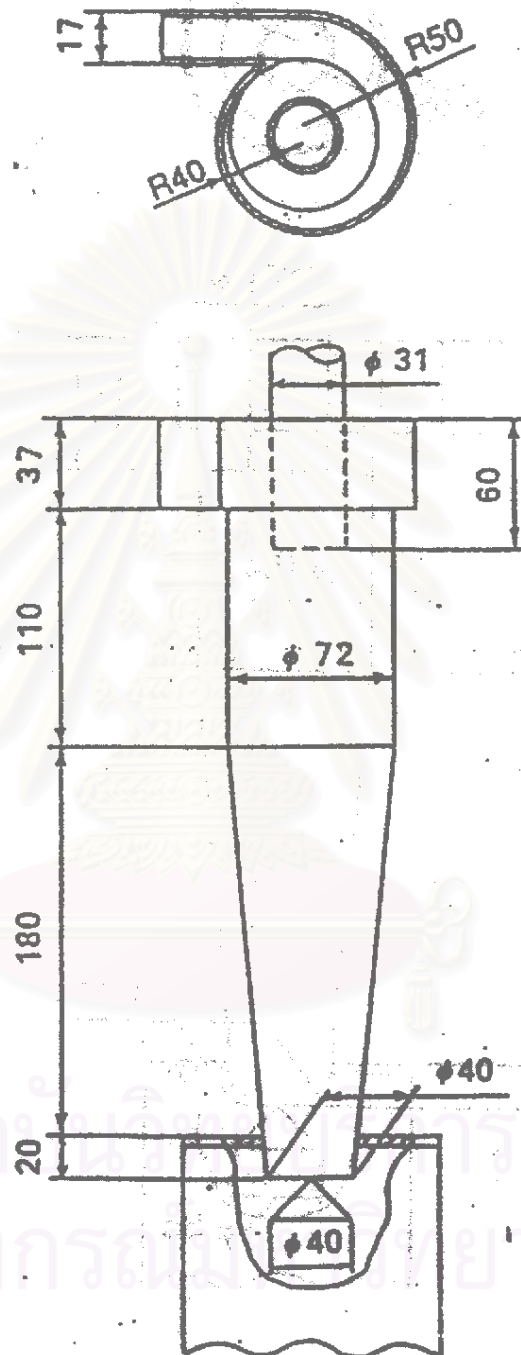
#### 10.1 อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ

อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงมาจากบทความเรื่อง ผลการทดลองการจับฝุ่นด้วยไซโคลนของ Yuki Yoshi Yamada ซึ่งแปลโดย ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล จากเอกสารสัมมนาเรื่องเครื่องคัดแยกและเครื่องคัดแยกของแข็งออกจากของเหลว จัดโดย สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) (2545) โดยมีรายละเอียดชุดการทดลองดังนี้

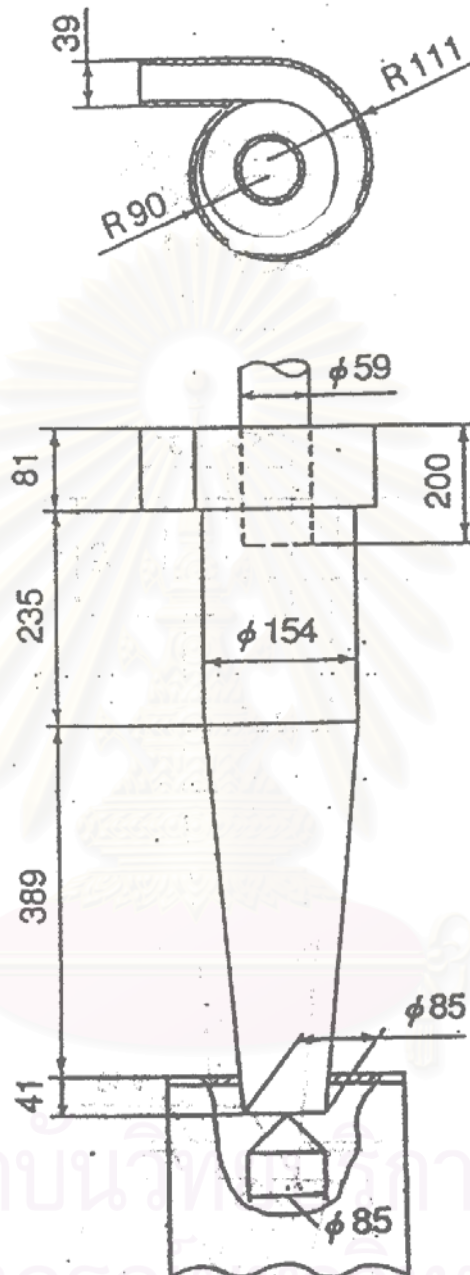
Yamada ได้สร้างชุดการทดลองไซโคลนสำหรับจับฝุ่นละเอียดระดับไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10.1 ชุดการทดลองประกอบไปด้วย 2 กรณีคือ ถ้าใช้ไซโคลนแบบไหลเขาในแนวสัมผัสเพียงชั้นตอนเดียวจะเรียกว่า Type I ส่วนในกรณีที่ใช้ไซโคลนแบบไหลเขาในแนวสัมผัส 2 ชั้นตอนจะเรียกชื่อว่า Type II หนึ่งในกรณีของ Type II จะทำการเป่าลงเฉพาะไซโคลนตัวแรกเท่านั้น ขนาดของไซโคลนที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 10.2 และ 10.3



รูปที่ 10.1 ชุดการทดลองไซโคลนสำหรับจับฝุ่นระดับไมครอน



รูปที่ 10.2 ไซโคลนขนาด 70 mm



รูปที่ 10.3 ไซโคลนขนาด 150 mm



อนุภาคที่ใช้ในการทดลองได้แก่

1. อนุภาค  $Al_2O_3$  #8000 โดยทำการทดลองที่สภาวะ

1.1 ทดลองด้วยไซโคลนกรณี Type I ขนาด 70 mm กำหนดให้%การเป่าลง (%blowdown) = 15% และเปลี่ยนความเร็วก๊าซขาเข้าเป็น

1.1.1 ความเร็วก๊าซขาเข้า 30 เมตร/วินาที

1.1.2 ความเร็วก๊าซขาเข้า 20 เมตร/วินาที

2. อนุภาค  $CaCO_3$  JIS No.17 โดยทำการทดลองที่สภาวะ

2.1 ทดลองด้วยไซโคลนกรณี Type I ขนาด 150 mm ดังนี้

2.1.1 %การเป่าลง(%blowdown) = 0, ความเร็วก๊าซขาเข้า 29 เมตร/วินาที

2.1.2 %การเป่าลง(%blowdown) = 10, ความเร็วก๊าซขาเข้า 29 เมตร/วินาที

2.1.3 %การเป่าลง(%blowdown) = 15, ความเร็วก๊าซขาเข้า 29 เมตร/วินาที

2.1.4 %การเป่าลง(%blowdown) = 15, ความเร็วก๊าซขาเข้า 20 เมตร/วินาที

ทุกข้อมูลการทดลองจะคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนโดยใช้ข้อมูลการคำนวณเหมือนกับกรณีไม่มีการเป่าลง ดังนี้

- จำนวนเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณ 100 วินาที
- ระยะห่างของเวลามีค่า 0.001 วินาที
- จำนวนถังในบริเวณที่ 1:2:3:4 มีค่า 5:10:1:10

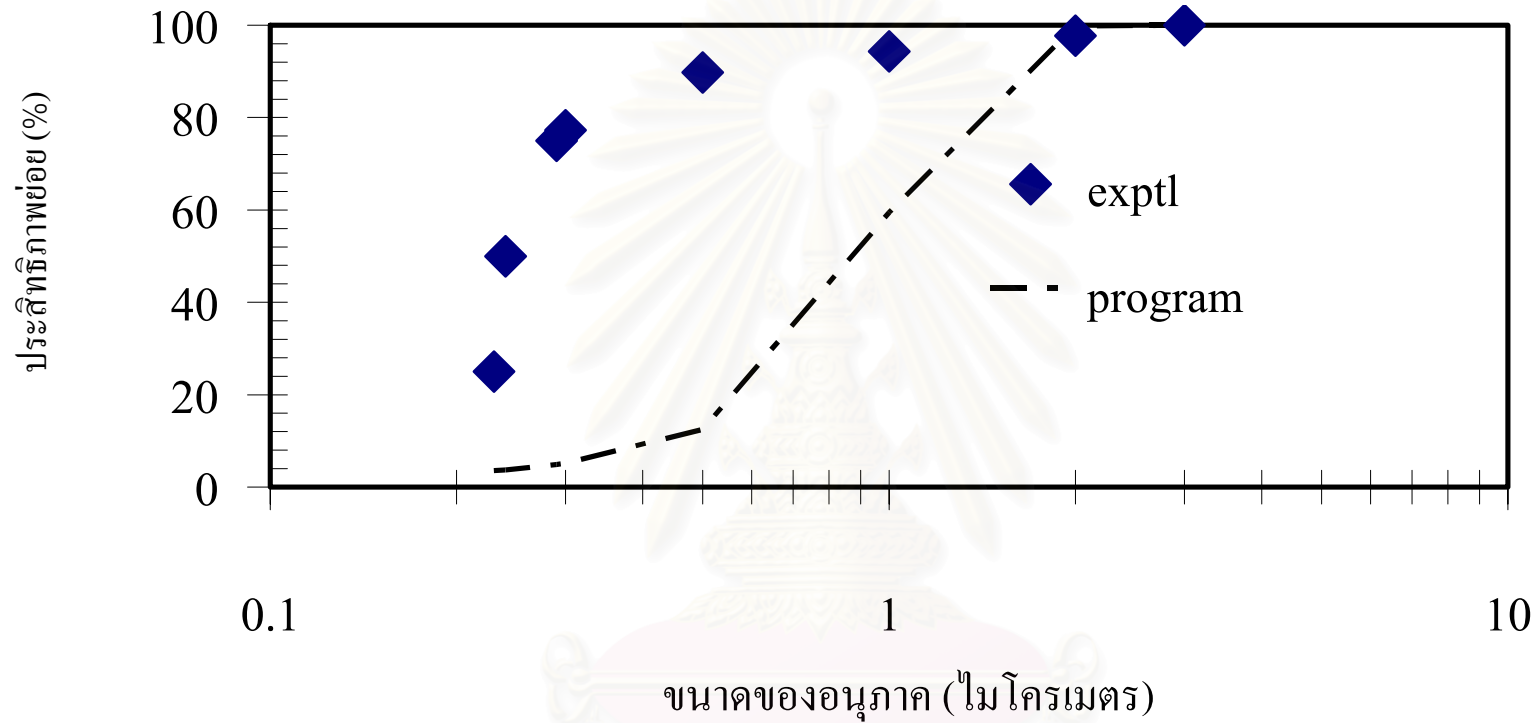
## 10.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลนแบบที่มีการเป่าลง(blowdown)ที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์กับค่าจากข้อมูลการทดลอง

จากผลการทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น พบว่าโปรแกรมจะทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้ต่ำกว่าผลการทดลองสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตรทุกชนิดอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 10.4 – 10.9

สาเหตุที่โปรแกรมทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้ต่ำกว่าผลการทดลองสำหรับอนุภาคขนาดเล็กเกิดจากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นไม่คำนึงถึงผลของความเข้มข้นฝุ่นสูงต่อค่าประสิทธิภาพย่อย และอัตราการระเหว่งอนุภาค) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลดังกล่าวด้วย

