

การประเมินขนาดและรูปทรงของวัสดุเม็ดที่ได้จากเครื่องบดย่อยแบบฟันชนบ
โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปภาพ



นาย กษม สัตยาวิมลพิงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0603-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF SIZE AND SHAPE OF PARTICULATE MATERIALS GROUND
BY A PIN MILL USING THE IMAGE ANALYSIS TECHNIQUE

Mr. Kasom Sattayawuthipong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0603-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินขนาดและรูปร่างของวัสดุเม็ดที่ได้จากเครื่องบดย่อยแบบ พินซบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปภาพ
โดย	นายเกษม สัตยาวุฒิพงศ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก ดุริยะบรรเลง)

กษม สัตยาวิมุติพงษ์ : การประเมินขนาดและรูปร่างของวัสดุเม็ดที่ได้จากเครื่องบดแบบฟันขบโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปภาพ (EVALUATION OF SIZE AND SHAPE OF PARTICULATE MATERIALS GROUND BY A PIN MILL USING THE IMAGE ANALYSIS TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, 152 หน้า. ISBN 974-13-0603-2.

วิธีการวิเคราะห์รูปร่างของอนุภาคด้วยหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัลเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคได้ แต่มีข้อจำกัดคือหากทำการวิเคราะห์ด้วยมือ จะทำให้สามารถวิเคราะห์ห้ข้อมูลได้เพียงปริมาณน้อย อีกทั้งยังอาจเกิดความแตกต่างระหว่างบุคคล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประดิษฐ์โปรแกรมที่ประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพในการวิเคราะห์รูปร่างของอนุภาคด้วยหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัลซึ่งเป็นวิธีที่สามารถช่วยให้ทำการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นโดยที่ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น นอกจากนี้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมานี้ยังสามารถนำไปใช้ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรทได้ด้วย

จากการวัดค่าการกระจายของอนุภาคมาตรฐานด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ ได้แก่ การใช้วิธีวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท และเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลม เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิงพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบมัธยฐานที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพจะใหญ่กว่าค่าอ้างอิงตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น แต่มีลักษณะการกระจายตัวแบบเปอร์เซ็นต์โดยมวลที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้ทดลองแก้ไขขนาดด้วยการใช้ค่าคงที่การปรับแก้ ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบมัธยฐานที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมาตรฐาน

งานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการบดในเครื่องบดแบบฟันขบ (Pin Mill) ที่มีผลต่อคุณสมบัติการไหลตัวของอนุภาค และการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างภายหลังการบด โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการป้อนอนุภาควัตถุดิบ และขนาดช่องเปิดของแรง อนุภาควัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาในที่นี้คือ อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษพบว่า เมื่อใช้อัตราการป้อนวัตถุดิบสูงขึ้นความสามารถในการไหลตัวของอนุภาคภายหลังการบดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้แรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้นความสามารถในการไหลตัวของอนุภาคภายหลังการบดจะลดลง และเมื่อพิจารณารูปร่างของอนุภาค หากขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้นพบว่าความขรุขระของอนุภาคหรือค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวของอนุภาคลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4070206621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : FRACTAL / IMAGE ANALYSIS / SIZE MEASUREMENT / PIN MILL / CALCIUM CARBONATE

KASOM SATTAYAWUTHIPONG : EVALUATION OF SIZE AND SHAPE OF PARTICULATE MATERIALS GROUND BY A PIN MILL USING THE IMAGE ANALYSIS TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWACHAI CHARINPANITKUL, Dr.Eng. THESIS COADVISOR : PROF. WIWUT TANTHAPANICHAKOON , Ph.D., THESIS, 152 pp. ISBN 974-13-0603-2.

Fractal analysis is recognized as an applicable method for evaluating the shape of particle. However, it has limitation of consuming a great deal of man-hour and time, when analyzed manually. Additionally, such manual method may lead to different results according to human error of the one who carries out the analysis. Therefore, this work has paid attention to develop the application software of image analysis for analyzing particle shape using fractal theory. This software will enhance the analytical work to be faster and make the results more reliable. It will be also applicable for evaluating the feret's diameter of particulate materials.

By comparison of particle size distribution of JIS standard powders with those based on feret's diameter and equivalent circle diameter, it was found that the median diameter obtained from image analysis was bigger than the reference value but it was almost the same as that of the mass-based size distribution. The correction of mass-based size distribution, which is converted from number-based size distribution, using a certain value of calibration constant will lead to the median diameter close to the reference number

The present work also studied effect of two major operating variables; feed rate of raw material and aperture of screen, on shape and flowability of ground calcite using a pin mill. From the experimental results, it was found that the flowability of ground calcite increased as the feeding rate was increased because of the increasing of ground calcite size. For the effect of screen aperture it was found that as screen aperture became larger, the flowability of ground calcite became smaller. On the other hand, it was also found that the shape irregularity (which is represented by fractal dimension) increased as the screen aperture was increased.

Department Chemical Engineering

Student's signature

Filed of study Chemical Engineering

Advisor's signature

Academic year 2000

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้ทำวิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ
ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความช่วย
เหลือ ให้คำปรึกษาแนะนำและชี้แนะความรู้ความเข้าใจต่างๆ มากมายตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา
วิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยชนก วานิชศรี กรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำ
ตลอดจนแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงาน
พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ตลอดจนทุนอุดหนุนจากโครงการเมธีวิจัยอาวุโส (ศ.ดร.วิวัฒน์) สำนักงานสนับสนุนการ
วิจัย (สกว.) จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณที่มคณาจารย์นักวิจัย และห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีอนุภาคและ
กระบวนการวัสดุ ที่ได้ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้าศึกษา และทำงานวิจัย รวมทั้งช่วยเหลือจัดหาอุปกรณ์
พื้นที่ และเงินทุนสำหรับการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการทำงาน รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ซึ่งจะ
เป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณบริษัทปูนคุณภาพ จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุที่ได้คอย
ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ตลอดเวลาที่ศึกษาอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัว ที่มีความเข้าใจ ให้
กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
รายการสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	2
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้น.....	7
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์กราฟิก.....	7
2.1.1 คำจำกัดความ และความหมาย.....	7
2.1.2 ระบบพิกัดในภาพกราฟิก.....	8
2.1.3 การสร้างภาพดิจิทัล.....	9
2.1.4 กระบวนการจัดการกับภาพดิจิทัล.....	11
2.2 การประเมินลักษณะของรูปทรงอนุภาค.....	13
2.3 เรขาคณิตแฟรคทัล.....	14
2.3.1 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการ Hand and Divider.....	14
2.3.2 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการ Mendelbort D.....	15
2.3.3 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการบอกซ์เคาน์ติง.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การประเมินขนาดของอนุภาค.....	18
2.4.1 การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ.....	18
2.4.2 การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการร่อน.....	20
2.4.2.1 หลักการร่อนสารด้วยตะแกรงร่อน.....	20
2.4.2.2 ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้สำหรับการร่อน.....	21
2.5 ทฤษฎีการบดย่อย.....	23
บทที่ 3 โปรแกรมประเมินค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงอนุภาค.....	27
3.1 การคำนวณค่ามิติแฟรคทัลจากข้อมูล.....	27
3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	31
3.2.1 ขั้นตอนการรับข้อมูล.....	31
3.2.2 ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล.....	32
3.2.3 ขั้นตอนการประมวลผล.....	32
3.2.4 ขั้นตอนการแสดงผล.....	32
3.3 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและผลที่ได้.....	35
3.3.1 วิธีการทดสอบโปรแกรม.....	35
3.3.2 ผลการทดลอง.....	38
3.3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมที่ได้ และการแก้ไขโปรแกรม.....	42
บทที่ 4 โปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาค.....	43
4.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	43
4.1.1 ขั้นตอนการรับข้อมูล.....	44
4.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล.....	45
4.1.3 ขั้นตอนการแสดงผล.....	45
4.2 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและผลที่ได้.....	47
4.2.1 วิธีการทดสอบโปรแกรม.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ผลการทดสอบ.....	47
4.3 การทดลองวัดการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น.....	48
4.3.1 อนุภาคที่ใช้ทดลอง.....	48
4.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	51
4.3.3 ขั้นตอนในการทดลอง.....	52
บทที่ 5 การทดสอบบดย่อยอนุภาคด้วยเครื่องบดย่อยแบบฟันขบ.....	53
5.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง.....	53
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	56
5.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....	60
5.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	60
5.4.1 การบดย่อย และวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของอนุภาคที่ผ่านการบดย่อย.....	60
5.4.2 การวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคที่ผ่านการบดย่อย.....	61
บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	62
6.1 ผลการทดลองวัดการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยการวิเคราะห์ภาพ และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
6.1.1 เปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน และคล้ายคลึงกัน.....	64
6.1.2 การปรับแก้ค่าเมื่อต้องการค่าการกระจายขนาดแบบมวลงเป็นฐานจากวิธีการวิเคราะห์ภาพ.....	75
6.2 ผลการทดลองบดย่อยอนุภาค และการวิเคราะห์.....	80
6.2.1 ผลของสภาวะในการบดย่อยที่มีต่อการกระจายขนาดของผลิตภัณฑ์.....	80
6.2.2 ผลของสภาวะในการบดย่อยที่มีต่อลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	84
6.2.2.1 เปรียบเทียบผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อค่าดัชนีการไหลของผลิตภัณฑ์.....	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2.1 เปรียบเทียบผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อค่าดัชนีการไหลทะลักของ ผลิตภัณฑ์.....	84
6.2.3 ผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อรูปทรงของอนุภาค.....	87
6.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิติแฟรคทัลกับค่าดัชนีการไหล.....	93
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม.....	97
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	97
7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	99
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก เครื่องบดย่อยแบบฟันขบ.....	104
ภาคผนวก ข การทดสอบหาความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการกราดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ขนาดของอนุภาค.....	106
ภาคผนวก ค การทดสอบหาความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการกราดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ รูปทรงของอนุภาค.....	118
ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการทดลอง.....	123
ภาคผนวก จ การเปลี่ยนค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบบจำนวนเป็นฐานให้เป็น ขนาดของอนุภาคแบบมวลเป็นฐาน และการหาค่าคงที่การปรับแก้.....	149
ประวัติผู้วิจัย.....	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณของสารตัวอย่างสำหรับการร่อนสารด้วยตะแกรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว.....	22
3.1 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัล ของภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262.....	38
3.2 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัล ของภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500	39
3.3 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัล ของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613	40
3.4 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัล ของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667	41
3.5 ค่ามิติแฟรคทัล และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม Fractal ก่อนและหลังการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม	42
5.1 การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุดิบสำหรับการทดลอง.....	53
6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER I No.5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ต่างๆ.....	74
6.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER II No.4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ต่างๆ.....	74
6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER I No.5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพภายหลังแก้ไขด้วยค่าคงที่การปรับแก้.....	79
6.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER II No.4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพภายหลังแก้ไขด้วยค่าคงที่การปรับแก้.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสองมิติ 9
2.2	จุดภาคที่นิยมนำมาใช้กำหนดค่าพิกัด 9
2.3	ขั้นตอนการสร้างภาพดิจิทัล 10
2.4	ภาพดิจิทัลของอนุภาคซึ่งเป็นตัวแทนของภาพที่เป็นรูปภาพ ที่ได้มาจากการใช้สภาวะของแสงที่แตกต่างกัน และผลที่ได้หลังจากการทำการกำหนดเส้นขอบและกำจัดสิ่งรบกวน 11
2.5	ขั้นตอนการดำเนินการของการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาค 12
2.6	การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธี Hand and Devider 15
2.7	การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธี Mendelbrot D 15
2.8	การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธีบอกซ์เคาน์ติง 17
2.9	กราฟของ Richardson 17
2.10	ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ 19
2.11	ลักษณะช่องเปิดของตะแกรงร่อน 21
2.12	พฤติกรรมระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ของอนุภาคสาร 23
2.13	แสดงการแตกของอนุภาคสารในการบดย่อยขนาด 25
3.1	การถอดถอยแบบเชิงเส้นโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดข้อมูลที่กำหนดมาให้ 28
3.2	ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผล โปรแกรมวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของภาพอนุภาค 34
3.3	ภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262, ขนาดของภาพ 470x470 พิกเซล 36
3.4	ภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500, ขนาดของภาพ 432x432 พิกเซล 36
3.5	ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613, ขนาดของภาพ 400x400 พิกเซล 37
3.6	ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667, ขนาดของภาพ 480x480 พิกเซล 37
3.7	กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262 พบได้ค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.203 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500 พบได้ค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.376.....	39
3.9 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613 พบได้ค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.404.....	40
3.10 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667 พบได้ค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.496.....	41
4.1 การป้อนข้อมูลการสอบเทียบด้วยการกำหนดความยาวของเส้นตรง ตามขนาดของสเกลที่มีขนาด 2 เซนติเมตร	44
4.2 ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลโปรแกรมวิเคราะห์ขนาด ของกลุ่มอนุภาค.....	46
4.3 ภาพของกลุ่มของรูปทรงที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาค	47
4.4 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 (กำลังขยาย 132 เท่า)	50
4.5 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 (กำลังขยาย 66 เท่า)	50
4.6 ลักษณะของสเกลภายในสเตจไมโครมิเตอร์	51
5.1 การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุดิบสำหรับการทดลอง.....	54
5.2 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.056 (กำลังขยาย 45 เท่า).....	55
5.3 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.057 (กำลังขยาย 100 เท่า).....	55
5.4 เครื่องป้อนแบบสกรู (Screw feeder)	56
5.5 เครื่องผสมรูปตัววี (V-Shape mixer)	57
5.6 เครื่องร่อนแบบมาตรฐาน (Vibro Standard Screen Shaker)	58
5.7 เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester)	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเทคนิคการกระเจิงของแสง 63
6.2	การกระจายขนาดโดยใช้จำนวนพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ..... 66
6.3	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้จำนวนพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ..... 67
6.4	การกระจายขนาดโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ..... 68
6.5	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ 69
6.6	การกระจายขนาดโดยใช้จำนวนพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ..... 70
6.7	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้จำนวนพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ 71
6.8	การกระจายขนาดโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ..... 72
6.9	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ 73
6.10	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้..... 76
6.11	การกระจายขนาดโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้ 77
6.12	การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลพื้นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้..... 78
6.13	ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย ด้วยอัตราการใช้พลังงาน 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแ่ง 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร 81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย ด้วยอัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร 81
6.15	ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย ด้วยอัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร 82
6.16	ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย ด้วยอัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร 82
6.17	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Geometric Mean Diameter) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยด้วยสภาวะเงื่อนไขต่างๆ 83
6.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ ที่ช่องเปิดของแร่ขนาด 0.3 และ 0.7 มม. 85
6.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 และ 164 ก.ก./ช.ม. 85
6.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลทะเล็กของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ ที่ช่องเปิดของแร่ขนาด 0.3 และ 0.7 มม. 86
6.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลทะเล็กของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบต่างๆ 114 และ 164 ก.ก./ช.ม. 86
6.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยกับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 ก.ก./ช.ม..... 88
6.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยกับขนาดช่องเปิดของแร่ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 ก.ก./ช.ม..... 88
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยที่ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3 ม.ม..... 89
6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยที่ขนาดช่องเปิด 0.7 ม.ม..... 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ/θ_0 และค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการบดย่อยกับขนาดช่องเปิดของแรงที่อัตราการบด 164 ก.ก./ช.ม.....	92
6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิติแฟรคทัลกับค่าดัชนีการไหล	93
6.28 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 63 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.159 (กำลังขยาย 500 เท่า).....	94
6.29 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 63 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.141 (กำลังขยาย 1,000 เท่า).....	94
6.30 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 ม.ม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.070 (กำลังขยาย 350 เท่า).....	95
6.31 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 164 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 ม.ม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.057 (กำลังขยาย 350 เท่า).....	95
6.32 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 ม.ม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.005 (กำลังขยาย 350 เท่า).....	96
6.33 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย ที่อัตราการบด 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.7 ม.ม. มีค่ามิติแฟรคทัล เท่ากับ 1.004 (กำลังขยาย 350 เท่า).....	96

รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (ตารางเซนติเมตร)
d_1	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสารตั้งต้น (ไมโครเมตร)
d_2	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสารหลังจากการย่อยขนาด (ไมโครเมตร)
D	คือ ค่ามิติแฟรคทัล (-)
D_s	คือ ค่ามิติแฟรคทัลของผิวอนุภาค (-)
E	คือ พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์)
E^*	คือ พลังงานที่ใช้ในการเกิดอนุภาคสารใหม่ d_2 (กิโลวัตต์)
F	คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ (ไดน์)
L_0	คือ ความยาวของวัตถุเริ่มต้น (เซนติเมตร)
L_s	คือ ความยาวของวัตถุหลังจากให้แรงแก่วัตถุ (เซนติเมตร)
$L(\lambda)$	คือ ความยาวของเส้นรอบรูป (-)
Q	คือ จำนวนมวลอนุภาคสาร (ตัน)
x	คือ ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)
Y	คือ ค่าโมดูลัสของยัง (ไดน์/ตารางเมตร)
λ	คือ ขนาดของไม้บรรทัด (-)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายประเภท เช่น อาหาร, ยา, เครื่องสำอาง, เซรามิก และ เคมี มีความจำเป็นที่ต้องใช้อนุภาคของฝุ่นผงที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับการนำไปใช้งาน ในกระบวนการผลิตดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุอนุภาคไม่ว่าในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ หรือการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ในอุตสาหกรรมยาการกระจายขนาดของเม็ดแกรนูลจะมีผลกระทบต่อความละเอียดของเนื้อยา ซึ่งจะส่งผลต่อการปลดปล่อยของตัวยา เนื่องจากการที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันสำหรับอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์การกระจายขนาด และขนาดเฉลี่ยของผงปูนซีเมนต์จะมีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ กล่าวคือหากผงปูนซีเมนต์มีความละเอียดสูงหรือมีขนาดเฉลี่ยเล็กจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีความแข็งแรง นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคยังมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตอีกด้วย อาทิเช่น ความต้านทานการกรอง และโอกาสการระเบิดของฝุ่นผงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเล็กลง อย่างไรก็ตามนอกจากรูปทรงของอนุภาคแล้วขนาดและรูปทรงของอนุภาคนั้นจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติการไหลของวัสดุผง ซึ่งจะส่งผลทำให้การออกแบบอุปกรณ์จำพวกเครื่องบดบดและสอบเปอร์ มีความแตกต่างกัน

วัสดุผงที่มีความละเอียดนั้นจะได้มาจากการผ่านกระบวนการบดย่อยโดยที่คุณภาพของอนุภาคที่ได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการบดย่อยที่มีอยู่อย่างมากมาย ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีผลต่อการกระจายตัวของขนาดและรูปทรงของอนุภาคที่ได้จากการบดย่อยแตกต่างกันไป ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุผงอันได้แก่ ขนาด, รูปทรง และคุณสมบัติการไหลของวัสดุผงที่ได้จากการบดย่อยเนื่องจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น โดยอุปกรณ์บดย่อยที่พิจารณาใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่องบดแบบฟันขบเพราะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากมีความสามารถในการบดย่อยสารได้หลายชนิดทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของอนุภาคให้มีขนาดเล็ก (< 50 ไมครอน)ได้ในเวลาสั้น ประกอบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคแคบ ประการสุดท้ายอุปกรณ์ประเภทนี้มีความแข็งแรงทนทาน และบำรุงรักษาได้ง่าย

วิธีการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาคที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายวิธี และหลักการของเราชนิดแฟรคทัล เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาค (Schwarz และ Exner, 1980) แต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดกล่าวคือถ้าหากทำการวิเคราะห์ด้วยมือจะส่งผลทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้เพียงปริมาณน้อย อีกทั้งยังอาจเกิดความแตกต่างระหว่างบุคคลที่ทำการวิเคราะห์ได้ในบางครั้ง ซึ่งจะส่งผลทำให้ข้อมูลขาดความน่าเชื่อถือ ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้ประดิษฐ์โปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เรขาคณิตแฟรคทัลของรูปทรงของอนุภาคซึ่งจะสามารถช่วยให้ทำการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณของข้อมูลเพิ่มขึ้น และผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น อนึ่งซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการประเมินขนาดของวัสดุอนุภาคได้อีกด้วย

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคและรูปทรงอนุภาคโดยใช้เครื่องบดย่อยแบบฟันขบ
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ขนาดและรูปทรงอนุภาค โดยใช้ร่วมกับระบบ Image analysis

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยของการบดย่อยที่มีผลต่อรูปทรงของอนุภาค และการกระจายขนาดของอนุภาคในกระบวนการบดย่อยแบบต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องบดย่อยแบบฟันขบ
 - 1.1) ขนาดรูเปิดของตะแกรงในเครื่องบดในช่วง 0.3-1 มิลลิเมตร
 - 1.2) อัตราการบดอนุภาคในช่วง 0-200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 - 1.3) ชนิดของอนุภาคที่ทำการศึกษา คือ แคลเซียมคาร์บอเนต
2. นำระบบการวิเคราะห์ภาพซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้วิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคที่ได้จากการบดย่อย

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ งานวิจัยที่เกี่ยวกับเรขาคณิตแฟรคทัลและการประยุกต์ใช้ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพในการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างอนุภาค

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเรขาคณิตแฟรคทัลและการประยุกต์ใช้ มีดังนี้

Suzuki และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าดัชนีแบบต่างๆ สำหรับอธิบายรูปร่างของอนุภาคในเชิงปริมาณ โดยการนำข้อมูลรูปภาพของอนุภาคตัวอย่าง 28 ชนิดที่แตกต่างกัน อาทิเช่น glass beads, crushed glass, ผงอลูมิเนียม, ผงแคลเซียมคาร์บอเนต, ซีเมนต์, แป้ง ที่ได้มาจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) หรือกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) แล้วนำไปทำการดิจิทัล และเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำไปทำการหาค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคตัวอย่างด้วยวิธี Hand and divider เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ Wadell's working sphericity และ ค่าเซอร์คิวลาริตี (Circularity) ที่ได้จากรูปที่เป็นภาพเงาของอนุภาครูปเดียวกัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่ามิติแฟรคทัลของตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับค่าเซอร์คิวลาริตี มากกว่าค่า Wadell's working sphericity ทั้งนี้เนื่องจากค่ามิติแฟรคทัล และ ค่าเซอร์คิวลาริตีเป็นดัชนีชี้ให้เห็นถึงความขรุขระของผิวอนุภาคได้

Graf (1991) ได้ทำการศึกษาถึงขอบเขตจำกัดของความละเอียดของความยาวจำเพาะที่ใช้ในการวิเคราะห์ของค่ามิติแฟรคทัล โดยได้ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ของเม็ดดินที่มาจากดวงจันทร์มาทำการหาค่ามิติแฟรคทัลด้วยการใช้ความยาวจำเพาะ 3 ขนาดคือ 0.028, 0.003 และ 0.0008 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอร์เรท (Ferret's diameter) พบว่าการใช้ค่าความยาวจำเพาะที่เล็กที่สุดที่มีขนาด 0.028 จะทำให้ได้ค่ามิติแฟรคทัลเพียงหนึ่งค่า ในขณะที่ค่าความยาวจำเพาะ 0.003 จะให้ค่ามิติแฟรคทัลถึง 2 ค่า ซึ่งค่าหนึ่งเป็นค่าของ structure และอีกค่าหนึ่งเป็นค่ามิติแฟรคทัลของ texture ของแฟรคทัล สำหรับการใช้ความยาวจำเพาะ 0.0008 จะทำให้ได้ค่ามิติแฟรคทัลที่แปลความหมายยาก

Li และ Xu (1993) ได้ทำการทดลองบดวัตถุ 4 ชนิด คือ หินอ่อน, ควอทซ์, ถ่านหิน และ dolerite ด้วยการใช้ crusher, ball mill และ rod mill แล้วหาค่าของมิติแฟรคทัลของอนุภาคที่ถูกบดเหล่านั้น จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่ามิติแฟรคทัลที่ได้ กับตัวเลขยกกำลังในสมการอนุพันธ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการลดขนาดและขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับการบดถ่านหินและควอทซ์ พบว่าได้ค่ามิติแฟรคทัลในช่วงเดียวกับค่าที่ได้จาก Charles (1957) โดยสมการที่ได้คือ $dE = -C dx/x^{4-D_s}$ โดยที่ E คือพลังงานที่ใช้ในการบด, C คือค่าคงที่, x คือ ขนาดของอนุภาค และ D_s คือ ค่า มิติแฟรคทัลของผิวอนุภาค

Brown และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากเครื่องบด 3 ชนิดที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดด้วยการใช้วิธีการหาค่ามิติแฟรคทัล และ shape factor ซึ่งได้แก่ ค่าอัตราส่วนด้านกับค่าเชอควิลาริตี พบว่า ค่ามิติแฟรคทัลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องบดต่างชนิดกันจะมีค่าต่างกัน โดยแฮมเมอร์มิลล์ (hammer mill) จะมีค่ามิติแฟรคทัลมากที่สุด รองลงมาคือ โรลล์ครัชเชอร์ (roll crusher) และ บอลล์มิลล์ (ball mill) ตามลำดับ ส่วนค่า shape factor จะไม่มีความไว (sensitive) เพียงพอที่จะให้เห็นความแตกต่างของรูปร่างอย่างมีนัยสำคัญ

Oshima และคณะ (1995) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดของเครื่องบด 5 ชนิด ที่มีต่อค่าคุณสมบัติการไหล (flowability) ของอนุภาคที่ถูกบด โดยได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการไหลกับรูปทรงของอนุภาค โดยรูปทรงของอนุภาคที่พิจารณาในที่นี้ คือ ค่าเชอควิลาริตี, ค่า Wadell's working sphericity, ค่ามิติแฟรคทัลของเส้นรอบรูปของอนุภาคและค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งพบว่าค่าคุณสมบัติการไหลจะขึ้นกับค่าเชอควิลาริตี, ค่ามิติแฟรคทัล ของเส้นรอบรูปของอนุภาค และค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area ratio) มากกว่าค่า Wadell's working sphericity ซึ่งจากผลที่ได้นี้แสดงว่า ความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) ของอนุภาคจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติการไหลของอนุภาคมากกว่าความเป็นทรงกลมของอนุภาค กล่าวคือ ถ้าค่าความขรุขระของพื้นผิวของอนุภาคมีค่าต่ำ ค่าความสามารถในการไหลจะมีค่าสูง เนื่องจากแรงเสียดทานของพื้นผิว (surface friction) ของแต่ละอนุภาคมีค่าลดลง