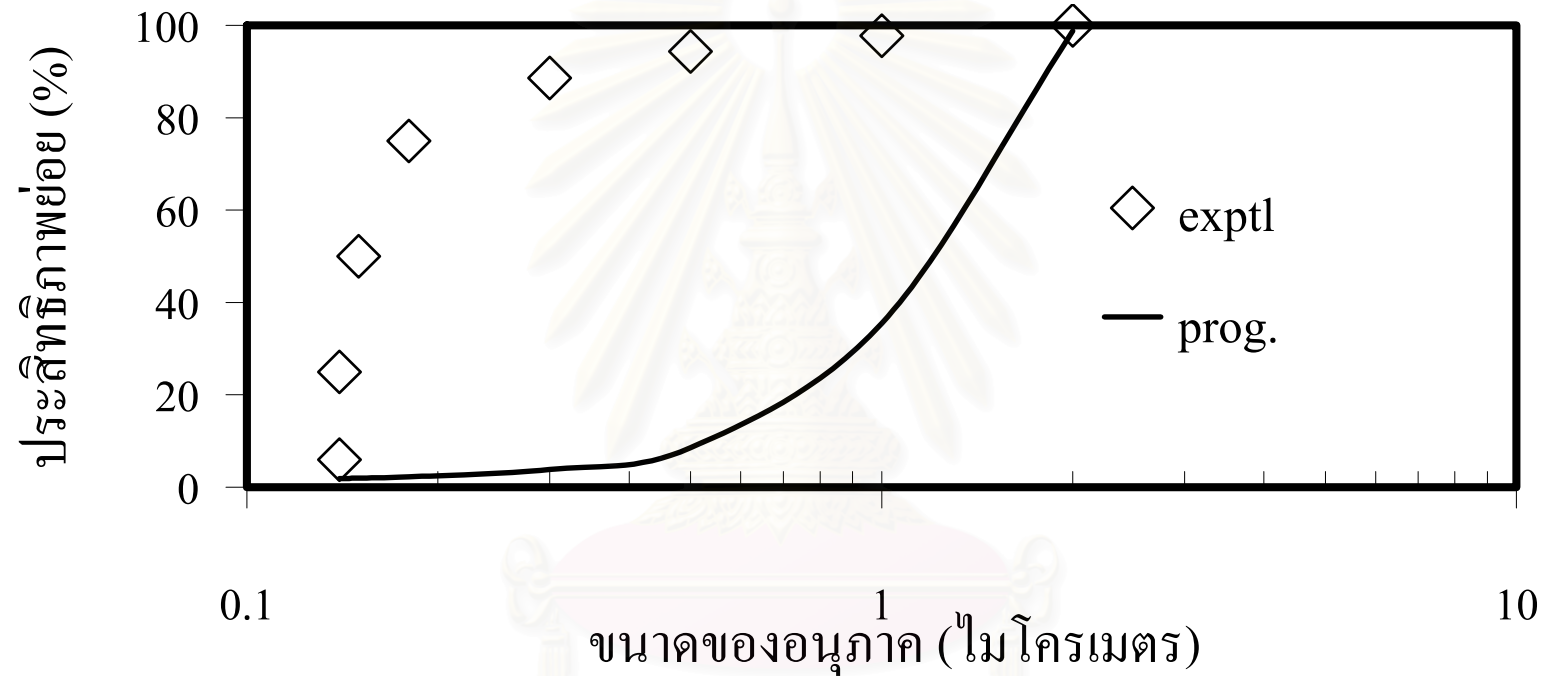


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



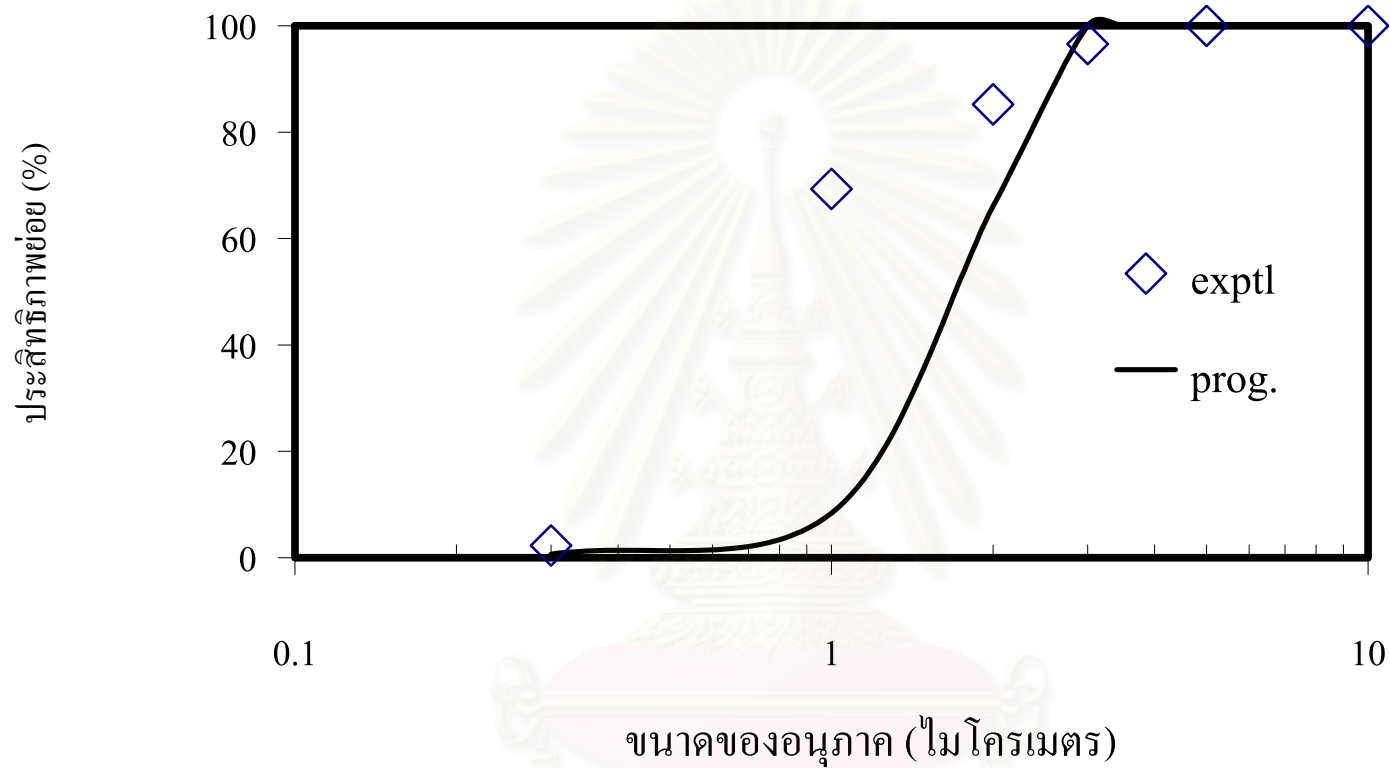
รูปที่ 10.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $Al_2O_3$  # 8000 ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและ

โปรแกรมโดยมีค่าความเร็วก๊าซขาเข้า = 30 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15



รูปที่ 10.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัด  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000 ของไซโคลนกรณี Type II ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม

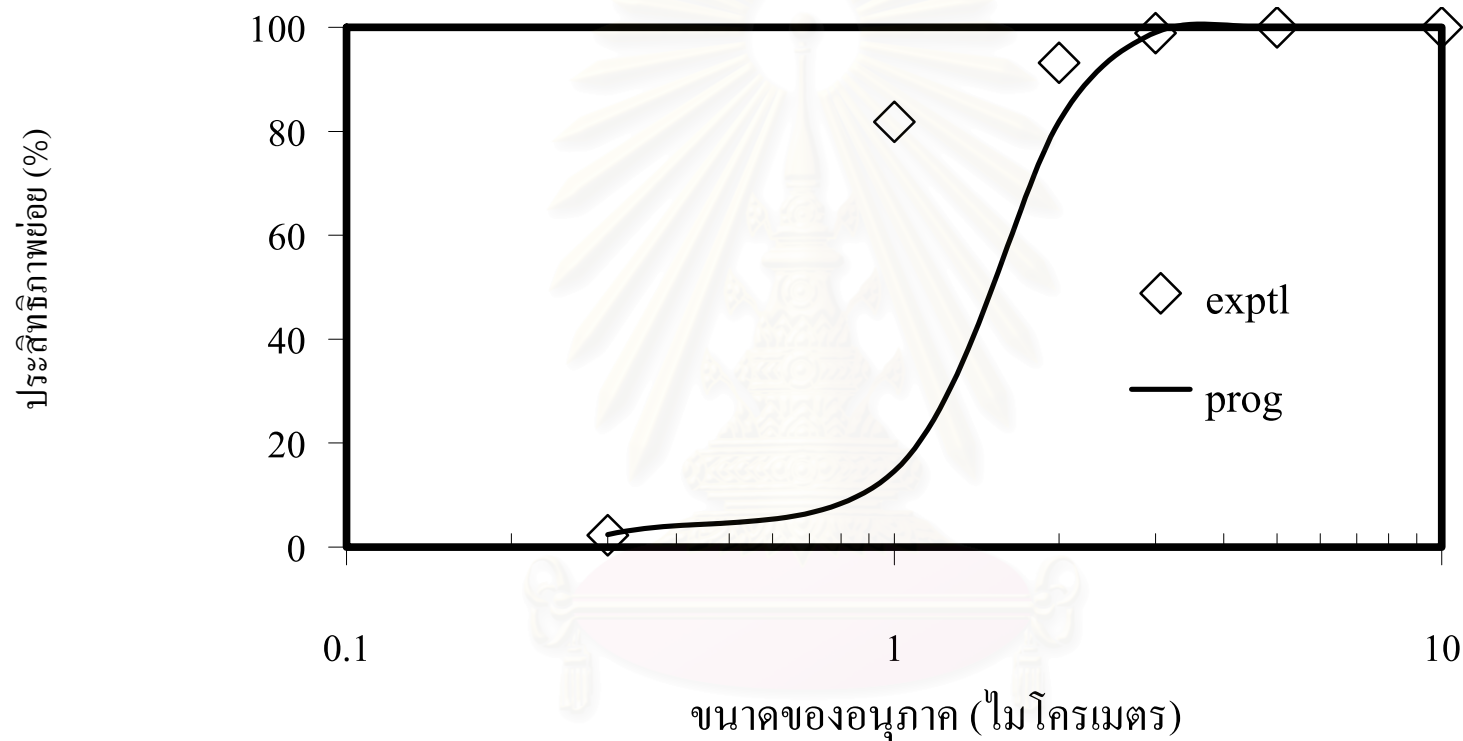
โดยมีความเร็วขาเข้า = 20 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15



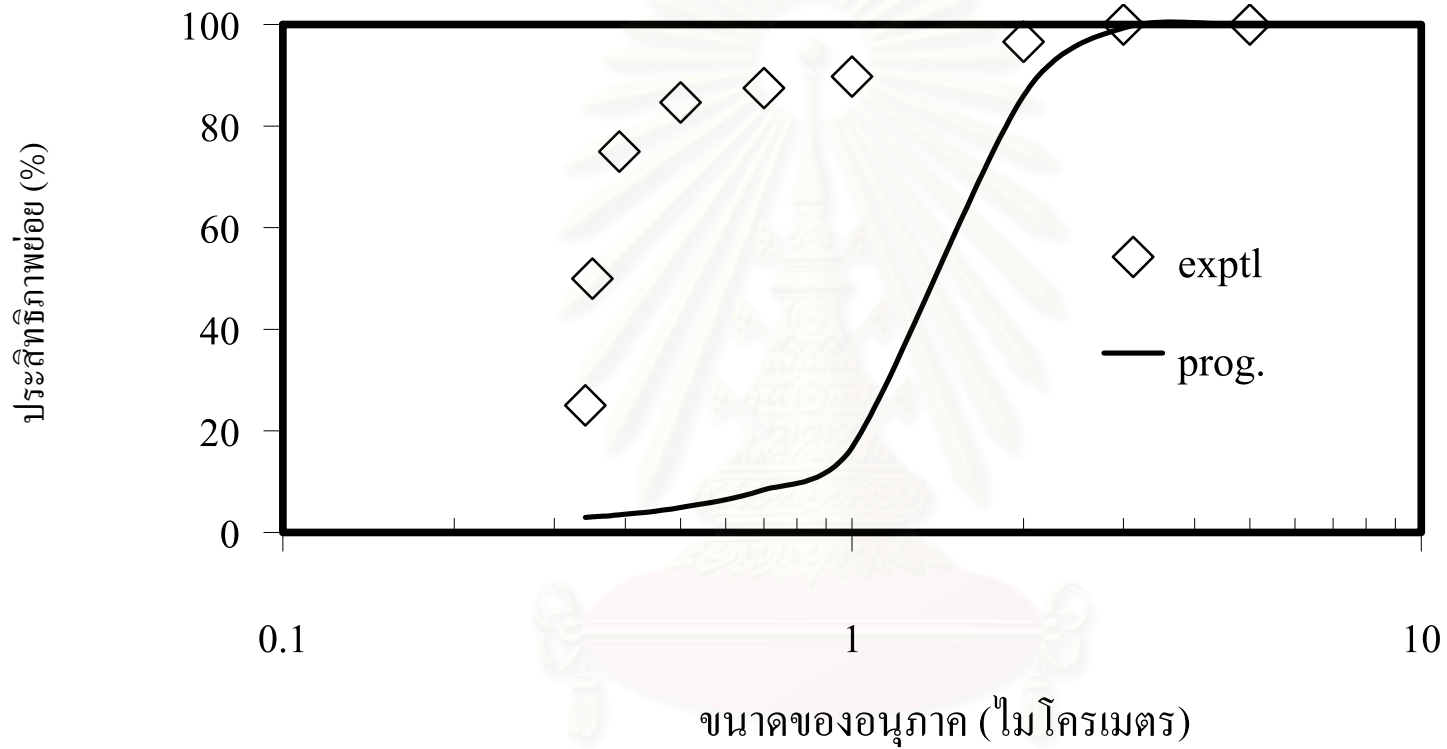
รูปที่ 10.6 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพพ่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม

โดยมีความเร็วขาเข้า = 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown)= 0