Foroutan-pour (1999) ได้พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการบอชเคาน์ตติ้ง (box-counting) ขึ้นมาและได้ใช้ในการศึกษาหาวิธีการเตรียมรูปภาพก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการบอชเคาน์ตติ้ง และได้ทำการหาขนาดของช่องตาราง (box size) ที่เหมาะสมสำหรับโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ามิติแฟรคทัล โดยภาพที่ใช้ในการทดลองเป็น ภาพที่มีลักษณะเป็นแฟรคทัล 4 ชนิดคือ Koch curve, Koch coastline, Koch boxe และ Cross-tree จากผลการศึกษาพบว่าการทำ Skeleton กับภาพก่อนที่จะทำการวิเคราะห์เพื่อให้เหลือเพียงเส้นขอบรูปร่างจะให้ได้ผลที่ดีกว่าวิธีการบอชเคาน์ตติ้ง เนื่องจากสิ่งที่มีผลต่อค่ามิติแฟรคทัลคือเส้นขอบรูปร่างเท่านั้น และจากการวิเคราะห์หลายๆ กรณีขนาดของช่องตารางที่ใหญ่ที่สุดที่เหมาะสม คือ 25 % ของด้านที่สั้นที่สุดของภาพแต่อย่างไรก็ตามสำหรับภาพที่มีสิ่งรบกวน หรือรูปแบบที่มีการกระจายตัวเต็มภาพจะต้องการขนาดจะต้องการขนาดของช่องตารางที่เล็กลง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปภาพในการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคมีดังนี้

Kutsuwada และคณะ(1991) ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโหนดเนอร์ และตัวพา (carrier) ที่ได้จาก 3 วิธีการ คือการใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ (optical microscope) ที่เชื่อมต่อกับระบบวิเคราะห์ภาพ, การวิเคราะห์ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีของ Millikan ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถหาค่าของประจุไฟฟ้า และรัศมีของอนุภาคเดี่ยวได้ในเวลาเดียวกัน และการวิเคราะห์โดยใช้ Laser Doppler โดยชนิดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการหาด้วยกล้องจุลทรรศน์คือเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับภาพเงาของอนุภาค (equivalent circle diameter) และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ใน Laser Doppler คือ เส้นผ่านศูนย์กลางแบบ aerodynamic ผลการทดลองที่ได้พบว่า การกระจายของขนาดของอนุภาคที่ได้จากวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีของ Millikan

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Zingerman และคณะ(1992) ได้ศึกษาถึงผลของการใช้กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ที่มีต่อการวัดขนาดของอนุภาคด้วยระบบที่ใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ที่เชื่อมต่อกับระบบการวิเคราะห์ภาพ โดยการศึกษาที่ใช้การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเร็ท (Feret's diameter) และอนุภาคที่ใช้คือ เม็ด polystyrene-divinylbenzene(DVB) มาตรฐานที่เป็นทรงกลม และได้รับการรับรองขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ผลการทดลองด้วยการใช้เม็ด DVB มาตรฐานขนาด 9.87 ไมครอนขนาดเดียวพบว่า การใช้กำลังขยายที่สูงขึ้นไม่ได้ทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะดังนี้คือ ที่กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ขนาด 12.5, 63.5, 125 และ 335 เท่า จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้คือ 20.3, 0.7, 3.7 และ 10.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการทดลองใช้เม็ด DVB มาตรฐานที่มีช่วงของขนาดอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมครอน ถ้าใช้ขนาดของกำลังขยายที่เหมาะสมจะทำให้ได้ความแม่นยำมากกว่า 93 เปอร์เซ็นต์ โดยตัวอย่างที่มีการกระจายขนาดที่กว้างนั้นการเลือกขนาดของกำลังขยายที่ทำให้อนุภาคที่ใหญ่ที่สุดอยู่ภายในกรอบของภาพ และให้ขนาดเกือบพอดีกับกรอบของภาพจะให้ความแม่นยำสูงที่สุด

Broyles และคณะ (1996) ได้ทำการพัฒนาระบบการวิเคราะห์รูปร่างอย่างรวดเร็วขึ้นบนพื้นฐานของการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อใช้ในการหาอัตราส่วนอีลองเกชัน (elongation ratio) และ สัดส่วนความแบน (flatness ratio) แทนการวัดด้วยการใช้ก้ามวัด (caliper) ที่ออกแบบมาพิเศษซึ่งเดิมการใช้ก้ามวัด ในการวิเคราะห์ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงต่อหนึ่งตัวอย่าง แต่ระบบที่ใช้การวิเคราะห์ภาพ นี้จะใช้เวลาเพียง 10 นาที โดยที่ผลที่ได้ออกมาเหมือนกับการวัดโดยวิธีการใช้ก้ามวัด นอกจากนั้นทางคณะได้เพิ่มการหาความขรุขระของพื้นผิว (surface irregularity) และ ความหยัก (jaggedness) โดยไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในกระบวนการจัดการภาพเพิ่มขึ้น แต่ผลของการทดลองที่ได้ยังไม่มี ความสอดคล้องกับรูปร่างของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้น

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์กราฟิก

2.1.1 คำจำกัดความ และความหมาย

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับคอมพิวเตอร์กราฟิกจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน และให้เข้าใจในความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคอมพิวเตอร์กราฟิกมากขึ้นจึงขออธิบายคำจำกัดความ และความหมายของคำเฉพาะต่างๆ ที่จำเป็นดังนี้

พิกเซล (Pixel) ย่อมาจาก PIcture ELeMENT หมายถึง จุดที่เล็กที่สุดที่รวมตัวกันเป็นภาพ จอภาพที่แสดงภาพที่มีจุดเล็กๆ มากจะยิ่งทำให้ภาพคมชัด

บิตแมป (Bitmap) หมายถึง ภาพกราฟิกที่ประกอบด้วยจุดเล็กๆ ของแสง ซึ่งเรียกว่า “พิกเซล” รวมตัวกันจนภาพที่มีจำนวนพิกเซลมาก ก็ยิ่งแสดงภาพที่คมชัดมาก

อัตราส่วนระหว่างแนวตั้ง และแนวนอน (Aspect ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนของภาพของสิ่งหนึ่งสิ่งใด โดยปกติใช้ในการสร้างภาพคอมพิวเตอร์

การประมวลผลภาพ (Image processing) หมายถึง เทคนิคในการประมวลผลที่มีข้อมูลเป็นภาพ คอมพิวเตอร์สามารถอ่านภาพแล้วแปลงเป็นตัวเลข แล้วจึงสั่งให้กระทำการอย่างหนึ่งอย่างใดที่จะทำให้ภาพนั้นอำนวยความสะดวกแก่ผู้ดูมากขึ้น สวยมากขึ้น เป็นต้นว่าปรับขยายบางส่วน จัดให้หมุนดูในทิศทางต่างๆ โดยรอบ หรือเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์บางอย่าง

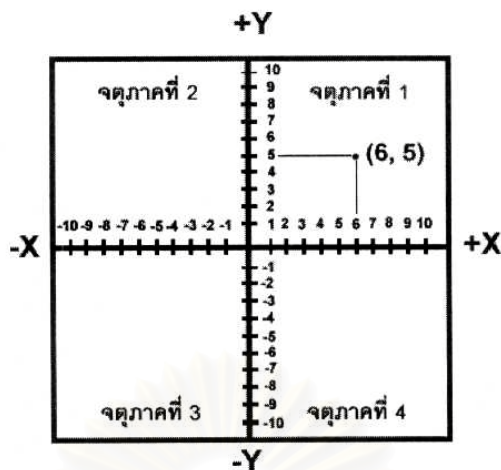
ตัวแปลงเป็นเลข (Digitizer) หมายถึง อุปกรณ์ที่แปลงข้อมูลชนิดแอนะล็อก (analogue) เป็นข้อมูลชนิดดิจิทัล(digital)หรือข้อมูลเชิงตัวเลข

ภาพดิจิทัล (Digital image) คือข้อมูลของรูปภาพที่ถูกเก็บอยู่ในลักษณะตัวเลข $P(x,y)$ หรือ พิกเซล ข้อมูลดังกล่าวสามารถแสดงในลักษณะของของเวกเตอร์ $P(R,G,B,x,y)$ ซึ่งบอกระดับค่าของสีแดง, สีเขียว และ สีน้ำเงิน และตำแหน่งของจุดข้อมูลด้วยคู่ลำดับ x และ y ในกรณีของภาพที่เป็นขาวดำ จะใช้ค่าเกรย์สเกล (GL) สำหรับแต่ละพิกเซลซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยชุดค่า $P(GL,x,y)$ โดยแต่ละค่าของภาพสามารถกำหนดในลักษณะของฟังก์ชันต่างๆ ด้วยการให้ปริมาณสเกลาร์, เวกเตอร์ หรือเมทริกซ์

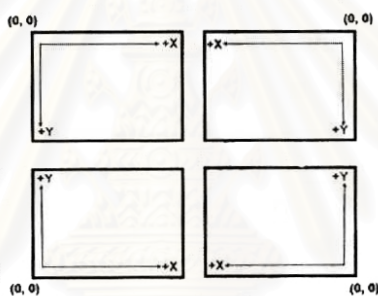
2.1.2 ระบบพิกัดในภาพกราฟิก

รูปแบบการแสดงผลบนพื้นที่สองมิติที่นำมาใช้กับระบบคอมพิวเตอร์กราฟิก ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักคณิตศาสตร์ และนักปรัชญาชื่อ Rene Descartes ดังนั้นจึงได้เรียกระบบพิกัดดังกล่าวว่า ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) ซึ่งเป็นวิธีแสดงตำแหน่งพิกัดจุดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นที่ลากตั้งฉากกันของแกน x , y และ z ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนประกอบด้วยพื้นที่ ซึ่งเกิดจากความกว้างและความยาว (รูปที่ 2.1) อาจกล่าวได้ว่า เป็นผิวหน้าของกระดาดขาวแผ่นหนึ่ง ที่นำมาหาจุดศูนย์กลางด้วยการใช้เส้นทแยงมุมตัดกัน จากนั้นจึงลากเส้นตั้งและเส้นนอนตัดผ่านจุดกึ่งกลางนั้น แกนเส้นนอนเรียกว่าแกน x ตัดฉากกับแกนเส้นตั้งเรียกว่าแกน y ที่จุดกำเนิด (origin) ในแต่ละแกนจะมีมาตราแบ่ง ซึ่งจะมีค่าเริ่มจากศูนย์ที่จุดกำเนิด และเรียงลำดับเรื่อยไปจนถึงปลายสุดของแกนทั้งสองด้านด้วยค่าที่เป็นบวกและลบ แต่ละแกนจะถูกแบ่งออกเป็นมาตราที่เท่าๆ กัน จึงทำให้ได้ระยะห่างระหว่างมาตราตามแกนตั้งและแกนนอนเท่ากันทั้งหมด เราจึงสามารถรู้ตำแหน่งของจุดและวัตถุที่อยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียนได้ โดยการอ่านค่าจากมาตราบนแกน x แกน y นอกจากนี้การที่แกน x และแกน y ตัดกันบนพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้รูปสี่เหลี่ยมนั้นถูกแบ่งออกเป็นสี่ส่วนเท่า ๆ กัน เรียกว่า จตุภาค (quadrant) โดยจตุภาคที่นำมากำหนดพิกัดในคอมพิวเตอร์กราฟิก นั้น คือจตุภาคที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งบนซ้าย โดยมีแกน x บวกชี้ไปทางขวา และแกน y บวกชี้ลงล่าง (รูปที่ 2.2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสองมิติ



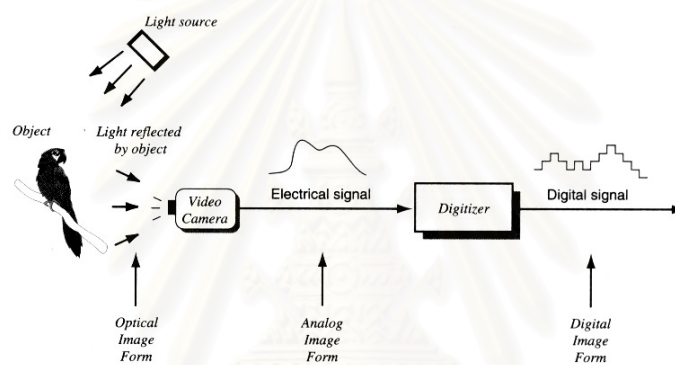
รูปที่ 2.2 จุดภาคที่นิยมนำมาใช้กำหนดค่าพิกัด

2.1.3 การสร้างภาพดิจิทัล

ก่อนที่จะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจัดการภาพ จะต้องมีการเปลี่ยนข้อมูลภาพที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความเข้มแสงที่ต่อเนื่อง (image function; $f(x,y)$) ให้เป็นข้อมูลภาพที่เป็นตัวเลขจำนวนนับก่อน โดยใช้แนวความคิดในการจัดตัวเลขชุดนี้ให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวเลขที่เป็นตัวแทนกลุ่ม ซึ่งจะจัดเป็นแถวลำดับ (array) หรือเมทริกซ์ ที่มีระยะห่างเท่าๆกัน โดยมีแถว (row) และสดมภ์ (column) เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของจุดที่อยู่ในภาพ ส่วนย่อย (element) ของเมทริกซ์จะถูกเรียกว่า พิกเซล

ภาพดิจิทัลได้มาจากการแปลงรูปของสัญญาณระหว่างแอนะล็อกกับดิจิทัล จากรูปแบบของภาพที่เป็นรูปภาพให้เป็นข้อมูลที่เป็นเมทริกซ์ซึ่งง่ายต่อการจัดการด้วยการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์(รูปที่ 2.3) โดยเริ่มต้นจากภาพของวัตถุหรืออนุภาคจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกล้องวิดีโอหรืออุปกรณ์อื่นๆ เนื่องจากสัญญาณนี้เกิดจากการเปลี่ยนของแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุเป็นสัญญาณไฟฟ้าจึงเรียกสัญญาณรูปแบบนี้ว่า “สัญญาณแบบแอนะล็อก (analog signal form)”

ต่อจากนั้นภาพที่อยู่ในรูปแบบแอนะล็อกจะถูกแปลงเป็นข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัล คุณภาพของภาพที่ได้จากกระบวนการแปลงรูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างแต่สิ่งแรกคือคุณภาพของระบบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในกระบวนการนี้ โดยในทางทฤษฎีแต่ละค่าของภาพดิจิทัล $P(R,G,B,x,y)$ หรือ $P(GL,x,y)$ จะต้องสอดคล้องกับค่าเดียวกันๆ ของภาพที่เป็นรูปภาพ โดยภาพดิจิทัลจะต้องถูกพิจารณาค่ายแบบจำลอง (model) ของภาพที่เป็นรูปภาพหรือก็คือแบบจำลองของวัตถุที่เป็นของจริง ภาพดิจิทัลจะให้ข้อมูลในรูปแบบของตัวแทนลักษณะ 2 มิติ คุณภาพของภาพจะขึ้นอยู่กับจำนวนของพิกเซลที่ได้มาจากการทำการแปลงเป็นเลขจำนวนนับ (digitization) เนื่องจากจำนวนพิกเซลที่มากจะให้ความคมชัดที่สูง และจะมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากขึ้น

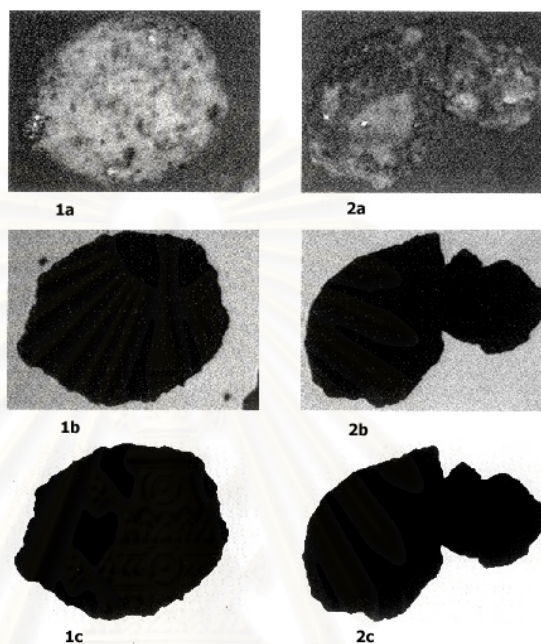


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการสร้างภาพดิจิทัล

ในการหารูปร่างลักษณะของอนุภาคจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพเป็นจำนวนมากจึงต้องใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่มีสมรรถนะสูงเพียงพอ สิ่งที่มีความสำคัญมากคือขั้นตอนของการสร้างภาพควรจะมีการกำหนดเป็นมาตรฐาน เช่นควรมีวิธีการกำหนดวิธีการฉายแสงให้ชัดเจน โดยในทางปฏิบัติถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของการสร้างภาพก็สามารถเปลี่ยนลักษณะของรูปภาพได้ และสิ่งที่จะตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การลดคุณภาพและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้

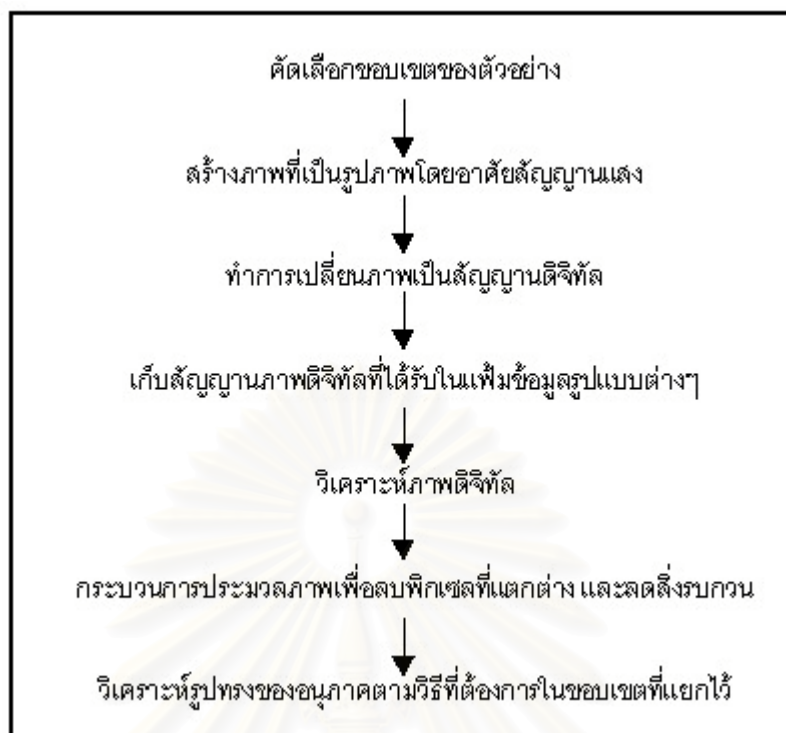
2.1.4 กระบวนการจัดการกับภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัลปกติจะประกอบด้วยเมทริกซ์ 3 ชุดสำหรับภาพที่เป็นสี และชุดเดียวสำหรับรูปขาวดำ เพื่อที่จะทำได้ข้อมูลที่เหมาะสมจะต้องมีการจัดการกับเมทริกซ์เหล่านั้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพดิจิทัลของอนุภาคสองอนุภาคซึ่งเป็นตัวแทนของภาพที่เป็นรูปภาพที่ได้มาจากการใช้สภาวะของแสงที่แตกต่างกัน (1a และ 2a เป็นการให้แสงจากทางด้านบน 1b และ 2b เป็นการให้แสงจากทางด้านล่าง) และผลที่ได้หลังจากการทำกรกำหนดเส้นขอบและกำจัดสิ่งรบกวน (1c และ 2c)

โดยทั่วไปชุดของเมทริกซ์ที่แสดงภาพดิจิทัลยังไม่สามารถนำมาดำเนินการต่อได้ทันที เพราะชุดของข้อมูลเหล่านี้ยังประกอบด้วยสิ่งรบกวน, ความผิดพลาดของระบบและข้อมูลของสิ่งที่ไม่จำเป็นต้องใช้ในการศึกษาหาลักษณะของอนุภาคทำให้ต้องมีขั้นตอนการปฏิบัติกับชุดของข้อมูลก่อน เช่น ทำการกรองข้อมูล เพื่อลบพิกเซลที่แตกต่างและลดสิ่งรบกวน สำหรับขั้นตอนการดำเนินการของการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาคสามารถสรุปได้โดยสังเขปในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการดำเนินการของการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาค

2.2 การประเมินลักษณะของรูปทรงอนุภาค

รูปทรงของอนุภาคเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการทำนายพฤติกรรมของอนุภาค และผู้เฝ้าฝง เนื่องจากมีอิทธิพลต่อรูปแบบของการไหล, การทำปฏิกิริยา, การแตกหัก, การรวมเป็นกลุ่มก้อน และการฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคและผู้เฝ้าฝงเหล่านั้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงได้มีผู้สนใจทำการศึกษาและนำเสนอเทคนิคในการประเมินลักษณะรูปทรงของอนุภาคจำนวนมากมาย ซึ่งเทคนิคเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การประเมินรูปทรงพฤติกรรมของอนุภาค (behavioral analysis) และการวิเคราะห์ภาพของอนุภาค (image analysis) (Clark, 1986)

1) การประเมินรูปทรงจากพฤติกรรมของอนุภาค

ในการประเมินลักษณะรูปทรงของอนุภาคด้วยวิธีนี้ โดยทั่วไปอนุภาคจะถูกนำไปวินิจฉัยพฤติกรรมของอนุภาคในระบบทางกายภาพโดยใช้อุปกรณ์บางอย่าง ตัวอย่างเช่นในกรณีของอนุภาคจำนวนมาก โดยทั่วไปจะสามารถวินิจฉัยความแตกต่างของรูปทรงได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนจานเอียง หรือในกรวยที่มีความลาดเอียงและกำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง แม้ว่าวิธีการหาพฤติกรรมอนุภาคเหล่านี้สามารถแยกแยะอนุภาคได้ในทางกายภาพและให้ข้อมูลบางอย่างเกี่ยวกับความแตกต่างของรูปทรงของอนุภาค แต่วิธีเหล่านี้ไม่สามารถให้รายละเอียดเพื่อที่จะใช้ในการบรรยายรูปทรงของอนุภาคได้ดังเช่นที่เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสามารถทำได้

2) การวิเคราะห์ภาพของอนุภาค

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ การตรวจสอบภาพในลักษณะสองมิติหรือภาพเงาของอนุภาค เทคนิคในช่วงแรกๆ จะทำการวัดสัดส่วนอย่างง่าย ๆ ของอนุภาค อาทิเช่น ค่าอัตราส่วนระหว่างแนวตั้ง และแนวนอน หรือค่าอัตราส่วนของเส้นรอบรูปต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือนอกจากนี้ยังมีวิธีนำภาพเงาของอนุภาคที่ไม่สามารถกลิ้งได้ไปทำการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นได้ด้วยวิธีที่เรียกว่า การวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ (Fourier analysis) ด้วยหลักการคือ รัศมีของอนุภาคสามารถนำมาอธิบายในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันกับมุมที่กวาดออกไปด้วยการใช้อนุกรมฟูเรียร์ จากนั้นจะใช้ขนาดของแอมพลิจูดที่ได้เป็นตัวบรรยายรูปทรง วิธีการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์นี้โดยทางทฤษฎี เหมาะกับการหาลักษณะของอนุภาคที่กลมและเรียบ ไม่เหมาะสำหรับภาพเงาของวัตถุที่มีความขรุขระมากๆ หรือหยักมาก ทั้งนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับว่าวัตถุที่มีภาพเงาที่ซับซ้อนนี้ควรจะใช้การวิเคราะห์แบบเรขาคณิตแฟรคทัล (fractal analysis) มากกว่า (Clark, 1986)

2.3 เรขาคณิตแฟรคทัล

ในบรรดาวิธีการส่วนใหญ่ซึ่งใช้สำหรับศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับวัตถุหรือภาพที่มีรูปร่าง สลับซับซ้อน ดูเหมือนว่าไม่มีแบบแผนชัดเจน แนวคิดแฟรคทัลเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพราะมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปแฟรคทัลหมายถึงรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนหรือเป็นชิ้นส่วนที่ กระจัดกระจายซึ่งสามารถถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ โดยแต่ละชิ้นส่วนที่ถูกแบ่งออกมาจะยังคงมีลักษณะ เหมือนกับชิ้นส่วนใหญ่ก่อนที่จะถูกแบ่งเพียงแต่ถูกย่อขนาดลงมา โดยตรงกันข้ามกับเรขาคณิตแบบ ดั้งเดิม เรขาคณิตแบบแฟรคทัลจะมีมิติเป็นเลขจำนวนจริง สิ่งที่เป็นแฟรคทัลจะต้องมีคุณสมบัติที่มีรูป แบบคล้ายคลึงกัน (self similarity) และขึ้นอยู่กับมาตราส่วน ในธรรมชาติจะพบว่าวัตถุส่วนใหญ่จะมี คุณสมบัติในด้านรูปทรงเป็นแฟรคทัลมากกว่ารูปทรงแบบเรขาคณิตทั่วไป เนื่องจากเหตุนี้ทำให้ เรขาคณิตแฟรคทัลสามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติมากมาย อาทิเช่น ลักษณะเส้นชายฝั่งทะเล, ภูเขา และแม่น้ำ สิ่งเหล่านี้จะสามารถถูกนำไปบรรยายแบบ คณิตศาสตร์โดยอาศัยเรขาคณิตแฟรคทัล การใช้ทฤษฎีแฟรคทัลสามารถอธิบายลักษณะที่ได้ หลายๆ สถานะของการแตกเป็นชิ้นส่วนและการแตกกิ่งก้านของพืชที่ทำการศึกษาในทางชีววิทยา, นิเวศวิทยา และระบบอื่นๆ แนวคิดแฟรคทัลเปิดโอกาสให้เข้าใจวิธีการใหม่ๆ สำหรับการประเมิน ความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิต หรือของรูปทรงและวัสดุที่กระจัดกระจาย เรขาคณิตแฟรคทัลได้รับการ พิสูจน์ว่าสามารถใช้ในการประเมินรูปแบบที่ผิดปกติ อาทิเช่น เส้นที่วกวน, พื้นผิวที่ขรุขระ และรูป ทรงที่ซับซ้อนไม่สามารถอธิบายได้ด้วยเรขาคณิตทั่วไป