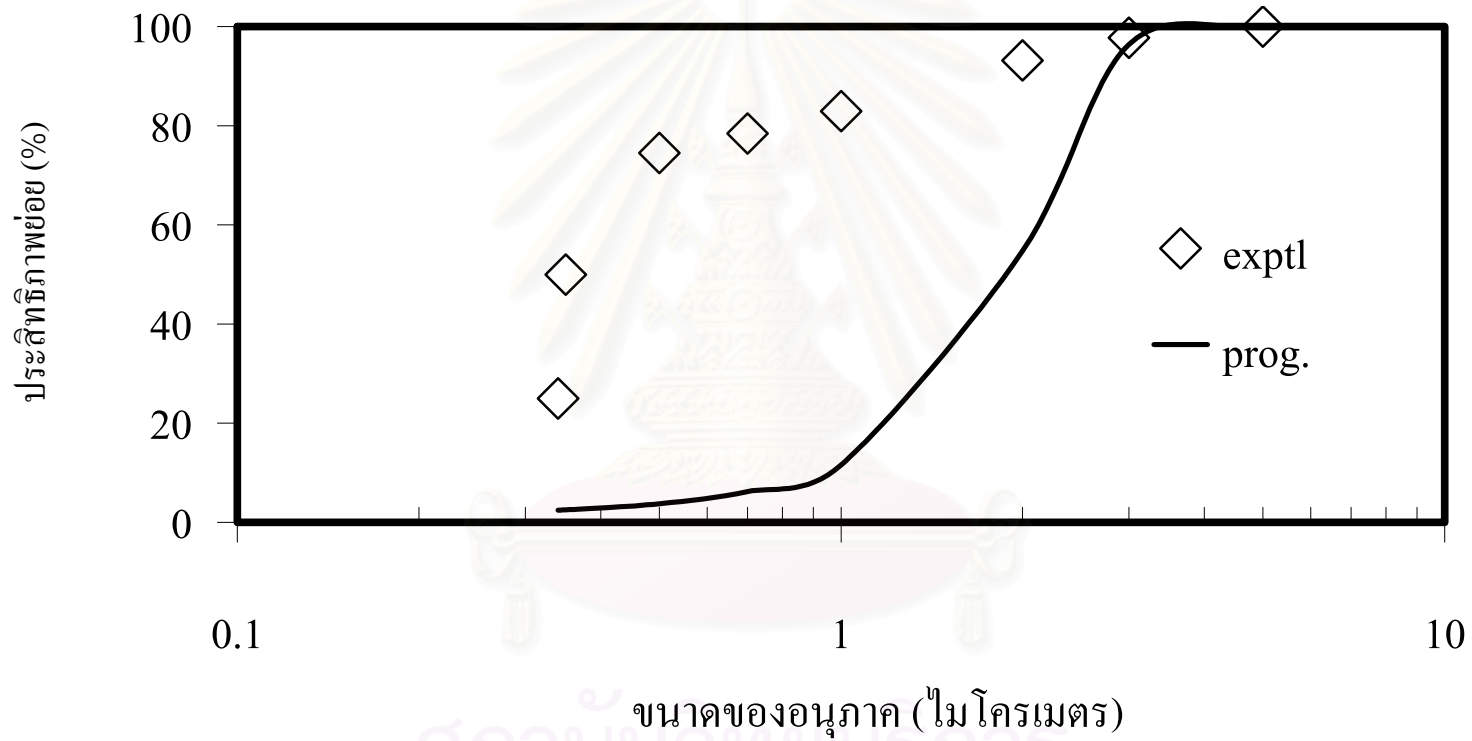
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10.7 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown)= 10



รูปที่ 10.8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้ามีค่า 29 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15



รูปที่ 10.9 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพข้อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและโปรแกรม โดยมีความเร็วขาเข้า = 20 m/s และ %การเป่าลง (%blowdown) = 15



### 10.3 อิทธิพลของการเกาะรวมตัวกัน (agglomeration) ต่อค่าประสิทธิภาพย่อย

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า เมื่อฝุ่นในกระแสก๊าซสกปรกมีความเข้มข้นสูงจะทำให้ฝุ่นบางส่วนตกตัวบนผนังไซโคลนก่อนที่จะได้รับแรงกระทำจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นของไซโคลนมีค่ามากขึ้นด้วย (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 9.4) นอกจากนี้โอกาสที่อนุภาคจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคก็มีสูงขึ้นด้วย เช่น การเกาะรวมตัวกันของอนุภาค ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จากผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนในหัวข้อ 10.2 พบว่าโปรแกรมทำนายค่าได้ต่ำกว่าผลการทดลองในช่วงอนุภาคขนาดเล็กกว่า 3 ไมโครเมตร เนื่องจากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นไม่คำนึงถึงผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค ตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าที่มีค่าสูงต่อค่าประสิทธิภาพย่อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลดังกล่าวด้วย โดยอธิบายในเทอมของตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค ( $\alpha$ )

ผู้ทำวิจัยได้ทดลองสุ่มใส่ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ( $\alpha$ ) เพื่อคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผล ดังแสดงในตารางที่ 10.1 และรูปที่ 10.10-10.12 พบว่า สำหรับอนุภาคชนิดเดียวกัน ยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันยังมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่ออนุภาคมีความเร็วก๊าซขาเข้าเพิ่มขึ้นแล้ว ตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจะลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะเกิดการชนกัน เกาะรวมตัวกันยังมีน้อยลง

จากผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อใช้ค่าขนาดของอนุภาคเป็นค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลกับกรณีที่ใช้ค่าขนาดของอนุภาคเป็นค่าขนาดของอนุภาคที่ป้อนเข้าโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า โปรแกรมที่ใช้ค่าขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลจะคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยได้ใกล้เคียงผลการทดลองสำหรับอนุภาคทุกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 10.13 – 10.18

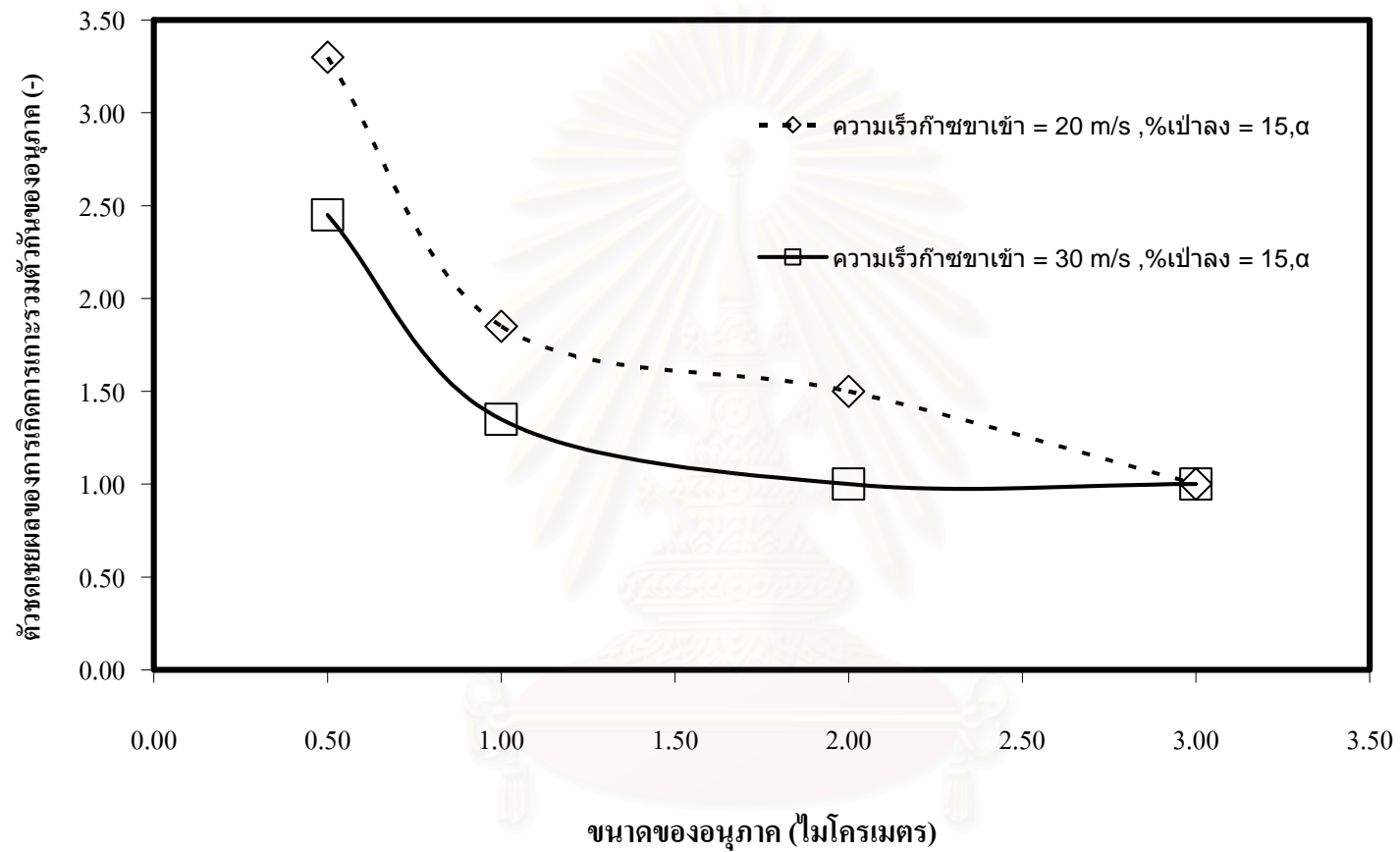
ดังนั้นสรุปได้ว่าโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้สามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยการเก็บอนุภาคฝุ่นของไซโคลนแบบที่มีการเป่าลงได้อย่างถูกต้องเมื่อมีการพิจารณาการเกิดการเกาะรวมตัวกัน

ตารางที่ 10.1 เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลอง ( $\alpha$ ) และที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสองของ ( $\alpha'$ )  
อนุภาค CaCO<sub>3</sub> JIS No.7

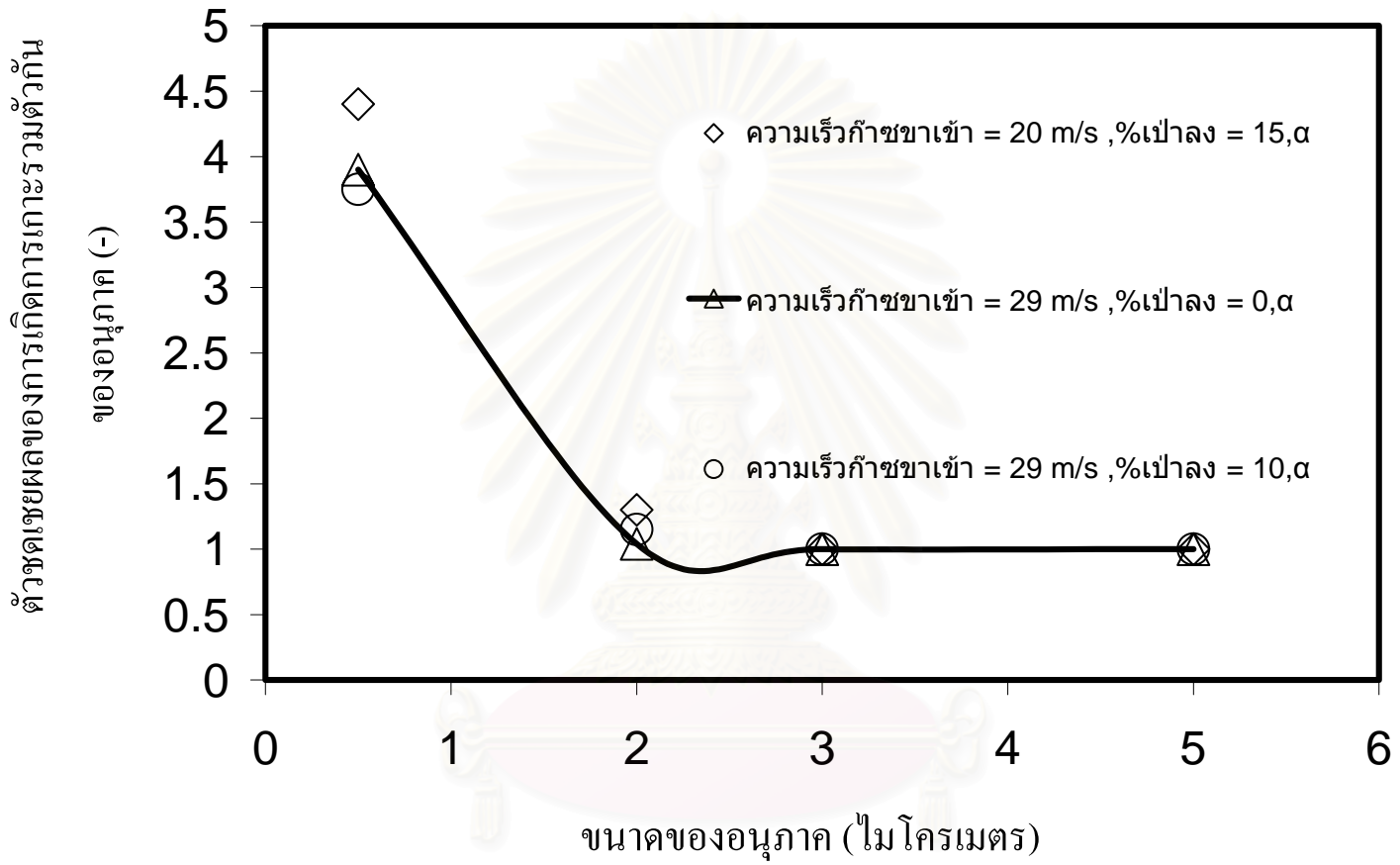
ขนาดของ อนุภาค (ไมโครเมตร)	$\alpha (-)$				$\alpha' (-)$			
	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 20 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 0	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 10	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 20 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 0	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 10	ความเร็วก๊าซขา เข้า = 29 m/s ,%เป่าลง = 15
0.3	9.50	1.70	1.00	3.50	-	-	-	-
0.7	3.20	2.84	2.75	2.85	-	-	-	-
0.5	4.40	3.90	3.75	3.90	4.02	3.64	3.64	3.64
2.0	1.30	1.04	1.15	1.20	1.32	1.16	1.16	1.16
3.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.06	1.10	1.10	1.10
5.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

ตารางที่ 10.2 เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลอง ( $\alpha$ ) และที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสองของ ( $\alpha'$ )  
อนุภาค  $Al_2O_3$  #8000

ขนาดของ อนุภาค (ไมโครเมตร)	$\alpha$ (-)		$\alpha'$ (-)	
	ความเร็วก๊าซขาเข้า = 20 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขาเข้า = 30 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขาเข้า = 20 m/s ,%เป่าลง = 15	ความเร็วก๊าซขาเข้า = 30 m/s ,%เป่าลง = 15
0.5	3.30	2.45	3.06	2.38
1.0	1.85	1.35	2.21	1.55
2.0	1.50	1.00	1.38	0.74
3.0	1.00	1.00	1.72	1.11

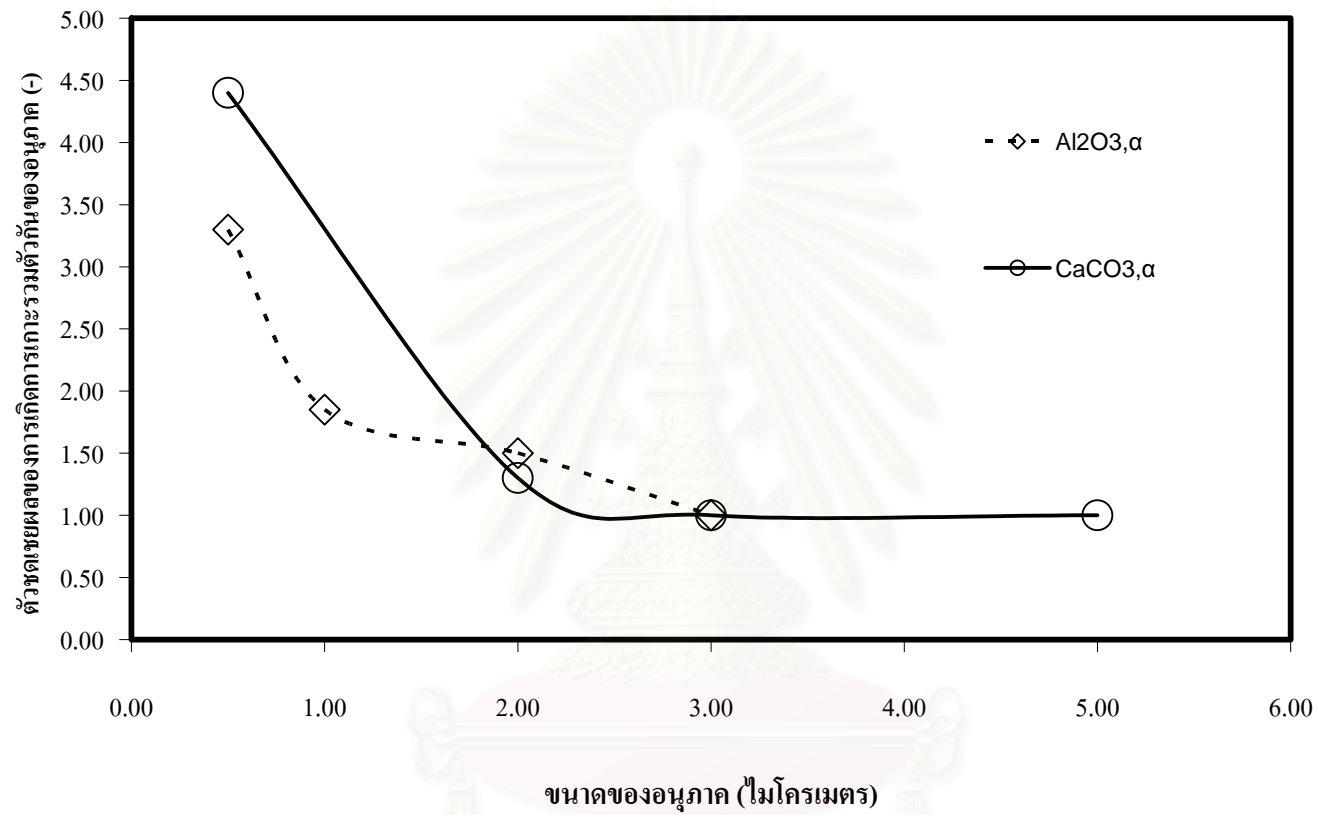


รูปที่ 10.10 แสดงค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค  $Al_2O_3$  #8000 ที่ได้จากการทดลองมุม ( $\alpha$ )



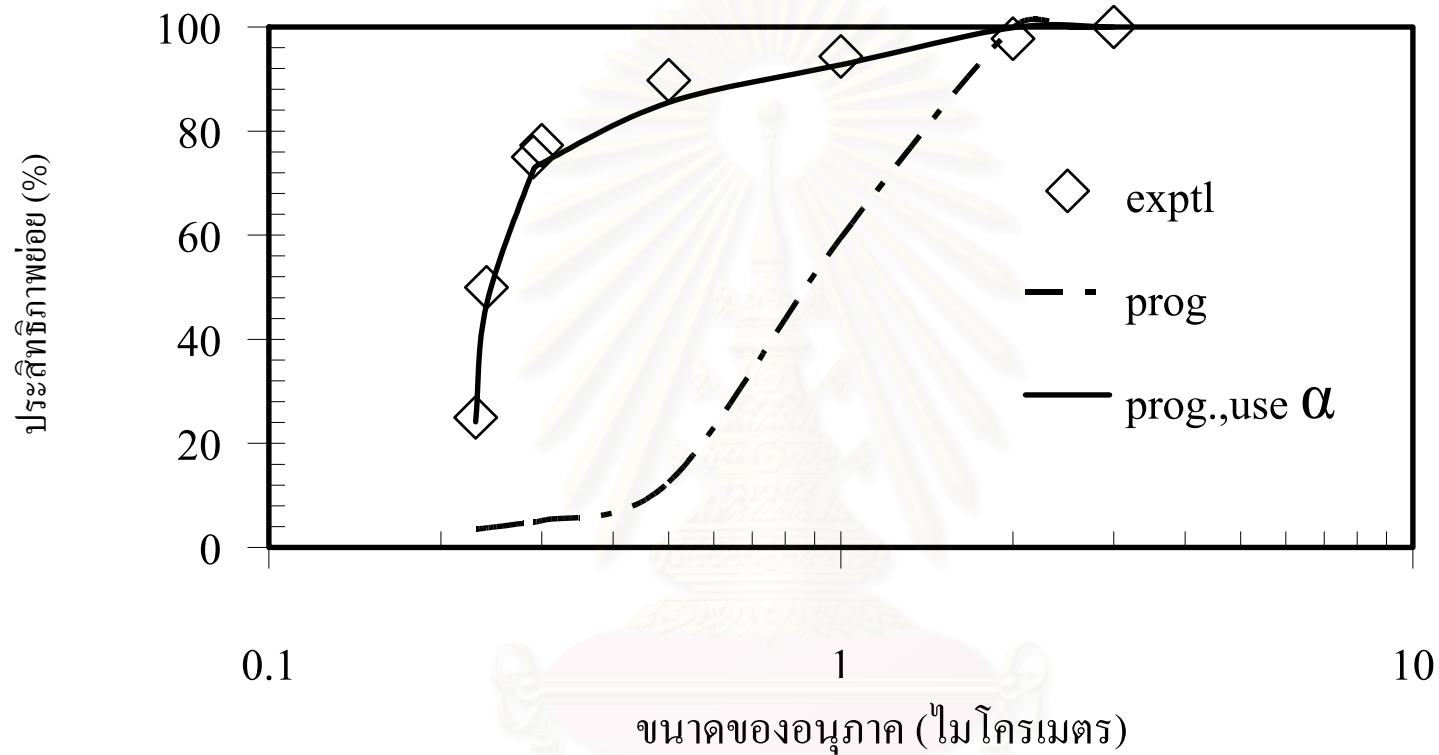
รูปที่ 10.11 แสดงค่าตัวชี้วัดผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค CaCO<sub>3</sub> JIS No.7 ที่ได้จากการทดลอง (α)

สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



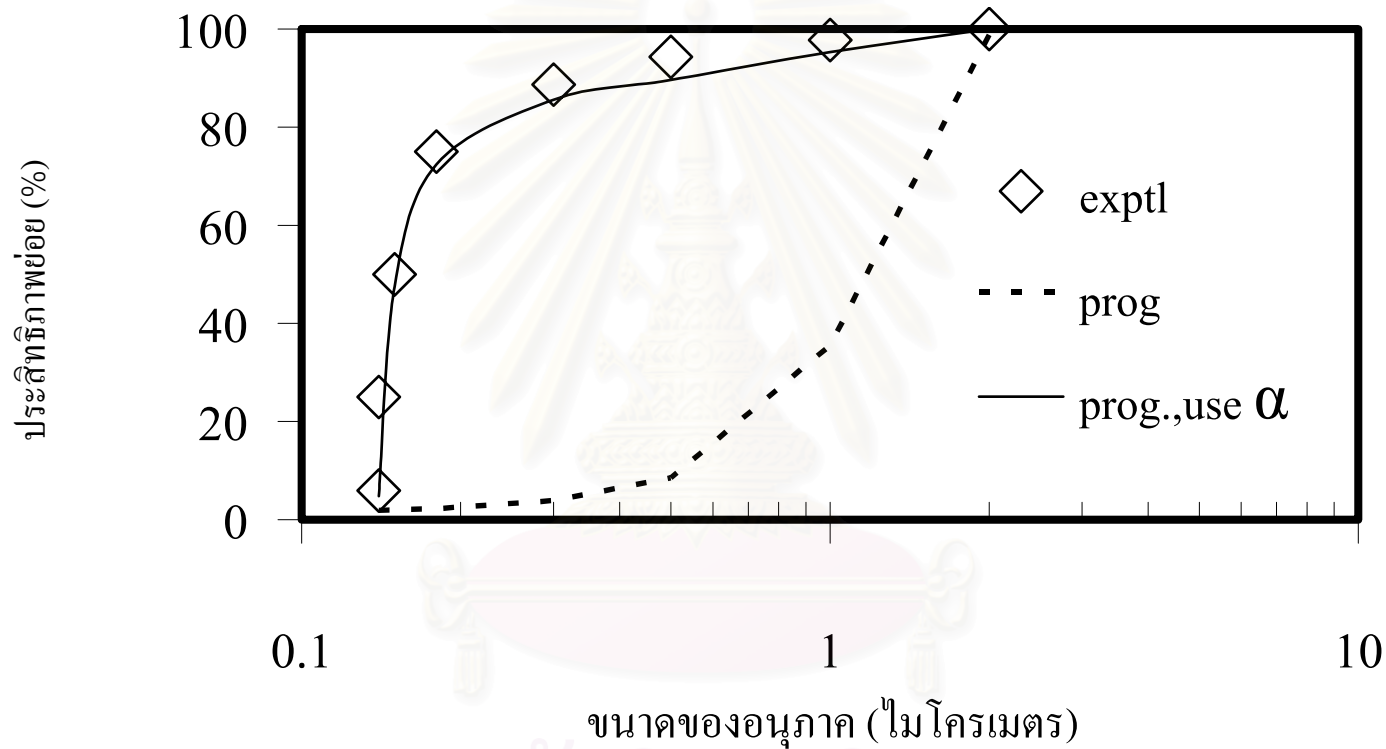
รูปที่ 10.12 เปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค CaCO<sub>3</sub> JIS No.7 และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> #8000 ที่ได้จากการทดลองสุ่ม (α)

เมื่อความเร็วกำซาเข้ามีค่า 20 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15



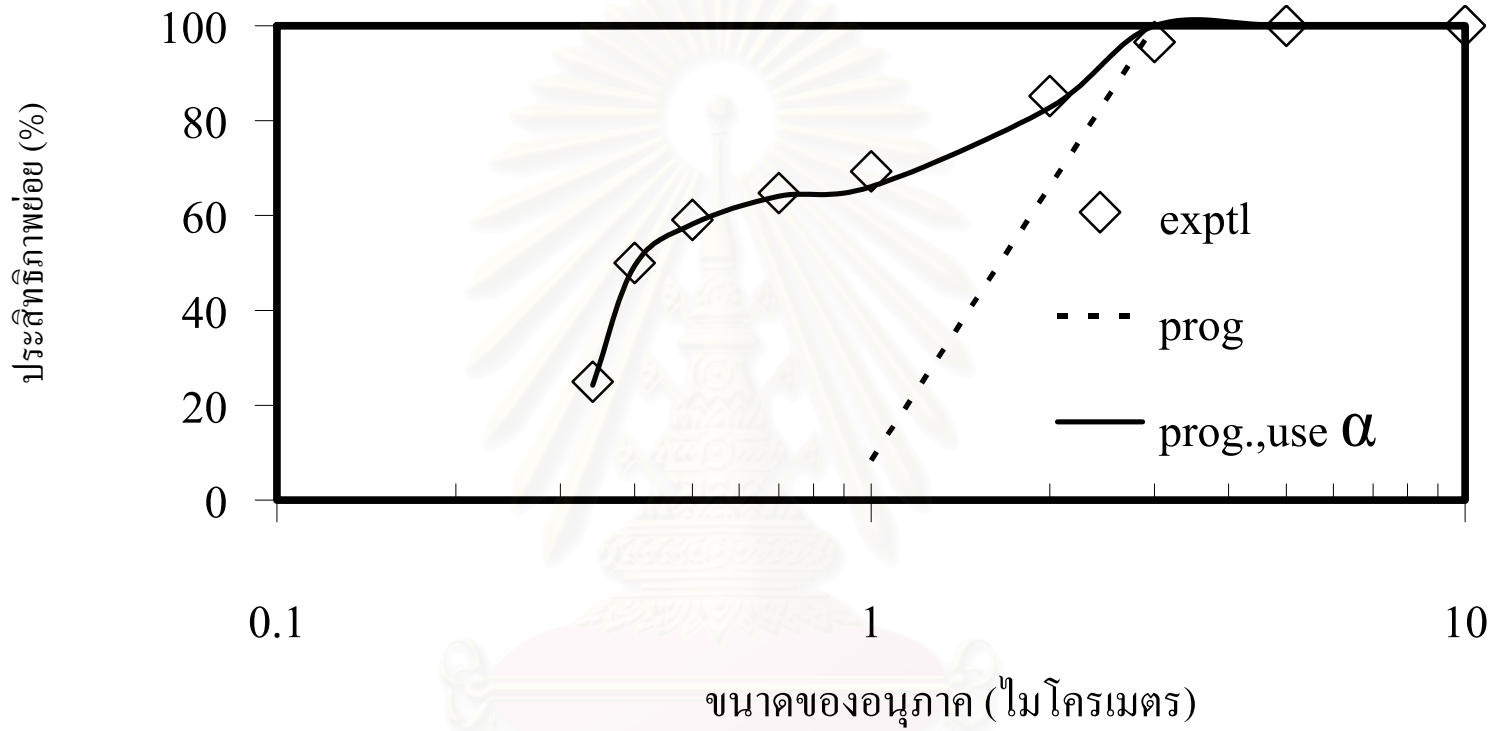
รูปที่ 10.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพขอยในการกำจัดอนุภาค  $Al_2O_3$  # 8000 ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันจากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 30 เมตร/วินาทีและ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 15