2.3.1 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการ Hand and Divider

วิธีการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของรูปของวัตถุเริ่มต้นจากการนำขนาดของไม้บรรทัดที่มีความยาว λ ทาบลงไปบนเส้นขอบของรูปของวัตถุจนรอบเส้นขอบของวัตถุ (รูปที่ 2.6) จากนั้นนับ จำนวนของไม้บรรทัดทั้งหมดที่ใช้แล้วคูณด้วยค่า λ จะได้ค่าประมาณของความยาวเส้นรอบรูป ($L(\lambda)$) จากนั้นทำการลดขนาดของ λ ลงไปเรื่อยๆ และหาค่า ($L(\lambda)$) ทุกครั้งที่ทำการลดขนาด λ โดยเมื่อ λ มีขนาดเล็กลงพบว่าค่าความยาวเส้นรอบรูป $L(\lambda)$ ที่หาได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น Richardson ได้นำ เสนอความสัมพันธ์ของค่า $L(\lambda)$ และ λ ดังนี้

$$L(\lambda) = M \lambda^{(1-D)} \quad (2.1)$$

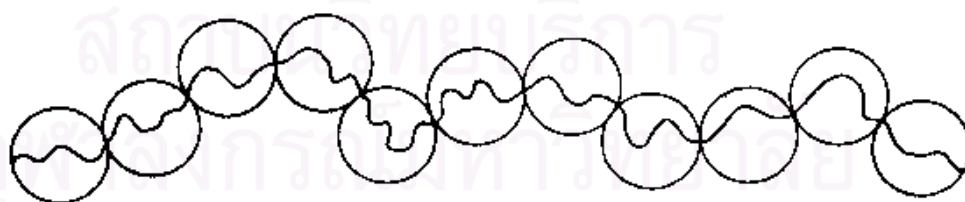
เมื่อ M เป็นค่าคงที่ และเป็นจำนวนจริงบวก และ D เป็นค่าคงที่ที่ไม่ต่ำกว่า 1 หรือคือค่ามิติ แฟรคทัลนั่นเอง



รูปที่ 2.6 การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธี Hand and Divider

2.3.2 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการ Mendelbrot D

วิธีการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของรูปวัตถุด้วยวิธีนี้ทำได้โดยการแทนเส้นขอบของรูปร่างอนุภาคทั้งหมดด้วยวงกลมที่มีรัศมี λ (รูปที่ 2.7) ให้เติมเส้นขอบของรูปภาพพอดีโดยใช้จำนวนของวงกลมให้น้อยที่สุดจากนั้นหาค่าพื้นที่ทั้งหมดของวงกลมที่มีอยู่หารด้วย 2λ จะได้ค่า $L(\lambda)$ และทำการลดขนาดของวงกลมที่มีรัศมี λ ลงไปเรื่อยๆ และหาค่า $L(\lambda)$ ทุกครั้ง จะเห็นได้ว่าวิธีนี้จะคล้ายคลึงกับวิธีการของ Hand and Divider กล่าวคือ ระยะห่างของจุดเชื่อมต่อกันของเส้นแนวกลางของรูปวงกลมแต่ละรูปสามารถประมาณได้เทียบเท่ากับขนาดของไม้บรรทัดที่มีความยาว λ และเมื่อค่า λ มีค่าลดลงค่า $L(\lambda)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่า λ กับค่า $L(\lambda)$ มีความเกี่ยวพันกันตามสมการของ Richardson (สมการที่ 2.1)



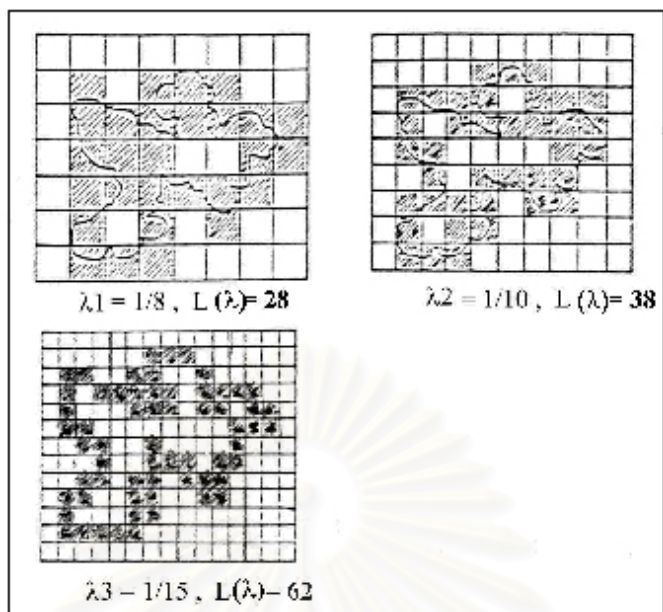
รูปที่ 2.7 การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธี Mendelbrot D

2.3.3 การประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการบอกซ์เคาน์ดิง

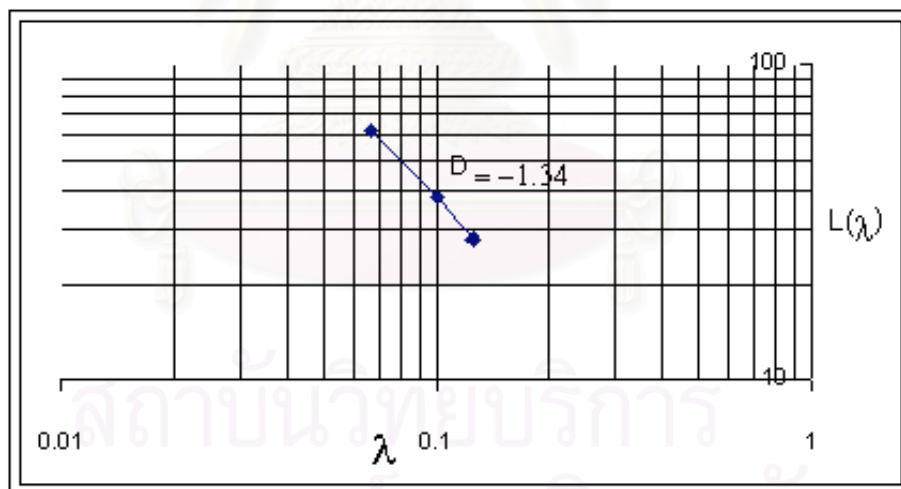
วิธีการที่ใช้ในการประเมินค่ามิติของวัตถุที่มีพฤติกรรมเป็นแฟรคทัลมีอยู่หลายวิธี แต่ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพจะนิยมใช้วิธีการบอกซ์เคาน์ดิง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สามารถคำนวณได้อย่างอัตโนมัติ และนำไปใช้ได้กับรูปร่างซึ่งมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน หรือไม่ก็เป็นรูปแบบที่คล้ายคลึงกันก็ได้ (Foroutan, 1999) หลักการของวิธีการนี้คือ การสร้างตารางลงบนภาพที่จะวิเคราะห์ด้วยเส้นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาดของช่องเล็กลงเรื่อยๆ โดยการตีตารางแต่ละครั้งจะมีการบันทึกข้อมูลสองชุดคือ จำนวนของช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีเส้นรูปร่างของภาพนั้นอยู่ ($L(\lambda)$) และความยาวของช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส (λ) ที่ใช้สร้างตาราง (รูปที่ 2.8) จากนั้นคำนวณค่าความชันของเส้นตรง (D) ที่เกิดขึ้นจากการกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(L(\lambda))$ กับ $\log(\lambda)$ หรือที่เรียกว่า กราฟของ Richardson (รูปที่ 2.9) ค่าดังกล่าวคือค่ามิติแฟรคทัลของวัตถุซึ่งแสดงให้เห็นระดับของความซับซ้อนของรูปทรงวัตถุ ในกรณีรูปวัตถุอยู่ในระนาบสองมิติค่ามิติแฟรคทัลนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ($1 \leq D \leq 2$) โดยจะมีความหมายคือ เส้นที่มีค่ามิติแฟรคทัลเป็น 1 คือเส้นตรง และจะมีความหยักเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเส้นที่มีค่ามิติแฟรคทัลเป็น 2 คือ เส้นที่วกไปมา (re-entrant) เหมือนกับจะปกคลุมพื้นที่ทั้งหมดบนระนาบที่มีเส้นขอบของเงาของอนุภาคฝังตัวอยู่ โดยทั่วไปอนุภาคที่มีอยู่จริงจะมีค่ามิติแฟรคทัลอยู่ระหว่าง 1.05 กับ 1.40 (Clark, 1986) สมการเส้นตรงที่ถูกใช้ประมาณค่ามิติแฟรคทัลแสดงได้ดังนี้

$$\log(L(\lambda)) = \log(K) + D \log(1/\lambda) \quad (2.2)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ และ $L(\lambda)$ เป็นสัดส่วนกับ $(1/\lambda)^{-D}$



รูปที่ 2.8 การหามิติแฟรคทัลด้วยวิธีบ็อกซ์เคาน์ติง



รูปที่ 2.9 กราฟของ Richardson

2.4 การประเมินขนาดของอนุภาค

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินขนาดของอนุภาคโดยอาศัยเทคนิคและหลักการต่างๆ มากมาย อาทิเช่น การกระเจิงของแสงเลเซอร์ (Laser Diffraction), การตกตะกอน, การร่อนด้วยตะแกรง และ การวิเคราะห์ภาพ เป็นต้น แต่เนื่องจากเครื่องมือที่อาศัยหลักการของ Laser Diffraction ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องมือที่มีราคาสูง ส่วนเครื่องมือที่อาศัยหลักการของการตกตะกอนนั้นจะมีขั้นตอนการคำนวณ และวิธีการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างซับซ้อน อีกทั้งยังต้องใช้เวลาในการวัดผล ในที่นี้จึงขอกกล่าวถึงเฉพาะการประเมินขนาดด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ และวิธีการร่อนด้วยตะแกรง ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เท่านั้น

2.4.1 การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ

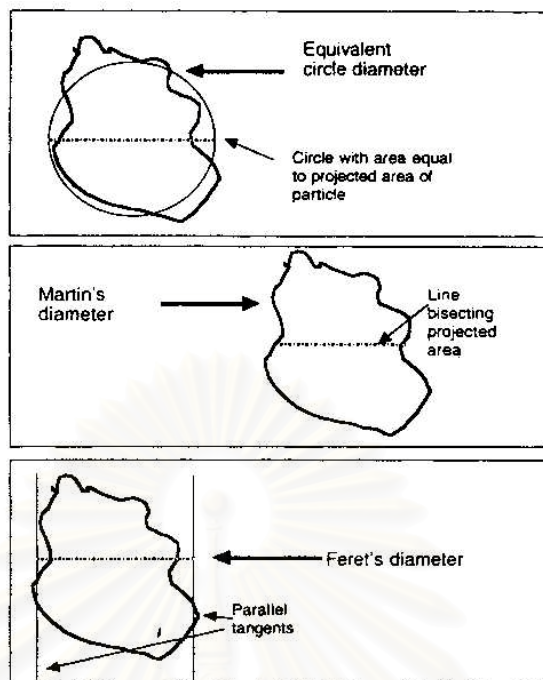
กล้องจุลทรรศน์มักจะถูกนำมาใช้ในการประเมินขนาดของอนุภาคเพราะว่าเป็นเพียงวิธีเดียวที่อนุภาคแต่ละอนุภาคถูกสังเกต และทำการวัดขนาด วิธีการนี้ไม่เพียงแต่ใช้ประโยชน์สำหรับการวัดขนาดของอนุภาคเท่านั้นแต่ยังใช้ประโยชน์สำหรับการประเมินรูปร่าง และพื้นผิวของอนุภาคได้อีกด้วย ถ้าเราใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับตัววิเคราะห์ภาพ (Image Analyzer) ในการดูอนุภาคและวัดขนาดของพวกมันแสดงว่าเรากำลังพิจารณาอยู่ที่เงาที่ฉายมาของรูปร่างอนุภาค เส้นผ่านศูนย์กลางแบบง่าย ๆ หลายชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงสถิติ อาทิเช่น

เส้นผ่านศูนย์กลางแบบมาร์ติน (Martin's diameter) คือ ความยาวของเส้นซึ่งแบ่งครึ่งพื้นที่ภาพของอนุภาค

เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเร็ท (Feret's diameter) คือ ระยะทางระหว่างเส้นสัมผัสสองเส้นที่อยู่ด้านตรงข้ามกันในแนวตั้ง หรือในนอน

เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลม (Equivalent circle diameter) คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภาพฉายของอนุภาค

เส้นผ่านศูนย์กลางเหล่านี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์

วิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทำได้สะดวกเร็วที่สุดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท แต่วิธีนี้จะทำให้ได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่าค่าที่ได้จากอีกสองหลักการ อย่างไรก็ตามก็ดีกว่าวิธีวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรทนี้เป็นวิธีการที่ดีที่สุดเพื่อใช้สำหรับการนำเสนอเปรียบเทียบ และสำหรับอนุภาคที่กลม ในระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหลืออีกสองชนิด เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมได้รับความนิยมนำมาใช้มากกว่าเพราะว่าในการวัด 1 ครั้ง ได้รวมลักษณะที่เป็นสองมิติเอาไว้ และยังทำได้ง่ายกว่าอีกด้วย (Allen, 1997)

การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ส่วนใหญ่ มักจะใช้ในการประเมินอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 3 ไมครอน ถึง 150 ไมครอน โดยทางทฤษฎีแล้วขีดจำกัดต่ำสุดจะอยู่ที่ประมาณ 0.2 ไมครอน แต่รัศมีของแสงที่กระจายออกมารอบๆ อนุภาคจะมีผลทำให้โดยรวมแล้วขนาดของจะใหญ่เกินความเป็นจริง และสำหรับขนาดที่ได้มากกว่า 150 ไมครอนการใช้แว่นขยายธรรมดาจะเหมาะสมกว่า กล้องจุลทรรศน์แบบนี้ส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดคือ มีความลึกของจุดรวมแสง (focus) น้อย ดังนั้นสำหรับตัวอย่างที่มีช่วงของขนาดกว้างจะมีอนุภาคเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่อยู่ในจุดรวมแสงในขอบเขตหนึ่งๆ ของการมอง

นอกจากการประเมินขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ในการประเมินขนาดด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพแล้วตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศอังกฤษ (BS3406: Part 4) ยังสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ในการประเมินขนาดด้วยการวิเคราะห์ภาพได้อีกด้วย โดยขนาดของอนุภาคที่จะใช้ในการประเมินขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควรรู้อยู่ระหว่าง 20 นาโนเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร แต่จากความคมชัดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่นใหม่ ๆ อาจจะสามารถใช้ในการประเมินอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึง 5 นาโนเมตรได้ ส่วนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุผ่านขนาดควรรู้อยู่ระหว่าง 0.2 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร

2.4.2 การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการร่อน

การร่อนในลักษณะแห้งด้วยการใช้ตะแกรงที่ทำมาจากเส้นลวดสาน เป็นวิธีการวิเคราะห์ขนาดที่ง่าย และราคาถูกโดย จะเหมาะสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอน วิธีการร่อนด้วยตะแกรงร่อนนี้จะให้การกระจายขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลโดยทราบขนาดได้จากช่องเปิดของตะแกรงร่อน

2.4.2.1 หลักการร่อนสารด้วยตะแกรงร่อน

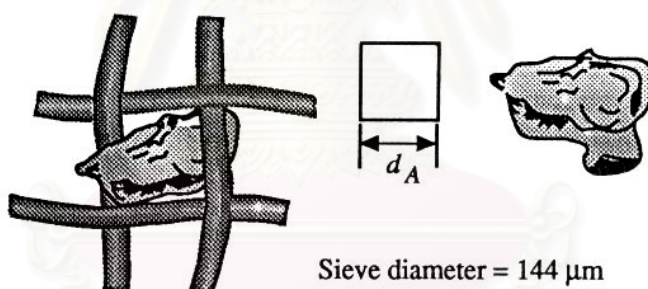
ในกรณีของอนุภาคที่มีช่วงขนาดของอนุภาคหยาบการร่อนสารตัวอย่างทำได้โดยการใช้เครื่องมือขนาดใหญ่ต้องและต้องใช้อุณหภูมิจำนวน 50 – 100 กิโลกรัม ในแต่ละครั้ง แต่ในทางการค้ายังมีเครื่องร่อนที่ใช้สำหรับตะแกรงร่อนที่มีขนาดช่องเปิดปานกลาง และโดยทั่วไปเครื่องร่อนชนิดนี้จะคัดแยกผงอนุภาคออกเป็น 5 หรือ 6 ช่วงขนาดด้วยการใช้ผงอนุภาคจำนวน 50 – 100 กรัม

การร่อนสารในลักษณะแห้งเครื่องมือจะประกอบตะแกรงร่อนที่เรียงเป็นชั้นๆ โดยลำดับที่สูงขึ้นของตะแกรงแต่ละชั้นจะมีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้น จากนั้นให้ใส่สารตัวอย่างที่ต้องการร่อนบนตะแกรงชั้นบนสุด เมื่อเดินเครื่องร่อนจะเกิดการเคลื่อนไหวซึ่งเกิดจากการหมุนหรือการเขย่า ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงลอดผ่านตะแกรง ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะค้างอยู่บนตะแกรง ในที่นี้ทำการสั่นชุดตะแกรงทั้งหมดจนกระทั่งอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงในแต่ละตะแกรงไม่สามารถผ่านลงไปบนตะแกรงที่อยู่ถัดไปได้อีก โดยขนาดช่องเปิดของตะแกรง (d_n) คือ ขนาดของช่องสี่เหลี่ยมที่เล็กที่สุดที่อนุภาคสามารถผ่านได้ ซึ่งพิจารณาจากตะแกรงร่อนแบบลวดสาน (รูปที่ 2.11) และการบอกขนาดของช่องเปิดของตะแกรงมักจะอ้างเป็นแบบเมช (mesh) (จำนวนของเส้นลวดต่อความยาว 1 นิ้ว) ช่วงของขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศสหรัฐอเมริกา (ASTM) จะอยู่ระหว่าง 635 เมช (ขนาดประมาณ 20 ไมครอน) ถึง 5 เมช (ขนาดประมาณ 125 มิลลิเมตร)

2.4.2.2 ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้สำหรับการร่อน

ในการประเมินปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้สำหรับการร่อนจำเป็นต้องนำหลักเกณฑ์สองอย่างที่ตรงกันข้ามกันมาพิจารณาเพื่อให้มาบรรจบกัน กล่าวคือปริมาณสารที่ใช้จะต้องมีมากพอสำหรับการชั่งน้ำหนักที่เที่ยงตรง และจะต้องมีปริมาณน้อยเพียงพอที่จะทำให้การร่อนสารเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

ในการประเมินขนาดด้วยการร่อนโดยทั่วไปมักจะมีแนวโน้มในการใช้ตัวอย่างจำนวนมากเกินไป แม้ว่าในทางปฏิบัติการใช้ตัวอย่างในปริมาณที่น้อยลงแต่ยังคงอยู่ในขอบเขตขีดจำกัดจะทำให้ข้อมูลที่ได้มีความซ้ำ (reproducibility) หลักเกณฑ์คร่าวๆ สำหรับปริมาณการใช้สารตัวอย่างของตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 นิ้วแสดงไว้ในตารางที่ 2.1ก แต่ปริมาณที่แสดงไว้ในตารางอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามค่ามัธยฐานของขนาดอนุภาคดังตารางที่ 2.1ข แต่จากเกณฑ์เหล่านี้ อาจมีการปรับลดปริมาณของตัวอย่างลงได้เมื่อตัวอย่างที่ใช้มีการกระจายขนาดแคบ



รูปที่ 2.11 ลักษณะช่องเปิดของตะแกรงร่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณของสารตัวอย่างสำหรับการร่อนสารด้วยตะแกรงขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว

(ก) พิจารณาตามความหนาแน่นของอนุภาค

ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.5	1.5-3.0	>3
น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)	25	50	100

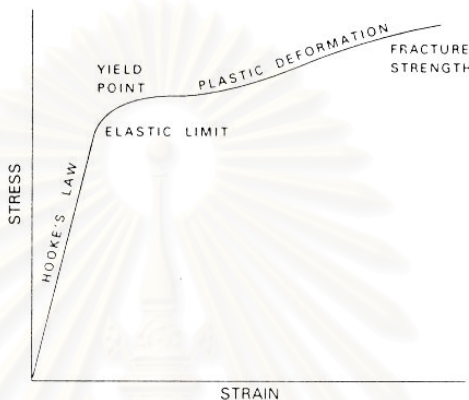
(ข) พิจารณาค่ามัธยฐานของขนาดอนุภาค

ค่ามัธยฐาน (มม.)	>2	2-1	1-0.5	0.50-0.25	0.25-0.075	<0.075
น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)	500	200	100	75	50	25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ทฤษฎีการบดย่อย

ของแข็งภายใต้แรงดันจะทำให้เกิดการเคลื่อนของโครงสร้างภายในและเสียรูปร่าง พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของการบดย่อยขนาดแสดงโดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของอนุภาคสาร (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 พฤติกรรมระหว่างความเค้น (stress) กับ ความเครียด (strain) ของอนุภาคสาร

ส่วนต้นของกราฟจะเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook) ที่กล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนตรงต่อความเครียดของอนุภาคและความชันของกราฟที่เป็นฮุก เรียกว่า โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งค่าโมดูลัสของยัง เป็นค่าแสดงถึงความอ่อนแข็งของสารโดยมีหน่วยเป็น ไดน์/ตารางเซนติเมตร การเสียรูปร่างแบบยืดหยุ่นตามกฎของฮุก และการหาค่าโมดูลัสของยังเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ความเค้น} \propto \text{ความเครียด}$$

$$F/A \propto (L_s - L_0) / L_0 \quad (2.3)$$

หรือ

$$F/A = Y(L_s - L_0) / L_0 \quad (2.4)$$

- เมื่อ F คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ (ไดน์)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (ตารางเซนติเมตร)
- L_0 คือ ความยาวของวัตถุเริ่มต้น (เซนติเมตร)
- L_s คือ ความยาวของวัตถุหลังจากให้แรงแก่วัตถุ (เซนติเมตร)
- Y คือ ค่าโมดูลัสของยัง (ไดน์/ตารางเซนติเมตร)

จากรูปที่ 2.12 ส่วนต่อของกราฟที่เริ่มต้นเป็นส่วนโค้งจุดนี้เรียกว่า yield point สามารถใช้ความต้านทานต่อการเสียรูปของอนุภาคสารอย่างถาวร เมื่อเพิ่มความเค้นต่อไปเรื่อยๆ อนุภาคสารจะเสียรูปร่างอย่างถาวร กราฟส่วนนี้เรียกว่า plastic deformation พื้นที่ภายใต้กราฟแสดงถึงพลังงานทั้งหมดที่ทำให้อนุภาคสารเกิดการแตกหักและสามารถใช้เป็นตัววัดแรงตอกอัดที่อนุภาคสารได้รับโดยประมาณ

เมื่อการใช้แรงและการปลดปล่อยแรงมีค่ามากเพียงพอ จนทำให้อนุภาคเสียรูปร่างอย่างถาวร พลังงานที่ใช้ไปจะทำให้อนุภาคแตก เมื่อความเค้นเพิ่มมากขึ้นจนสูงสุด การแตกของอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของอนุภาคมีความไม่สม่ำเสมอ ทำให้แรงที่แต่ละอนุภาคได้รับจะไม่เท่ากัน ส่วนที่มีพื้นที่ผิวมากจะได้รับแรงมากกว่า ดังนั้นความเค้นและอุณหภูมิของอนุภาคจึงแตกต่างกัน จุดที่มีแรงที่มากกว่าค่าจำกัดแบบหยุ่น (elastic limit) จะทำให้อนุภาคแตก ในขณะที่อนุภาคเกิดจุดแตกการรับแรงของอนุภาคจะเลื่อนไป ในระหว่างที่อนุภาคแตกคลื่นของความเค้นที่ถูกปล่อยจะเป็นพลังงานทำให้อนุภาคบริเวณอื่นมีความเค้นสูงขึ้น ทำให้การแตกตัวของอนุภาคเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ ถ้าให้แรงอย่างรวดเร็วในลักษณะการตอกอัด การแตกอาจเกิดก่อนที่พลังงานความเค้นจะถึงจุดสมดุลในอนุภาคและพลังงานที่ต้องการทำให้อนุภาคเกิดการแตกหักลดน้อยลง การแตกหักของสารรูปผลึกจะเกิดพร้อมกับการแตกหักในแนวระนาบ ส่วนการแตกของสารที่ไม่เป็นรูปผลึกจะมีลักษณะกระจายกระจาย (random) เมื่อค่อยๆ เพิ่มแรงกดบนผลึกอนุภาคในอุดมคติ (ideal crystal) แรงที่ให้ควรกระจายทั่วอนุภาคอย่างสม่ำเสมอทั่วไป จะได้อนุภาคขนาดใหญ่และกลางไม่มากนัก ส่วนอนุภาคเล็กจะมีปริมาณพอควร ดูเหมือนว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะมีความสัมพันธ์กับกระบวนการย่อยขนาด และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของสารชนิดนั้น หนึ่งผลึกของสารบริสุทธิ์จะมีความเปราะภายในเนื่องจากขาดอะตอม หรือไอออนในเครือข่ายโครงสร้าง และจะมีตำหนิง่ายจากกลไกทางกลศาสตร์และอุณหภูมิ

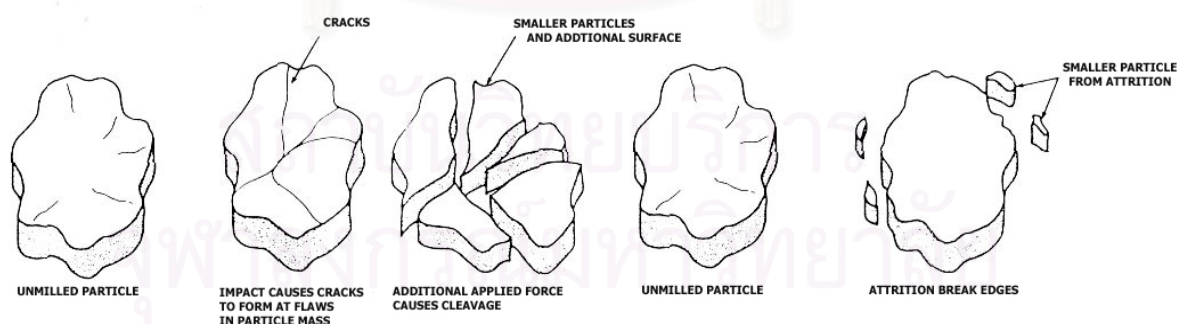
จุดอ่อนที่สุดของตำหนิในอนุภาคเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงที่ทำให้อนุภาคที่จุดอ่อนที่สุดเกิดการแตกหัก แต่การที่อนุภาคมีจุดอ่อนมาก อาจไม่จำเป็นที่ว่าการย่อยขนาดให้ได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการเป็นการง่าย เพราะว่าการย่อยขนาดมีหลายขั้นตอนของการแตก ในบางกรณีอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่มีจุดอ่อนที่สุดของตำหนิบนผิวอนุภาคที่แข็งแรงกว่าอาจย่อยขนาดได้ง่ายกว่า เป้าหมายในการย่อยขนาดคือ ทำให้เกิดการย่อยแตกซึ่งแพร่กระจายผ่านอนุภาคที่เสียรูปร่างที่เกิดจากการใช้พลังงานความเครียด และเกิดการแตกของอนุภาคตามมา ประโยชน์ของพลังงานที่ใช้ย่อยขนาดจะเป็นสัดส่วนตรงกับพื้นที่ผิวของอนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่ และความยาวของรอยแตกจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\sqrt{2}$ ของพื้นที่ผิวเกิดใหม่ ดังนั้นพลังงานที่ใช้ย่อยขนาดก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\sqrt{2}$ ของเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคที่ถูกย่อยขนาดแล้วลดด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคก่อนจะย่อยขนาด พลังงานที่ใช้ในการย่อยขนาด และทำให้เกิดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคใหม่คำนวณได้จาก สมการที่ 2.5

$$E^* = E \left(\frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_1} - \sqrt{d_2}} \right) \quad (2.5)$$

- โดย E คือ พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์)
 E* คือ พลังงานที่ใช้ในการเกิดอนุภาคสารใหม่ d_2 (กิโลวัตต์)
 d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของสารตั้งต้น (ไมโครเมตร)
 d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของสารหลังจากการย่อยขนาด (ไมโครเมตร)

การย่อยขนาดเริ่มด้วยการแตกของรอยแยกซึ่งต้องการพลังงานขั้นต่ำจำนวนหนึ่ง อย่างไรก็ตามสภาวะการย่อยขนาดเป็นกลไกโดยอนุภาคที่ถูกย่อยจำนวนมากได้รับการกระทบที่มากเกินไป บางอนุภาคแตกโดยได้รับแรงกระทบบางอนุภาคได้รับแรงขีดสี

พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการย่อยขนาดคาดว่ามีเพียงประมาณไม่เกิน 2% ของพลังงานทั้งหมดเท่านั้น พลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในรูปความร้อน การสั่นสะเทือน เสียง การเสียรูปของอนุภาค ชนิดยืดหยุ่น (elastic deformation) การชนของอนุภาคสารกับผนังเครื่องมือ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการย่อยขนาดคือแรงกระทบ เมื่อแรงมีขนาดเพียงพอ โดยเฉพาะที่จุดกลางอนุภาค อนุภาคสารจะแตกและเกิดอนุภาคเล็กขึ้นใหม่ ถ้าแรงที่ได้อย่างช้าๆ กลไกการแตกของอนุภาคจะเป็นการอัดตัว (compression) การขีดสี (attrition) เป็นอีกกลไกที่ทำให้อนุภาคแตกโดยแรงที่ใช้จะนานไปกับผิวอนุภาคของแข็งและผลจะเกิดเป็นอนุภาคที่เล็กมากแตกออกมา (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 แสดงการแตกของอนุภาคสารในการบดย่อยขนาด

พลังงานที่ต้องการในการใช้ย่อยขนาดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับมวลอนุภาคสารยกกำลัง ซึ่งอาจแสดงในรูปคณิตศาสตร์ได้ ตามสมการที่ 2.6

$$\frac{dE}{dQ} = -\frac{C}{Q^n} \quad (2.6)$$

โดย $\frac{dE}{dQ}$ คือ จำนวนพลังงานที่ต้องการย่อยขนาดต่อมวลอนุภาคสาร
 Q คือ จำนวนมวลอนุภาคสาร (ตัน)
 C และ n คือ ค่าคงที่



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

โปรแกรมประเมินค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงอนุภาค

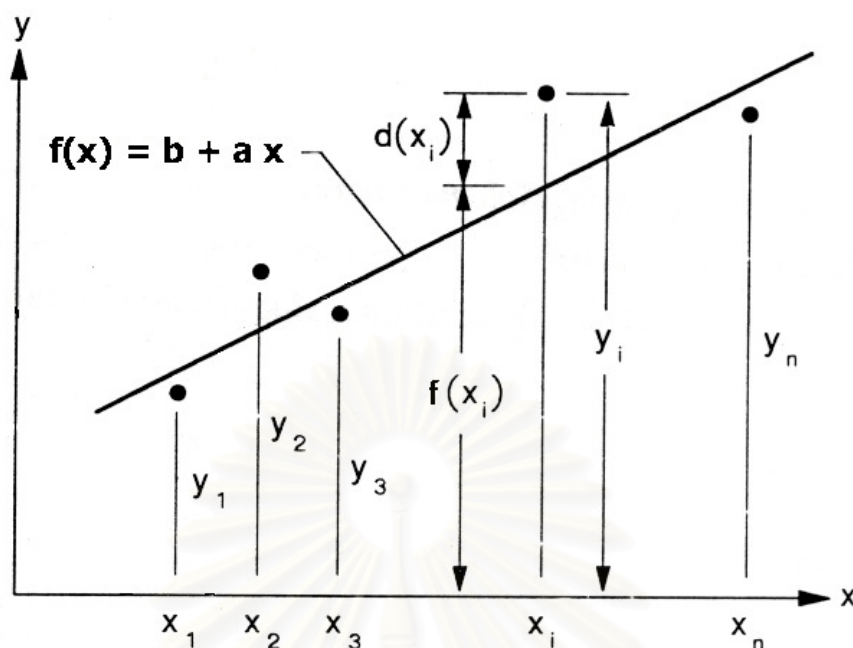
การนำหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัลมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์รูปเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปทรงอนุภาคด้วยการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคนั้น แต่ทั้งนี้หากนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้โดยอาศัยแรงงานมนุษย์มาวิเคราะห์โดยตรงจะพบว่า มีข้อจำกัดคือจำเป็นต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ของภาพของอนุภาคแต่ละภาพค่อนข้างนานทำให้ได้ข้อมูลที่มีปริมาณน้อยเนื่องจากจะต้องมีการลดขนาดของก้ำวหรือขนาดของช่องตารางลงเรื่อยๆ และจะต้องทำการนับจำนวนช่องทั้งหมดที่มีรูปทรงอนุภาคนั้นอยู่ภายในใหม่ทุกครั้งที่ทำกรลดขนาดของก้ำวหรือช่องตาราง นอกจากนี้ยังมีโอกาสทำให้เกิดผลคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทำงานของคน (Human error) ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยการใช้วิธีบอกซ์เคาน์ที่ดั่งขึ้นมาโดยจะเป็นโปรแกรมที่มีชื่อว่า "Fractal" เพื่อให้การวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงอนุภาคทำได้สะดวกขึ้น ได้ข้อมูลที่มีปริมาณมากขึ้นและมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากขึ้น โดยโปรแกรมนี้อาจรวมอยู่ในโปรแกรม "IMAGE-FF"

3.1 การคำนวณค่ามิติแฟรคทัลจากข้อมูล

เนื่องจากความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากกราฟของ Richardson มีลักษณะเป็นเส้นตรงดั่งนั้น ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระเบียบวิธีแบบถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดข้อมูลที่ได้มา รูป 3.1 แสดงชุดของข้อมูลที่ประกอบด้วย $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n$ นั่นคือมีจำนวนข้อมูลทั้งสิ้น n ข้อมูล ในที่นี้เราจะประดิษฐ์สมการเส้นตรงในรูปแบบของฟังก์ชัน

$$f(x) = b + ax \quad (3.1)$$

โดย a และ b เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าและจำเป็นต้องคำนวณหาจากเงื่อนไขที่ว่าสมการเส้นตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากข้อมูลทุกข้อมูลที่กำหนดมาให้



รูปที่ 3.1 การถดถอยแบบเชิงเส้นโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดของข้อมูลที่กำหนดมาให้

จากรูป 3.1 นี้เราจะเห็นว่า ณ ตำแหน่ง x_i ของข้อมูล i ใดๆ ค่าของฟังก์ชัน $f(x)$ ที่เราจะประดิษฐ์ขึ้นจะมีค่าแตกต่างไปจากค่าของข้อมูล y_i เท่ากับ $d(x_i)$ ที่ตำแหน่งนั้น นั่นหมายความว่า ค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูลอาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad (3.2)$$

ซึ่งในที่นี้เราทำการยกกำลังสองของค่าแตกต่าง $d(x_i)$ ก็เพื่อกำจัดค่าที่อาจมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นสมการที่ 3.2 จะให้ความหมายของค่าความผิดพลาดทั้งหมด สมการ 3.2 สามารถเขียนได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (3.3)$$

แทนสมการ 3.1 ที่ $x = x_i$ ลงในสมการ 3.3 นี้จะได้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (b + ax_i)]^2 \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 นี้เราสามารถคำนวณหาตัวไม่ค่า a_0 และ a_1 ที่ต้องการได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square) ซึ่งทำจากวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาดโดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่ค่า นั่นคือ

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (3.5ก)$$

และ
$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad (3.5ข)$$

และเงื่อนไขในสมการ 3.5ก ให้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (b + ax_i)] (-1) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n b - \sum_{i=1}^n ay_i &= 0 \\ nb + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (3.6ก)$$

และเงื่อนไขในสมการ 3.5ข ให้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} 2 \sum_{i=1}^n [y_i - (b + ax_i)] (-x_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n bx_i - \sum_{i=1}^n ax_i^2 &= 0 \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) b + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \quad (3.6ข)$$

ทั้งสองสมการ 3.6ก และ 3.6ข นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} b \\ a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

ซึ่งเราสามารถใช้อนุกรมของคราเมอร์ ในการแก้ระบบสมการนี้เพื่อหาค่าคงตัว b และ a ได้ดังนี้

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3.8ก)$$

$$a = \frac{n\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3.8ข)$$

ค่าคงตัว b และ a ที่คำนวณได้นี้ เมื่อแทนกลับลงไปนสมการ 3.1 ก็จะได้สมการเส้นตรงที่แสดงการถดถอยแบบเชิงเส้นที่ต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมประเมินค่ามิติแฟรคทัลด้วยวิธีการบอกซ์เคาน์ติง เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก เวอร์ชัน 6.0 (Visual Basic 6) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมมีขั้นตอนดังนี้คือ

- ขั้นตอนการรับข้อมูล
- ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล
- ขั้นตอนการประมวลผล
- ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล

ทั้งนี้ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ขั้นตอนการรับข้อมูล

ข้อมูลที่รับเข้าสู่โปรแกรมเพื่อใช้ประเมินค่ามิติแฟรคทัลนี้ คือข้อมูลที่เป็นรูปภาพของภาพเงาอนุภาคที่ถูกไบนาไรซ์ (binarize) ให้เป็นภาพกราฟิกที่มีหนึ่งระนาบิตโดยในการไบนาไรซ์จะต้องให้ภาพของอนุภาคเป็นสีขาว (มีค่าเป็น 1) และ ฉากหลังภาพวัตถุเป็นสีดำ (มีค่าเป็น 0) โดยภาพเหล่านี้อาจจะได้มาจากการส่องกราดภาพ (scanning) ของภาพถ่ายที่ได้มาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบอื่น ด้วยเครื่องส่องกราดภาพ (scanner) หรืออาจจะได้มาจากการถ่ายภาพอนุภาคที่ได้มาจากกล้องถ่ายภาพแบบวิดีโอแบบดิจิทัล (digital video camera) บนหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำภาพดิจิทัลที่มีระนาบิตมากกว่าหนึ่งนี้มาเปลี่ยนเป็นภาพดิจิทัลที่มีหนึ่งระนาบิตด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางด้านกราฟิกต่างๆ ที่มีอยู่มากมายในปัจจุบัน และเพื่อให้ค่ามิติแฟรคทัลที่ได้สามารถตรวจทานซ้ำได้ (reproducibility) จากการทดลองหลายๆ ครั้ง กรอบของรูปภาพที่ครอบคลุมวัตถุอยู่ควรมีขนาดเล็กที่สุดโดยที่ยังสามารถล้อมภาพของวัตถุไว้ได้แต่ยังไม่ทำให้วัตถุติดขอบของรูปภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Foroutan-pour (1999)