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



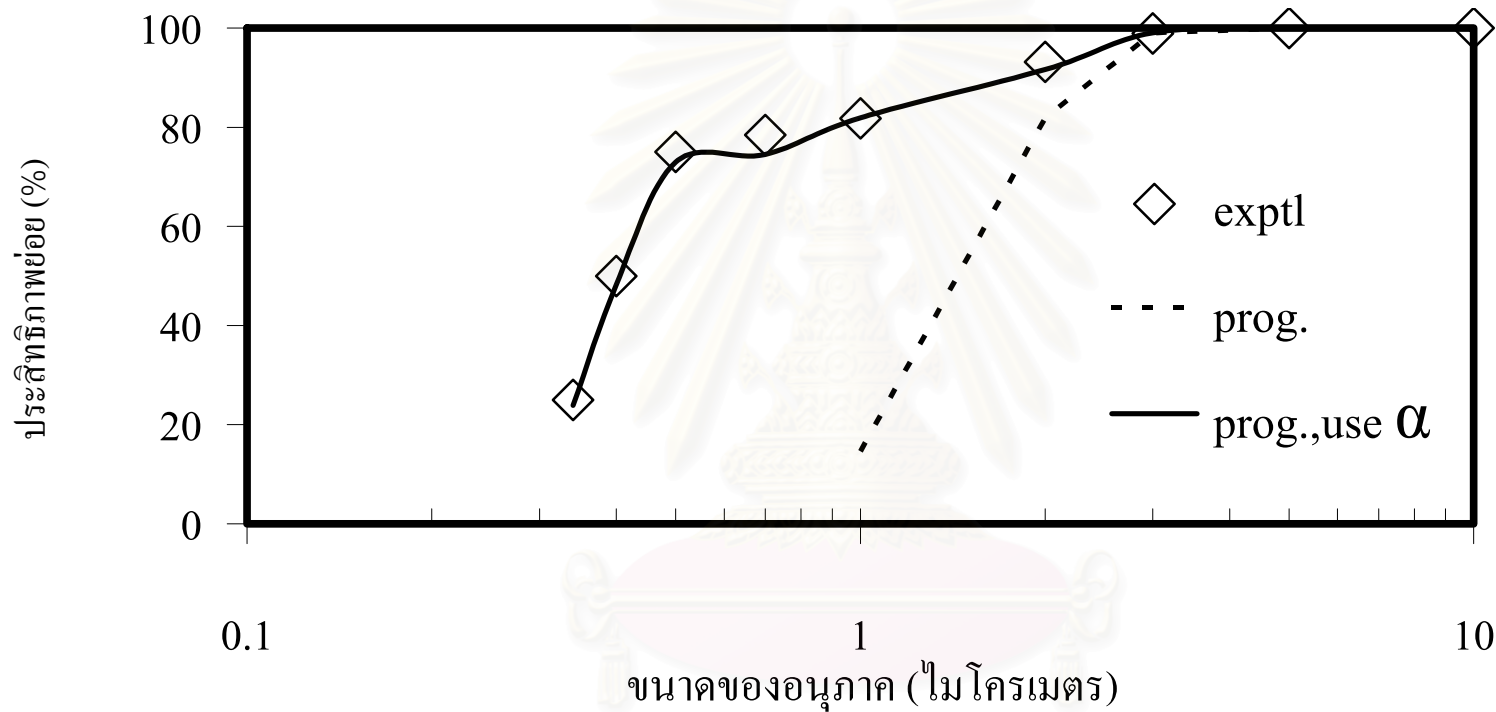
รูปที่ 10.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $Al_2O_3$  # 8000 ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจากการทดลองสูง ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 15



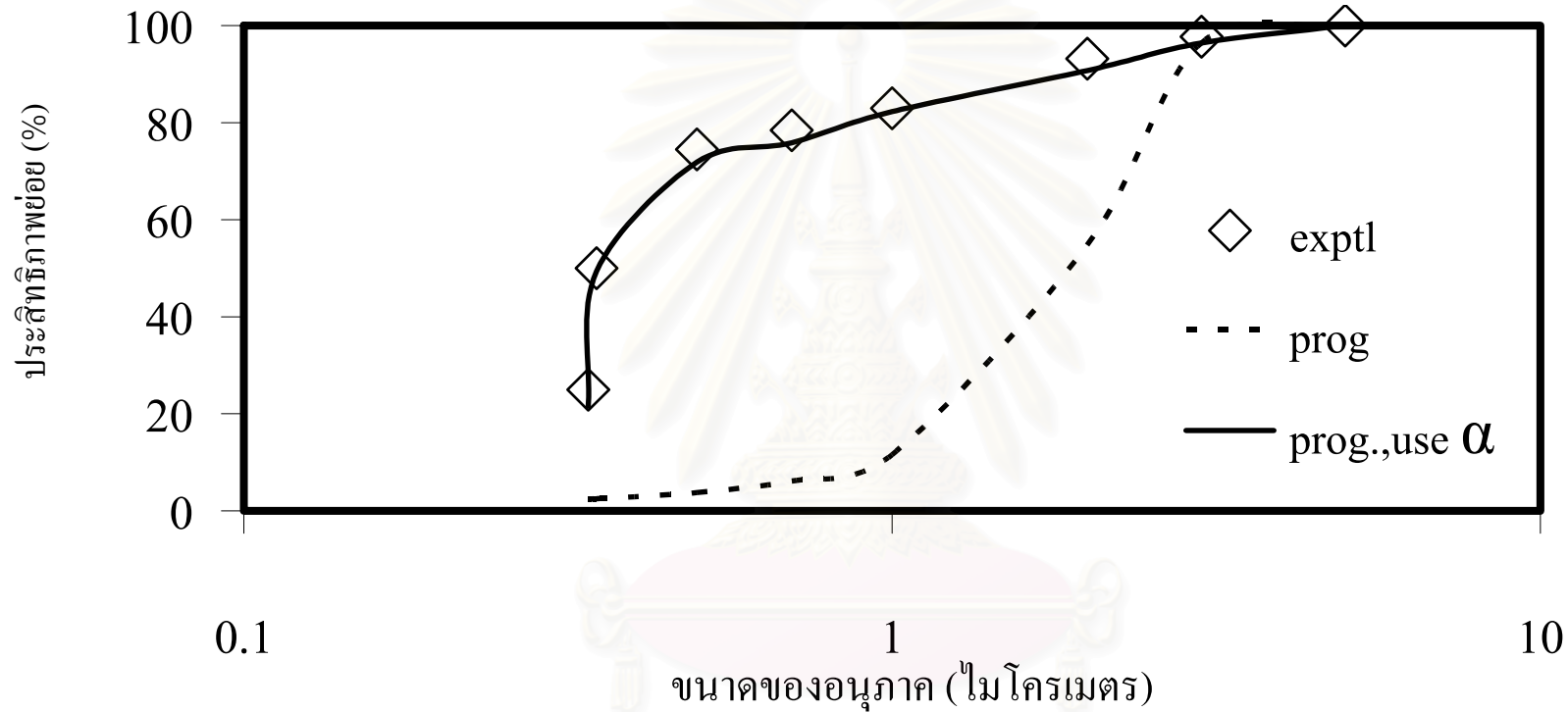


รูปที่ 10.15 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจากการทดลอง ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 0

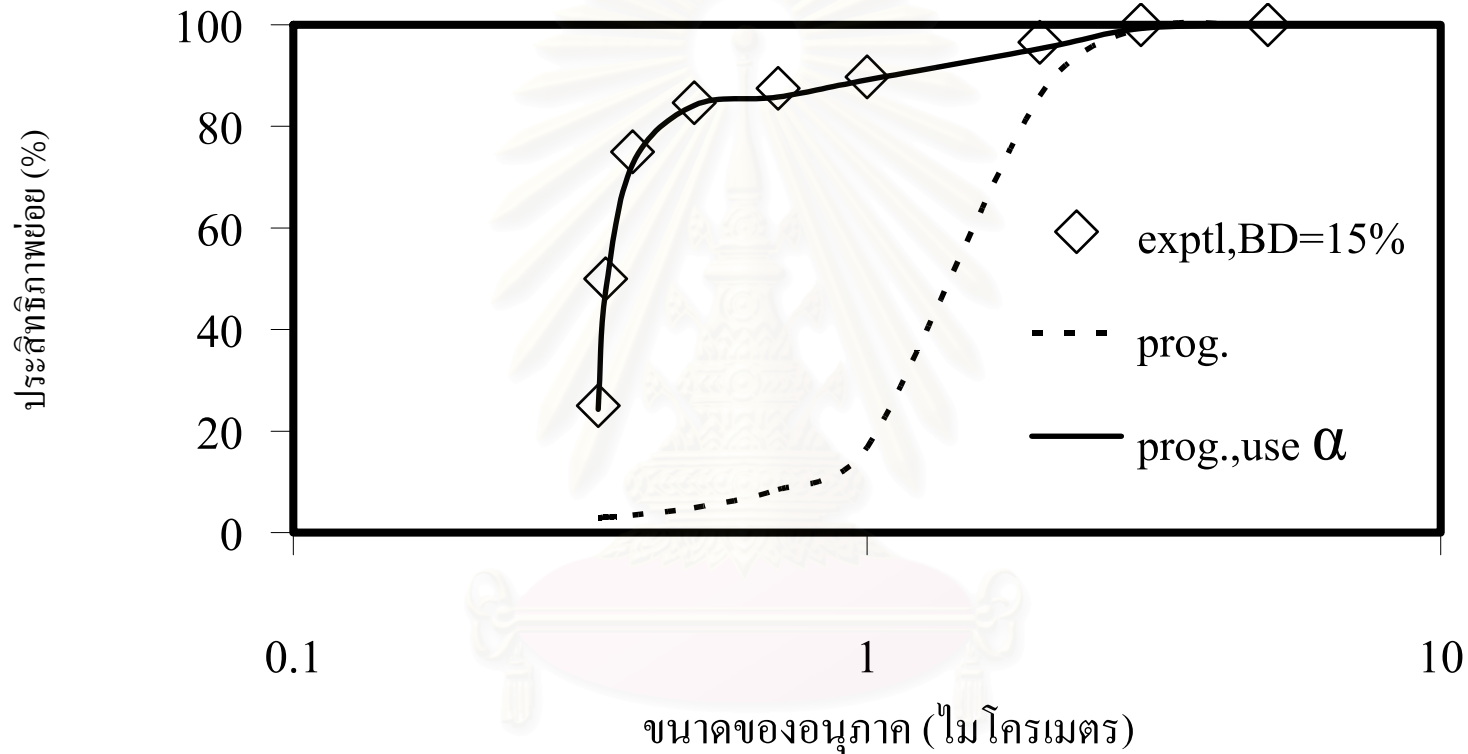
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10.16 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจากการทดลอง  $\alpha$  ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 10



รูปที่ 10.17 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจากการทดลอง ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 20 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 15



รูปที่ 10.18 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ของไซโคลนกรณี Type I ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคจากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) ที่ความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 29 เมตร/วินาที และ%การเป่าลง (%blowdown) มีค่าเท่ากับ 15

#### 10.4 สหสัมพันธ์สำหรับคำนวณค่าตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค

จากหัวข้อ 10.3 งานวิจัยนี้จึงได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคที่กำลังพิจารณาและความเร็วก๊าซขาเข้าต่อตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค ในรูปของสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ดังแสดงในสมการที่ (10.1) ซึ่งอยู่ในรูปแบบไร้หน่วย โดยขนาดของอนุภาคไร้หน่วยที่นำมาคำนวณจะอยู่ในรูปของขนาดของอนุภาคที่สนใจหารด้วยขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดสำหรับคิดผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกัน ในสมการนี้กำหนดให้มีขนาดใหญ่สุดที่ต้องคำนึงถึงผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคเท่ากับ 3 ไมโครเมตร ส่วนเทอมของความเร็วก๊าซขาเข้าไร้หน่วยจะอยู่ในรูปความเร็วก๊าซขาเข้าที่สนใจหารด้วยความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะนิยมให้ความเร็วก๊าซไหลเข้าในไซโคลนในช่วง 10-20 เมตร/วินาที ดังนั้นในสมการนี้ได้กำหนดความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

อนึ่ง จากตารางที่ 10.1 จะเห็นว่าช่วงขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตรจะไม่สามารถทำนายแนวโน้มของค่าตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันได้ ดังนั้นในสมการนี้จะคำนวณหาค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค สำหรับอนุภาคที่มีขนาดในช่วง 0.5-3 ไมโครเมตรเท่านั้น

สมการ (10.1) ที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่เกิดการเกาะรวมตัวกันได้โดย ขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลจะเป็นผลคูณระหว่างขนาดของอนุภาคที่สนใจคูณด้วยตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค

$$\alpha' = a + b \times d_p' + c \times v_i' + d \times d_p'^2 + e \times d_p' \times v_i' + f \times v_i'^2 \quad (10.1)$$

เมื่อ  $d_p'$  คือ ขนาดของอนุภาคไร้มิติซึ่งได้จากการหารขนาดของอนุภาคที่สนใจด้วยขนาดของอนุภาคใหญ่สุด (-)

$v_i'$  คือ ความเร็วไร้มิติซึ่งได้จากการหารความเร็วก๊าซขาเข้าด้วยความเร็วก๊าซเฉลี่ย (-)

a,b,c,d,e,f คือ สัมประสิทธิ์จากการทดลอง (-)

$\alpha$  คือ ตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค (-)

สำหรับอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ (10.1) ดังนี้

$$\alpha' = 4.051 - 13.009 \times d_p' + 2.7676 \times v_i' + 7.108 \times d_p'^2 + 0.870 \times d_p' \times v_i' - 1.092 \times v_i'^2 \quad (10.2)$$

โดยมีค่า  $R^2 = 0.954$

และ ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5-3 ไมโครเมตร

ความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

จากสมการที่ (10.2) สามารถนำมาคำนวณหาค่าขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงแล้วนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพ้อย์ในการจับฝุ่นของไซโคลนได้

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (10.2) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถคำนวณหาค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคได้อย่างถูกต้องดังแสดงในรูปแบบที่ 10.19

จากรูปที่ 10.20 และ 10.21 พบว่า โปรแกรมที่ใช้คำนวณขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลซึ่งคำนวณได้จากสมการ (10.2) สามารถทำนายค่าประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงผลการทดลองอย่างน่าเชื่อถือ

สำหรับอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000 มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ (10.1) ดังนี้

$$\alpha' = 3.0825 - 7.8899 \times d_p' + 2.0861 \times v_i' + 5.2601 \times d_p'^2 + 0.1092 \times d_p' \times v_i' - 0.9328 \times v_i'^2 \quad (10.3)$$

โดยมีค่า  $R^2 = 0.924$

และ ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.5-3 ไมโครเมตร

ความเร็วก๊าซขาเข้าเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค  $Al_2O_3$  #8000 ที่ได้จากการทดลอง ( $\alpha$ ) และค่าที่ได้จากสมการ (10.3) ( $\alpha'$ ) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้สามารถคำนวณหาค่าตัวชดเชยผลของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคได้อย่างถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 10.22 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า  $\alpha$  และ  $\alpha'$  ของอนุภาค  $Al_2O_3$  #8000 และ  $CaCO_3$  JIS No.7 ที่ความเร็วกำซาเข้าและร้อยละอัตราการเป่าลงเท่ากันพบว่า ค่า  $\alpha$  และ  $\alpha'$  ของอนุภาคแต่ละชนิดก็ยังคงมีค่าไม่เท่ากัน แสดงว่า  $\alpha$  และ  $\alpha'$  นั้นนอกจากจะขึ้นกับค่าขนาดของอนุภาคและความเร็วกำซาเข้ายังขึ้นกับชนิดของอนุภาคด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10.23

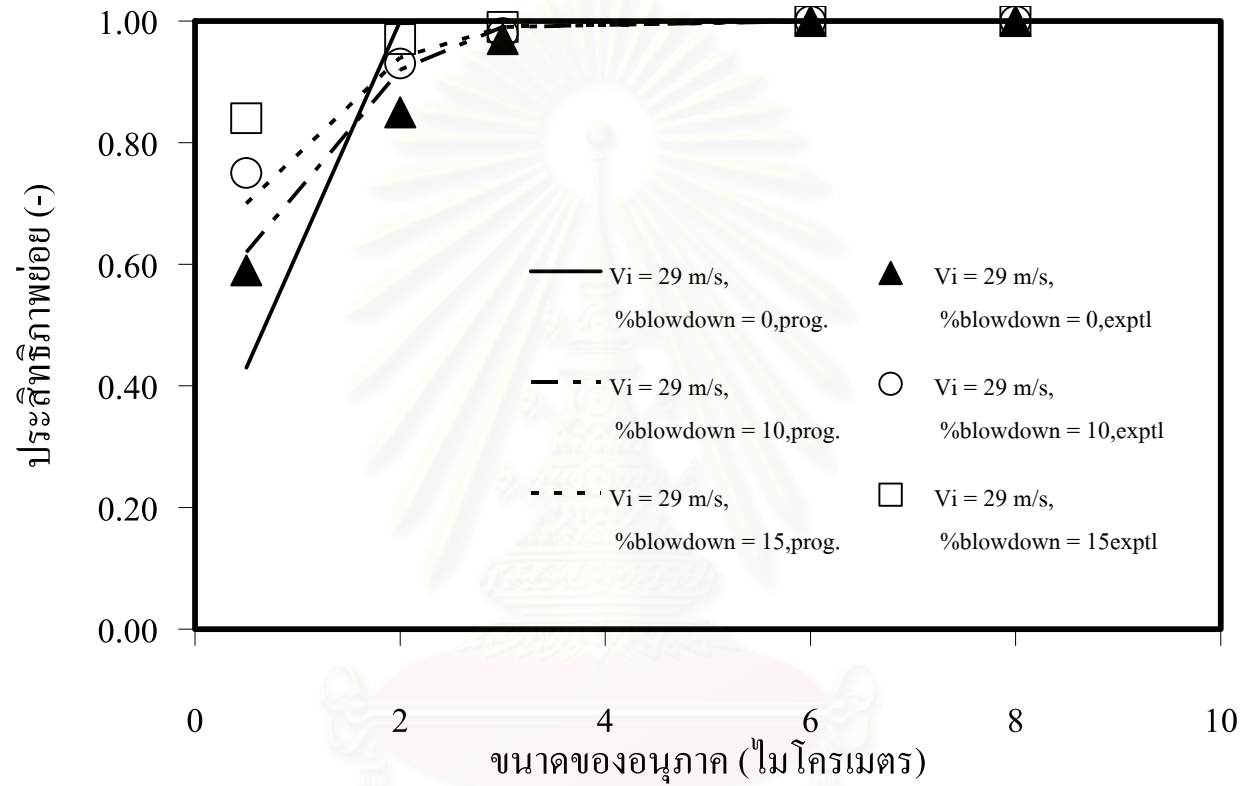
จากรูปที่ 10.24 พบว่า โปรแกรมที่ใช้คำนวณของอนุภาคเชิงประสิทธิผลซึ่งคำนวณได้จากสมการ (10.3) สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพพ้อยได้ใกล้เคียงผลการทดลองได้ค่อนข้างดี

สรุปได้ว่าโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นร่วมกับการประยุกต์ใช้คำนวณของอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนึงถึงผลของความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าสูงๆ และผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค สามารถทำนายค่าประสิทธิภาพพ้อยของการจับฝุ่นของไซโคลนแบบที่มีการเป่าลงได้นำเชื่อถือโดยมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองเพียง  $\pm 2\%$  เท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

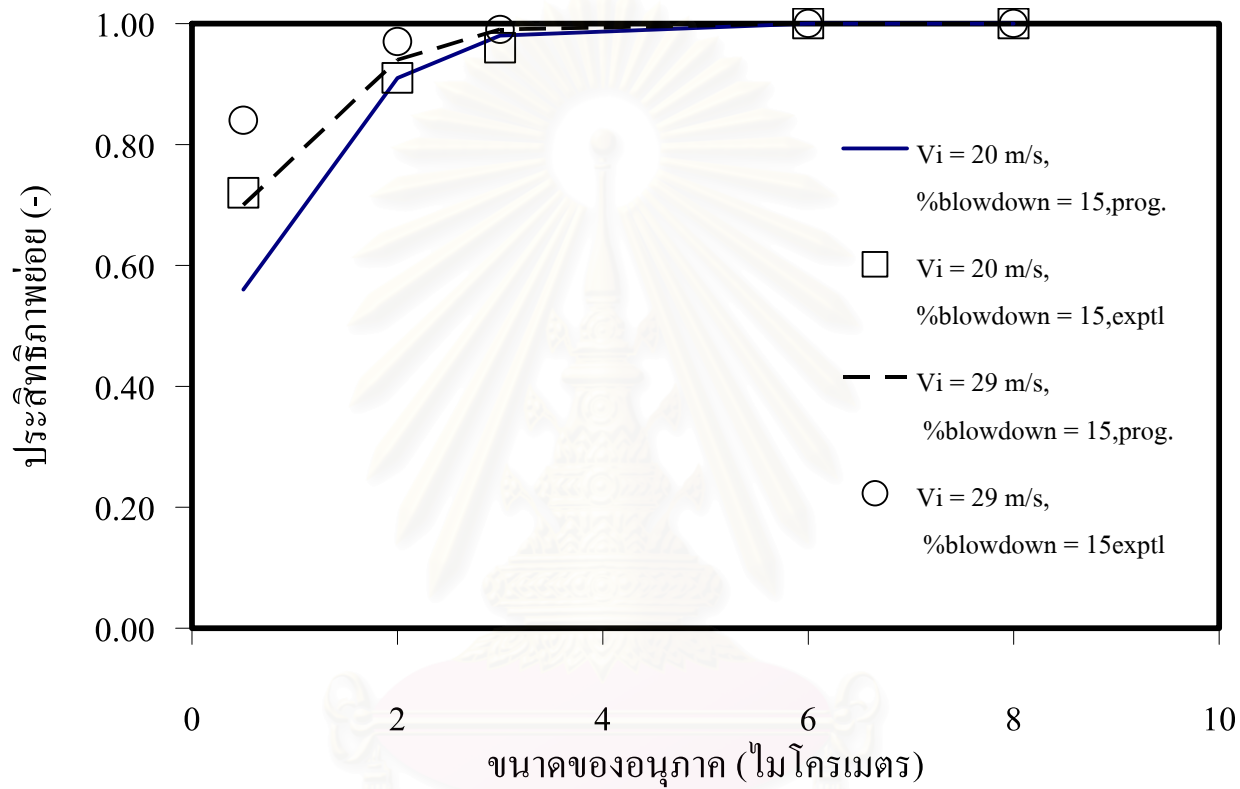






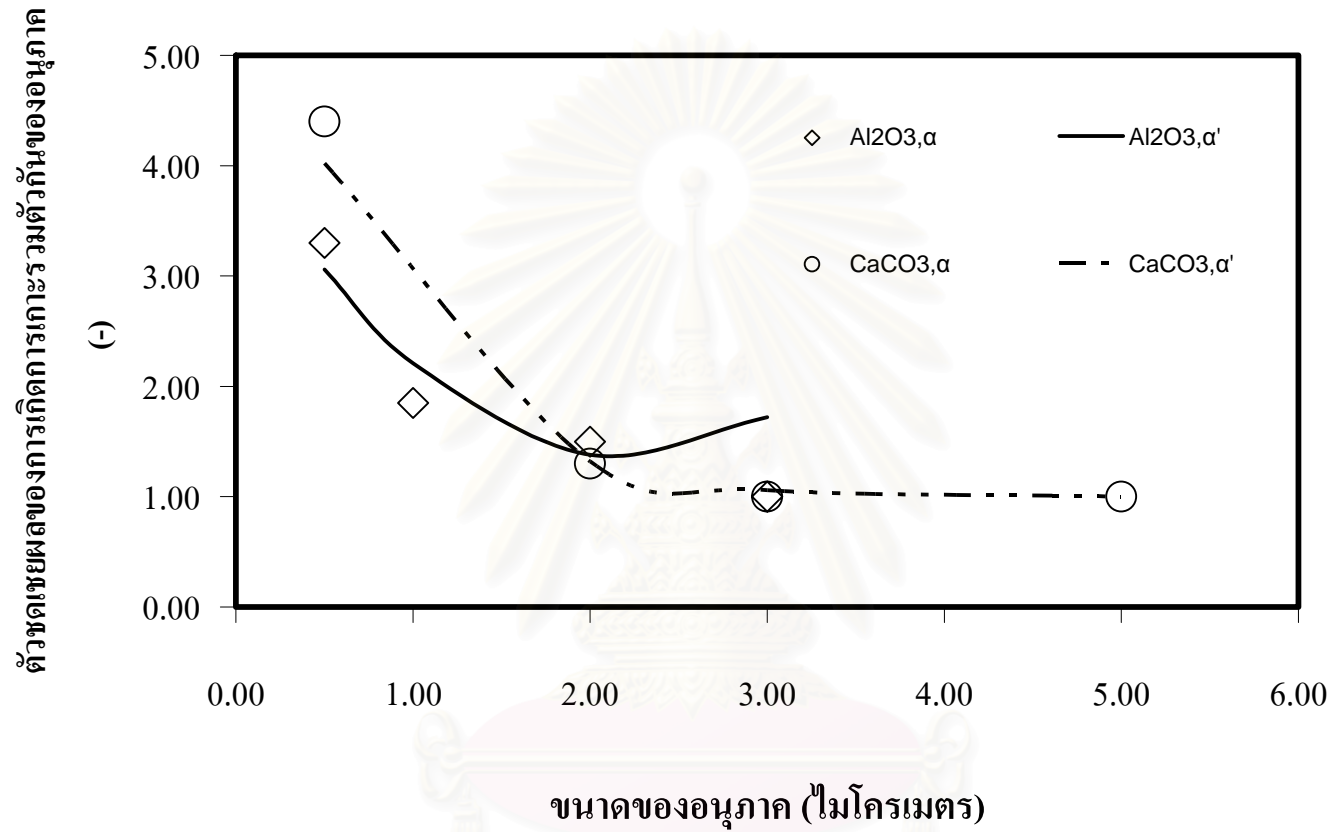
รูปที่ 10.20 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