3.2.2 ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล

ข้อมูลภาพดิจิทัลของระนาบเดียวที่รับเข้าสู่โปรแกรมจะต้องถูกนำผ่านกระบวนการกรองข้อมูลด้วยวิธีการทำสเคเลตัน (skeleton) เพื่อให้เหลือเพียงเส้นขอบรูปร่างที่มีความกว้างเพียง 1 พิกเซล เท่านั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากภาพที่ถูกทำสเคเลตัน จะเป็นภาพเริ่มต้นที่ดีสำหรับการทำบอซซ์เคานท์ติง (Foroutan-pour,1999) โดยการทำสเคเลตันนี้จะอยู่ในส่วนโปรแกรมย่อยที่ชื่อ skeleton ซึ่งพัฒนาขึ้นมาด้วยการใช้หลักการของ chain code (Singha and Dougherty, 1998) ซึ่งเป็นลักษณะการติดตามพิกเซลของเส้นแสดงรูปร่างของอนุภาค ในการนี้ผู้ใช้จะต้องให้ข้อมูลกับโปรแกรมย่อยนี้ด้วยการนำตัวชี้ (mouse pointer) ไปเลือกอนุภาคที่ต้องการทำการหาค่ามิติแฟรคทัล โดยจะต้องวางตัวชี้ให้อยู่ภายในพื้นที่ของอนุภาคนั้นแล้วทำการกดปุ่มซ้ายมือของเมาส์ การทำสเคเลตันของโปรแกรมย่อยนี้ยังมีผลพลอยได้คือจะช่วยกำจัดสิ่งรบกวน (noise) ในภาพได้อีกทางหนึ่งก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัล

3.2.3 ขั้นตอนการประมวลผล

ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะเริ่มทำการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงอนุภาคโดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การอ่านข้อมูลของภาพดิจิทัล

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการอ่านค่าของพิกเซลต่างๆ มาเก็บไว้ในตัวแปรที่เป็นอาเรย์ (array) แบบ 1 มิติที่เรียงลำดับไปเรื่อยๆ จำนวนเท่ากับ $N \times N$ ตัว โดยค่า N จะมีค่าเท่ากับ 128, 256, 512, 1024 หรือ 2048 ขึ้นอยู่กับขนาดของด้านที่ยาวที่สุดในหน่วยพิกเซลของภาพอนุภาคที่นำมาวิเคราะห์ โดยตัวแปรตัวที่เก็บค่าของพิกเซลที่เป็นเส้นขอบของรูปจะมีค่าเท่ากับ 1 นอกนั้นจะมีค่าเป็น 0

ขั้นตอนที่ 2 การนับค่าจำนวนช่องที่มีเส้นรูปร่างของอนุภาค

ขั้นตอนนี้ในครั้งแรกโปรแกรมจะทำการนับจำนวนพิกเซลที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 ก่อน จะมีความหมายเสมือนเป็นจำนวนช่องตาราง (box) ที่เล็กที่สุด ที่มีเส้นขอบรูปร่างของอนุภาคอยู่ จากนั้นทำการขยายขนาดของช่องขึ้นไปเรื่อยๆ ด้วยการรวมพิกเซลที่อยู่ติดกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนในลักษณะเสมือนสี่เหลี่ยมจัตุรัสของพิกเซลที่มีขนาดกว้าง $2^l \times 2^l$, $2^2 \times 2^2$, $2^3 \times 2^3$, $2^4 \times 2^4$, ..., $2^L \times 2^L$ ตามลำดับ โดย $2^L \leq N$ แล้วหาค่าผลรวมของตัวแปรภายในช่องที่ใหญ่ขึ้นเหล่านั้นไว้ จากนั้นทำการนับจำนวนช่องใหญ่เหล่านั้นที่มีค่าผลรวมของตัวแปรไม่เท่ากับ 0 ซึ่งการนับนี้ก็คือการนับจำนวนช่องที่มีเส้นขอบรูปร่างของอนุภาคอยู่

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่ามิติแฟรคทัล

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะนำข้อมูลของจำนวนช่องที่นับได้จากจำนวนพิกเซลที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นตัวแทนของจุดบนเส้นรอบรูปของอนุภาค และของขนาดของช่องที่ใช้ในการวิเคราะห์มาพิจารณาในแกนลอการิทึม เมื่อนำค่าลอการิทึมของข้อมูลเหล่านี้มาหาค่าความชันของเส้นกราฟที่ได้ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) จะทำให้ค่าที่คำนวณได้จากสมการ 3.8ก คือค่ามิติแฟรคทัลของเส้นรอบรูปอนุภาคซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนลักษณะความซับซ้อนของรูปทรงอนุภาคนั้นได้

3.2.4 ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะแสดงผลข้อมูลของจำนวนช่องที่นับได้ และความกว้างของช่องสี่เหลี่ยมที่ใช้วิเคราะห์ (ในหน่วยพิกเซล) นอกจากนั้นยังแสดงกราฟของ Richardson ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของข้อมูลทั้งสอง และแสดงผลค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงอนุภาคที่ทำการวิเคราะห์อีกด้วย



รูปที่ 3.2 ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลโปรแกรมวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของภาพอนุภาค

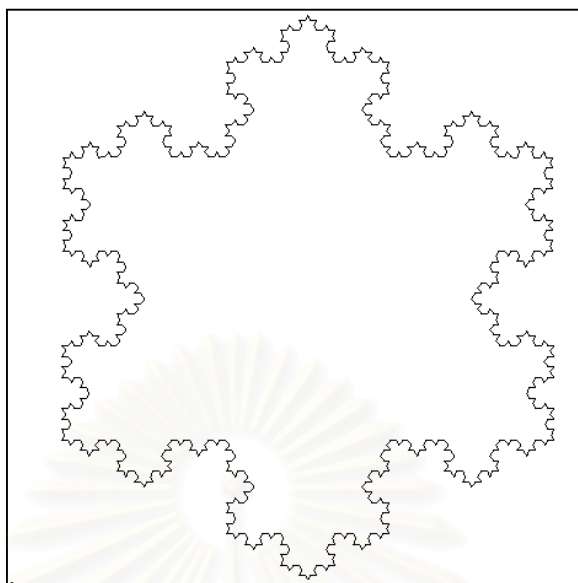
3.3 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและผลที่ได้

3.3.1 วิธีการทดสอบโปรแกรม

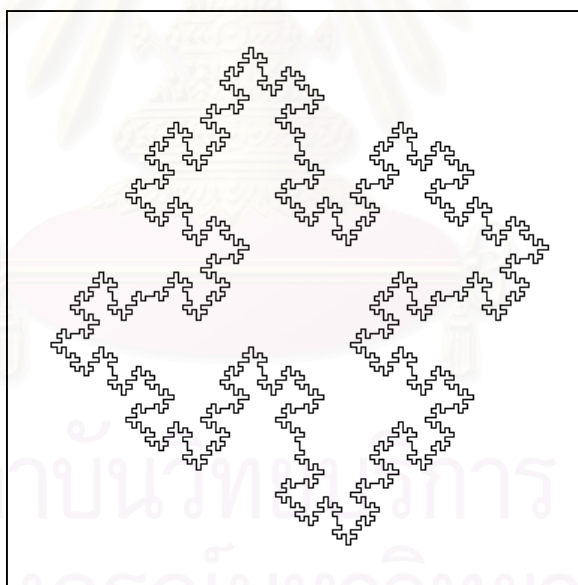
การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำโดยนำโปรแกรม Fractal ไปวิเคราะห์รูปทรงที่มีลักษณะเป็นแฟรคทัลที่แท้จริงที่เราทราบค่ามิติแฟรคทัลของรูปทรงนั้น ในการทดสอบนี้ใช้รูปทรงแฟรคทัล 4 ชนิดที่สร้างมาจากการเขียนโปรแกรมภาษาเบสิก คือ

1. ภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับ 1.262, ขนาดของภาพ 470x470 พิกเซล ดังแสดงในรูป 3.3
2. ภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับ 1.500, ขนาดของภาพ 432x432 พิกเซล ดังแสดงในรูป 3.4
3. ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับ 1.613, ขนาดของภาพ 400x400 พิกเซล ดังแสดงในรูป 3.5
4. ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับ 1.667, ขนาดของภาพ 480x480 พิกเซล ดังแสดงในรูป 3.6

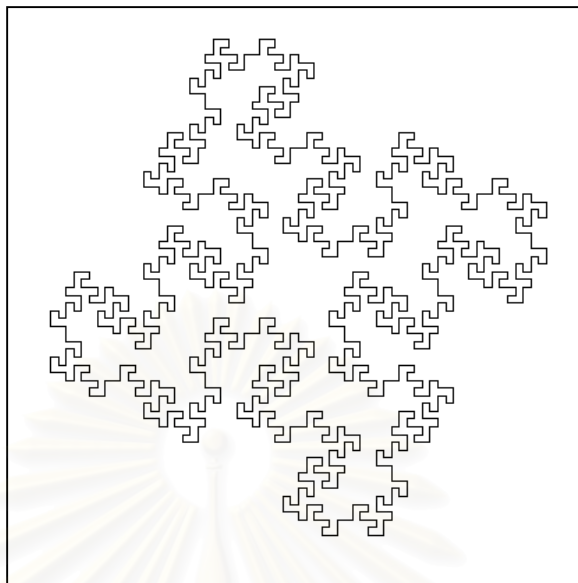
การใช้ภาพเหล่านี้จะมีข้อดีคือ จะเป็นภาพที่มีเพียงเส้นขอบรูปร่างที่มีความกว้างของเส้นขอบเพียง 1 พิกเซล เท่านั้นหมดทั้งรูปทรง ทำให้ไม่มีผลรบกวนจากความหนาของเส้นขอบรูปซึ่งความหนาของเส้นขอบรูปนี้จะมีผลต่อค่ามิติแฟรคทัลที่จะทำการวิเคราะห์



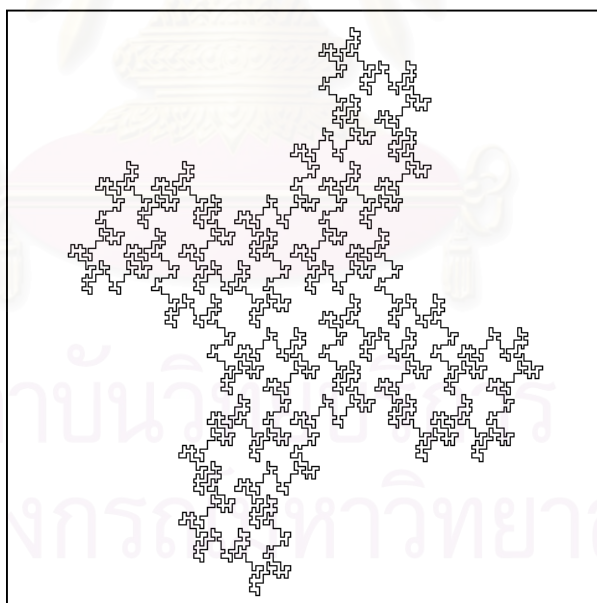
รูปที่ 3.3 ภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262, ขนาดของภาพ 470x470 พิกเซล



รูปที่ 3.4 ภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500, ขนาดของภาพ 432x432 พิกเซล



รูปที่ 3.5 ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613, ขนาดของภาพ 400x400 พิกเซล



รูปที่ 3.6 ภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667, ขนาดของภาพ 480x480 พิกเซล

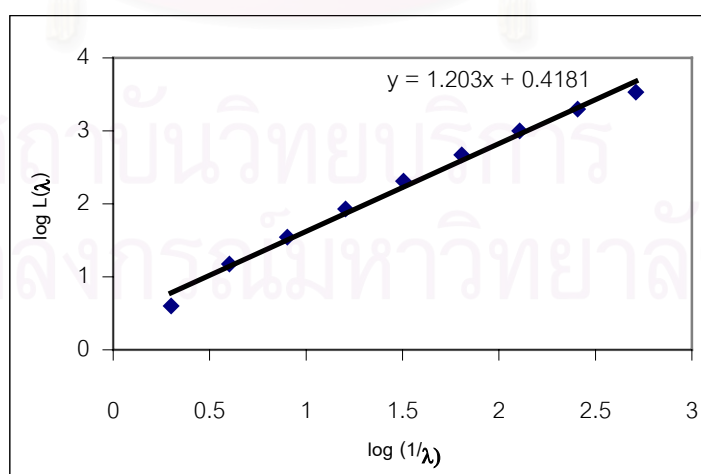
3.3.2 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบด้วยโปรแกรม Fractal ที่พัฒนาขึ้นมา พบว่าได้ผลดังนี้

ภาพแฟรคทัลที่สร้างขึ้นและมีชื่อเรียกทั่วไปว่า Snow นั้นในทางทฤษฎีมีค่ามิติแฟรคทัล 1.262 จากการใช้โปรแกรม Fractal พบว่าสามารถประมาณค่ามิติแฟรคทัลได้เท่ากับ 1.203 (โดยข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม แสดงในตารางที่ 3.1 และรูป 3.7)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262

$1/\lambda$	$L(\lambda)$	$\log(1/\lambda)$	$\log L(\lambda)$
2	4	0.301	0.602
4	15	0.602	1.176
8	35	0.903	1.544
16	85	1.204	1.929
32	205	1.505	2.311
64	468	1.806	2.670
128	1001	2.107	3.000
256	1978	2.408	3.296
512	3401	2.709	3.531