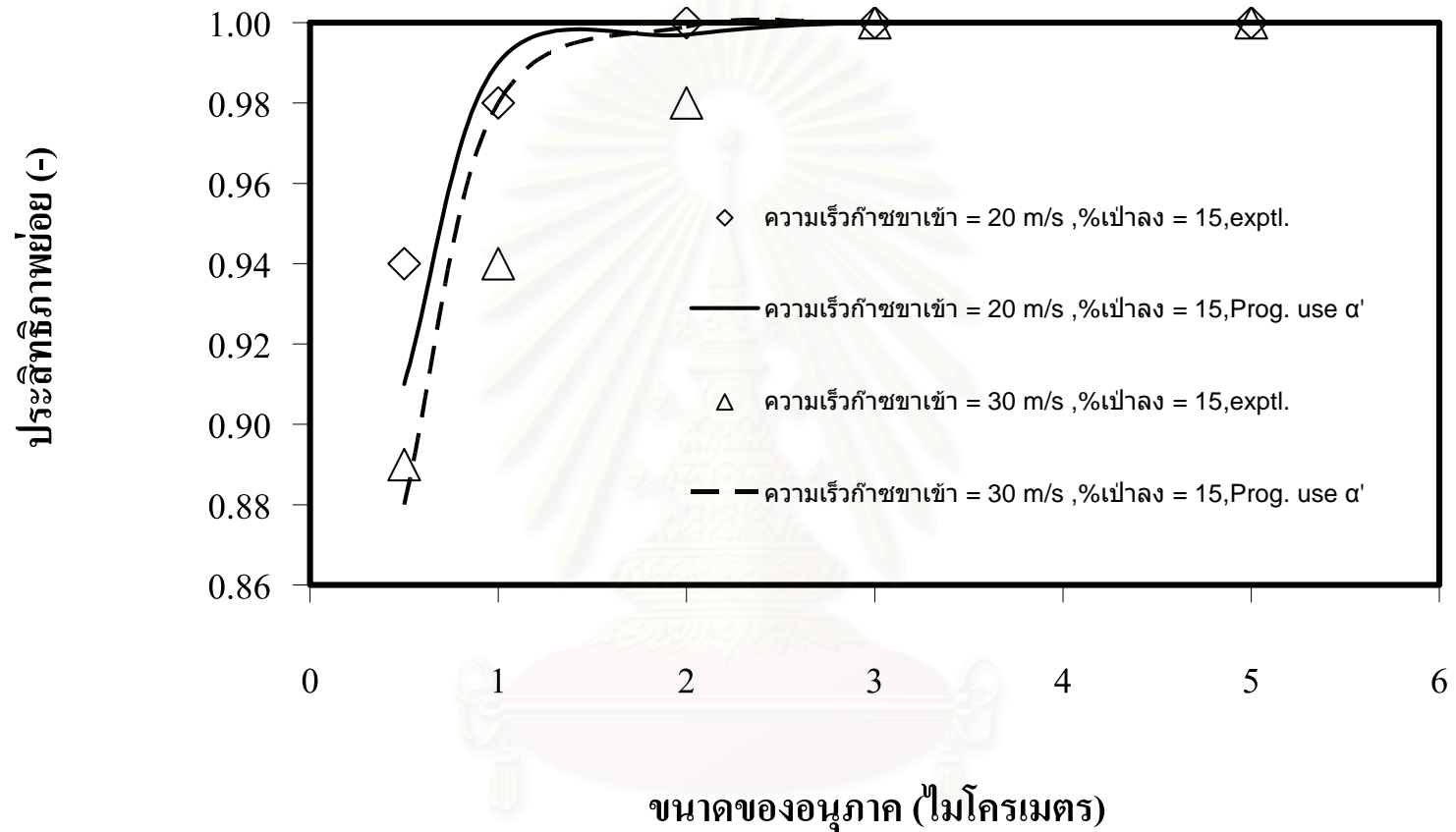
รูปที่ 10.21 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 ที่ร้อยละอัตราการเป่าลมมีค่า 15 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )





รูปที่ 10.23 เปรียบเทียบค่าตัวหัดเฉลยของการเกิดการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000 และ  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองสุ่ม ( $\alpha$ ) และค่าที่ได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ ) ที่ความเร็วกำซาเข้ามีค่า 20 เมตร/วินาทีและร้อยละอัตราการเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



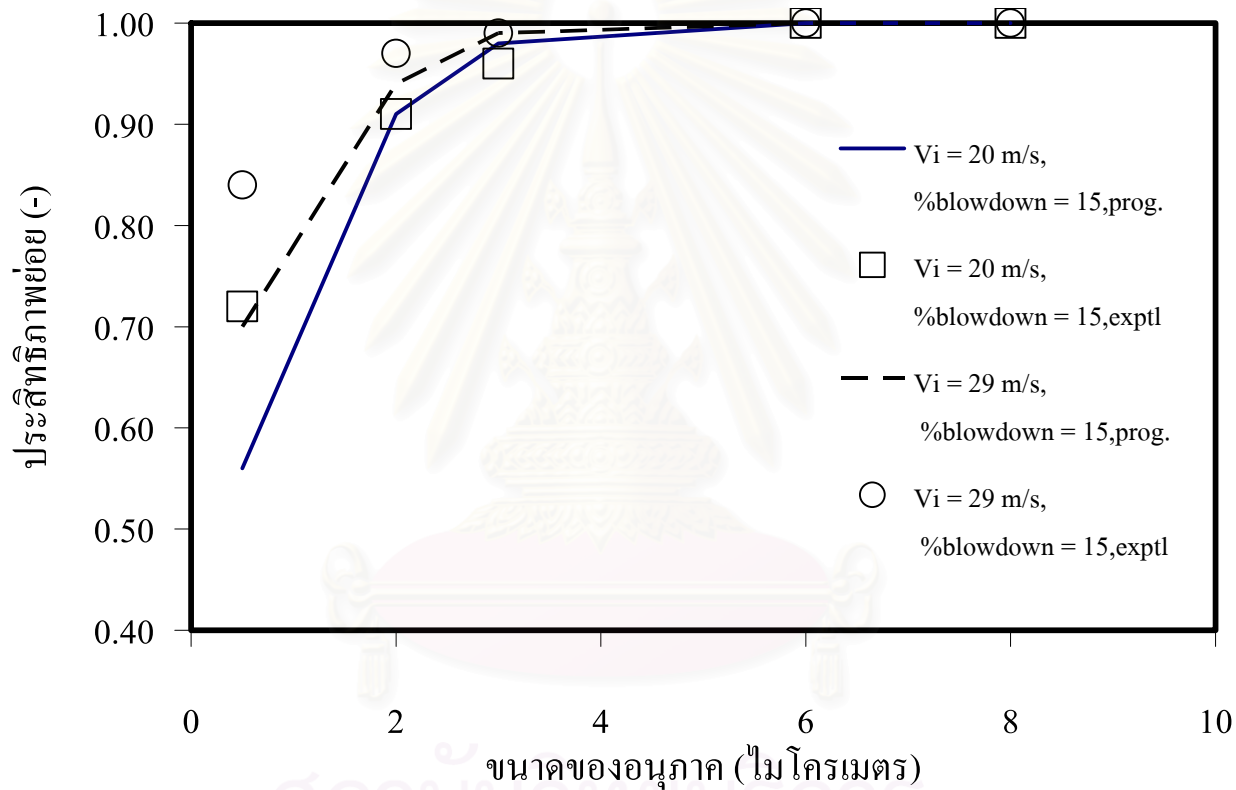
รูปที่ 10.24 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาค  $Al_2O_3$  #8000 ที่ร้อยละอัตราการเป่าลงมีค่าเท่ากับ 15 ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรม โดยใช้ค่าขนาดอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ )

### 10.5 อิทธิพลของความเร็วก๊าซขาเข้าต่อค่าประสิทธิภาพย่อย

จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อความเร็วก๊าซขาเข้าเพิ่มขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพการจับฝุ่นของไซโคลอน ซึ่งโปรแกรมที่ประดิษฐ์สามารถทำนายผลได้ถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 10.10



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10.25 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ ) โดยมี%การเป่าลง (%blowdown) = 15 เมื่อเปลี่ยน ความเร็วก๊าซขาเข้า

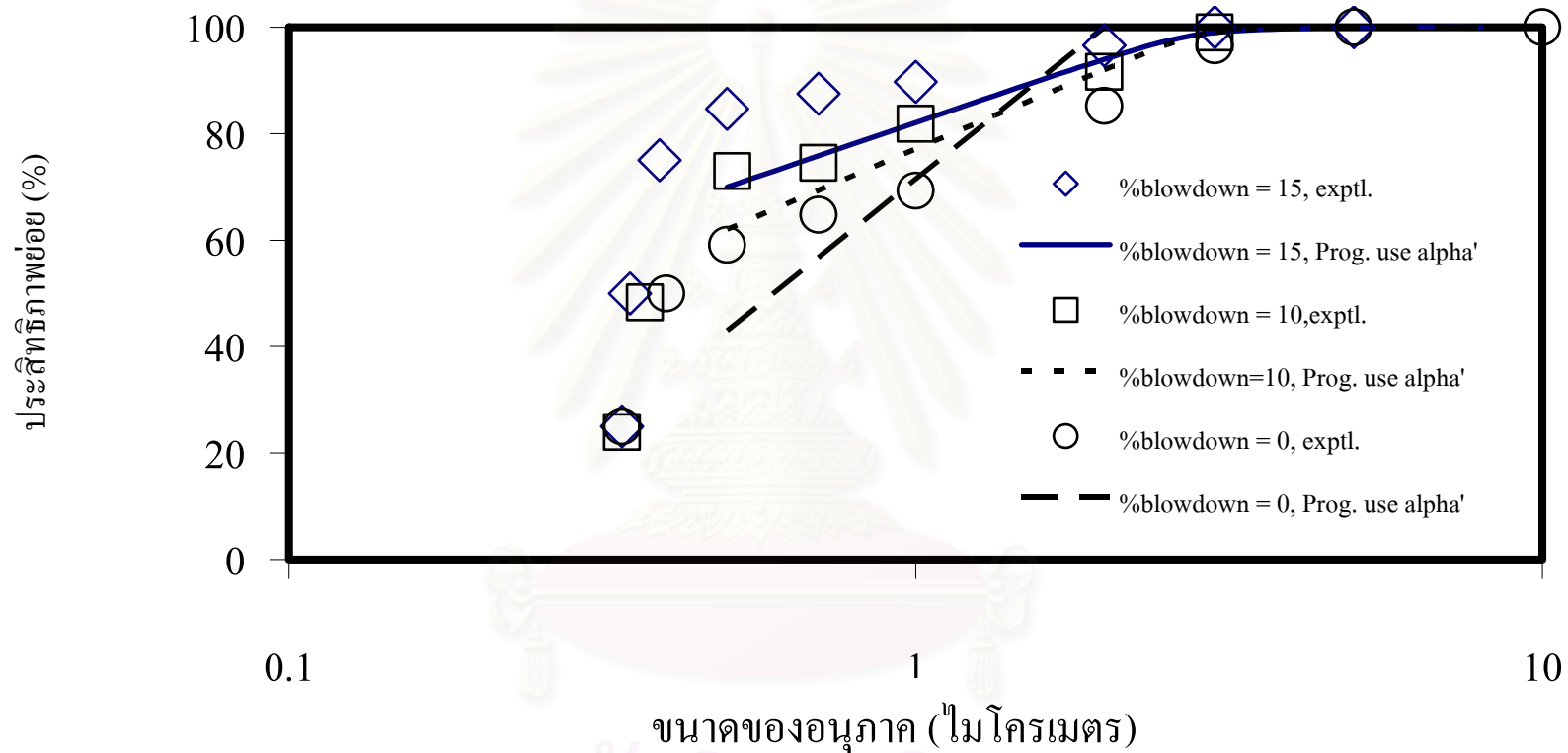
### 10.6 อิทธิพลของ%การเป่าลง (%blowdown) ต่อค่าประสิทธิภาพย่อย

จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อให้%การเป่าลง เพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มีเป็น 10% และ 15% เมื่อให้ความเร็วก๊าซขาเข้าคงที่สำหรับอนุภาคชนิดเดียวกัน พบว่า เมื่อ %การเป่าลง เพิ่มขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพการจับฝุ่นละเอียดของไซโคลนและโปรแกรมที่ประดิษฐ์สามารถทำนายผล ได้ถูกต้อง และสอดคล้องกับความเป็นจริง ดังแสดงในรูปที่ 10.26



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 10.26 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดอนุภาค CaCO<sub>3</sub> JIS No.7 ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่าขนาดอนุภาคเชิงประสิทธิผลที่คำนวณได้จากสมการถดถอยพหุนามอันดับสอง ( $\alpha'$ ) โดยความเร็วก๊าซขาเข้ามีค่าเท่ากับ 15 เมตร/วินาที เมื่อเปลี่ยนร้อยละอัตราการเป่าลง

## บทที่ 11

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 11.1 สรุปผลการวิจัย

- ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสชนิดที่ไม่มีการเป่าลง

จากผลการคำนวณพบว่า โมเดล Mothes และ Loffler (M-L) สามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้อย่างถูกต้องเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 6 ไมโครเมตร และทำนายค่าได้ต่ำกว่าผลการทดลองเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 6 ไมโครเมตร ทุกชุดข้อมูลการทดลอง ซึ่งปรากฏการณ์ที่ได้นี้มีรายงานอ้างอิงในวารสารด้วย (G.Ravi,2000)

โมเดล M-L แบ่งพื้นที่ในไซโคลนออกเป็น 4 ส่วนคือ บริเวณที่ก๊าซไหลเข้า (1), บริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยก๊าซมีทิศไหลลง (2), บริเวณอนุภาคเกิดการหลุดลอยกลับขึ้นมาใหม่ (3) และบริเวณที่อนุภาคถูกกำจัดโดยก๊าซมีทิศไหลขึ้น (4) อนึ่ง โมเดลได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านระหว่างบริเวณที่ 2 และ 4 อีกด้วย

อนึ่ง พฤติกรรมการไหลภายในไซโคลนของโมเดล M-L เป็นแบบลูกสูบ (plug flow) และเพื่อแก้ไขจุดอ่อนของโมเดล ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 8.1.5 ดังนั้น โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นจึงคำนวณหาค่าความเข้มข้นฝุ่นภายในไซโคลนตามเวลา เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว งานวิจัยนี้ได้ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 100 วินาที ระยะเวลาของเวลามีค่า 0.001 วินาที และจำนวนถึงในแต่ละบริเวณเป็น 5, 10, 1 และ 10 ตามลำดับ ในการคำนวณหาประสิทธิภาพย่อยการจับฝุ่นทุกชุดการทดลองของไซโคลนทั้งไม่มีและมีการเป่าลง

ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการจับฝุ่นของไซโคลน โดยใช้ข้อมูลทั้งการทดลองและผลจากโปรแกรมจากบทความของ Mothes และ บทความของ G.Ravi และค้นพบว่า โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยได้ค่อนข้างถูกต้อง แต่ที่อนุภาคขนาดเล็กกว่า 6 ไมโครเมตร โปรแกรมจะทำนายค่าได้ต่ำกว่าผลการทดลอง

เนื่องจาก โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นไม่ได้คำนึงถึงผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค ตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าสูงๆในกระแสก๊าซสกรปรกต่อค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน งานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาผลดังกล่าวในรูปของตัวชดเชยผลการเกาะรวมตัวกันของ

อนุภาค ( $\alpha$ ) โดยค่า  $\alpha$  จะนำไปคูณกับขนาดของอนุภาคที่สนใจเพื่อให้ได้ขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผล สำหรับนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพย่อยต่อไป

จากการทดลองสุ่มค่า  $\alpha$  พบว่า ค่า  $\alpha$  จะขึ้นกับขนาดของอนุภาค และความเร็วก๊าซขาเข้า ดังนั้นจึงได้สร้างสมการสหสัมพันธ์ดัดแปลงค่าดังสองในรูปแบบไร้หน่วยสำหรับอนุภาคในบทความอ้างอิงของ Mothes และ บทความของ G.Ravi และคณะ ดังนี้

$$\alpha' = 3.200 + 2.996 \times d_p' - 0.946 \times v_i' + 0.717 \times d_p'^2 + 1.062 \times d_p' \times v_i' - 0.062 \times v_i'^2$$

อนึ่งสมการข้างต้นนี้จะใช้ได้สำหรับขนาดของอนุภาคที่สนใจอยู่ในช่วง 0.5 – 6 ไมโครเมตร และความเร็วก๊าซเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $\alpha$  ที่ได้จากการทดลองสุ่มกับค่า  $\alpha'$  ที่ได้จากสมการข้างต้น พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสมการที่ได้สามารถคำนวณหาค่าตัวชดเชยผลการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคได้อย่างถูกต้อง

จากการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลจากสมการข้างต้นกับข้อมูลการทดลอง พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น และดีกว่าค่าที่คำนวณได้จากโมเดลของ M-L

#### ▪ ผลการประเมินค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสชนิดที่มีการเป่าลง

ผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับผลการทดลอง พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยในการจับอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000 ด้วยไซโคลนแบบที่มีการเป่าลงได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมโครเมตร แต่สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่านี้โปรแกรมจะคำนวณค่าได้ต่ำกว่าผลการทดลอง

อนึ่ง สาเหตุที่โปรแกรมคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยได้ต่ำกว่าผลการทดลองเกิดจากการที่โปรแกรมไม่ได้คำนึงถึงผลของการเกาะรวมตัวและอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค ตลอดจนความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าสูงๆ ในกระแสก๊าซสกปรกต่อค่าประสิทธิภาพย่อยของไซโคลน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้อธิบายผลดังกล่าวในรูปของตัวชดเชยผลการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค ( $\alpha$ ) ดังเช่นในหัวข้อข้างต้น

จากการทดลองสุ่มค่า  $\alpha$  พบว่า ค่า  $\alpha$  ขึ้นกับ ชนิดของอนุภาค, ขนาดของอนุภาค และความเร็วก๊าซขาเข้า ดังนั้นจึงได้สร้างสมการสหสัมพันธ์ดังนี้

สำหรับอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\alpha' = 4.051 - 13.009 \times d_p' + 2.7676 \times v_i' + 7.108 \times d_p'^2 + 0.870 \times d_p' \times v_i' - 1.092 \times v_i'^2$$

สำหรับอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000 มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ (10.1) ดังนี้

$$\alpha' = 3.0825 - 7.8899 \times d_p' + 2.086 \times v_i' + 5.260 \times d_p'^2 + 0.1092 \times d_p' \times v_i' - 0.9328 \times v_i'^2$$

อนึ่ง ทั้งสองสมการข้างต้นนี้จะใช้ได้สำหรับขนาดของอนุภาคที่สนใจอยู่ในช่วง 0.5 – 3 ไมโครเมตร และความเร็วก๊าซเฉลี่ยมีค่า 15 เมตร/วินาที

เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวชดเชยผลการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าสมการทั้งสองสมการสามารถคำนวณหา ค่าตัวชดเชยผลการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้อง

จากการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพย่อยในการกำจัดฝุ่นระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเมื่อคำนวณหาขนาดของอนุภาคเชิงประสิทธิผลจากสมการข้างต้นกับข้อมูลการทดลอง พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพย่อยได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น และคิดว่าค่าที่คำนวณได้จากโมเดลของ M-L ทั้งในกรณีอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  JIS No.7 และอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  #8000

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อความเร็วก๊าซขาเข้าสูงขึ้น ค่าประสิทธิภาพย่อยที่คำนวณได้จากโปรแกรมร่วมกับการใช้ตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง และเมื่อพิจารณาผลของร้อยละอัตราการเป่าลงต่อค่าประสิทธิภาพย่อยพบว่า เมื่อให้%การเป่าลงเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มีเป็น 10% และ 15% ขณะที่ความเร็วก๊าซขาเข้าคงที่สำหรับอนุภาคชนิดเดียวกัน จะได้ว่า เมื่อ%การเป่าลงเพิ่มขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพการจับฝุ่นละเอียดของไซโคลนและโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นร่วมกับการใช้ตัวชดเชยผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค ก็สามารถคำนวณผลได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากเมื่อมีการเป่าลงจะทำให้ความเร็วที่ใกล้กับบริเวณส่วนกรวยของไซโคลนมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการ

เป่าลง ดังนั้นในกรณีที่มีการเป่าลง อนุภาคขนาดเล็กที่ถูกจับบนผนังไซโคลนจะเคลื่อนที่ลงใกล้กับบริเวณส่วนกรวยของไซโคลน และมีโอกาสที่จะเข้าสู่ถังเก็บฝุ่นได้มากขึ้น

### 11.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

นำโปรแกรมนี้มาทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยของอนุภาคในภาคอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อสร้างสมการคำนวณราคาตัวเศษเศษผลของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคชนิดต่างๆ สำหรับทำนายค่าประสิทธิภาพย่อยในการจับอนุภาคได้หลายๆ ชนิด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- ปราโมทย์ เฑาะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- พีระพัฒน์ กฤตานุสรณ์. การพัฒนาเทคนิคประหยัดเวลาในการวิเคราะห์และเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยเทคนิคตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542 .
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ชิกาโอะ คานาโอกะ และจุฑามาศ เกตุทัต. มลภาวะอากาศ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). เอกสารสัมมนาเรื่อง เครื่องคัดแยกและเครื่องคัดแยกของแข็งออกจากของเหลว. กรุงเทพมหานคร:สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- General Mechanical Engineering Standards Committee. British Standard Methods for Determination of Particle Size Distribution Part 1, Guide to Powder Sampling (BS3406: Part 1: 1986). London: British Standard Institution, 1986.
- General Mechanical Engineering Standards Committee. British Standard Methods for Determination of Particle Size Distribution Part 2, Recommendations for Gravitational Liquid Sedimentation Methods for Powders and Suspension (BS3406: Part 2: 1984). London: British Standard Institution, 1984.
- G. Ravi, Santosh K. Gupta, and M. B. Ray. Multiobjective Optimization of Cyclone Separators using Genetic Algorithm. Industrial Chemical Engineering Research 39(2000): 4272-4286.
- Hideto Yoshida. Three-Dimensional Simulation of air Cyclone and Particle Separation by a Revised-Type Cyclone. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 109(1996): 1-12 .
- Hideto Yoshida, Hiroaki Masuda, Kunihiko Fukui, and Yuusuke Tokunaga. Particle Size Measurement with an Improved Sedimentation Balance Method and Microscopic Method Together with Computer Simulation of Necessary Sample Size. Advanced Powder Technology 12(2001) : 79-94.
- H. Mothes and F. Löffler. Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators. International Chemical Engineering 28(1988): 231-240.

- Iuliu Sorin Pop, Valeria Pop, Simona Cobzac, and Costel Sarbu. Use of Weighted Least-Squares Splines for Calibration in Analytical Chemistry. Journal of Chemical Information and Computer Science 40(2000): 91-98.
- Japanese Industrial Standards Committee Division Council on Basic Items. General Rule for the Determination of Particle Size Distribution by Sedimentation in Liquid (JIS Z8820 – 1990). Tokyo: Japanese Standards Association, 1991.
- Japanese Industrial Standards Committee Division Council on Basic Items. Determination of Particle Size Distribution by the Weight of Sedimentation in Liquid (JIS Z8822 – 1990). Tokyo: Japanese Standards Association, 1991.
- Keishi Gotoh, Hiroaki Masuda, and Ko Higasshitani. Powder Technology Handbook. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Marcel Dekker, 1997.
- Lunjun Bao, Jinyuan Mo, and Zuying Tang. The Application in Processing Analytical Chemistry Signals of a Cardinal Spline Approach to Wavelets. Analytical Chemistry 69(1997): 3053-3057.
- Michael G. Schimek. Smoothing and Regression Approaches, Computation, and Application. (n.p.): Wiley – Interscience Publication, 2000.
- Noel de Nevers. Air Pollution Control Engineering. 2<sup>nd</sup> edition. (n.p.): McGraw-Hill, 2000.
- P.W. Dietz. Collection Efficiency of Cyclone Separators. AIChE Journal 35(1981): 888-892.
- R. Clift, M. Ghadiri and A.C. Hoffman. A Critique of Two Models for Cyclone Performance. AIChE Journal 37(1991): 285-289.
- R.L. Salcedo. Collection Efficiencies and Particle Size Distributions from Sampling Cyclones – comparison of Recent Theories with Experimental Data. The Canadian Journal of Chemical Engineering 71(1993 ): 20-27.
- Terrence Allen. Particle Size Measurement. vol. 1. New York: Chapman & Hall, 1997.
- W.S. Kim and J.W. Lee. Collection Efficiency Model Based on Boundary-Layer Characteristics for Cyclones. AIChE Journal 43 (1997): 2446-2455.
- Zhigang Sun and Eva M. Sevick-Muraca. Inversion Algorithm for Particle Sizing with Photon Migration Measurement. AIChE Journal 47(2001):1487-1498.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมรัช เจิมศิริศักดิ์พงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ.2522 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยา จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาและสำเร็จการศึกษาที่คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2542 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใน พ.ศ.2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย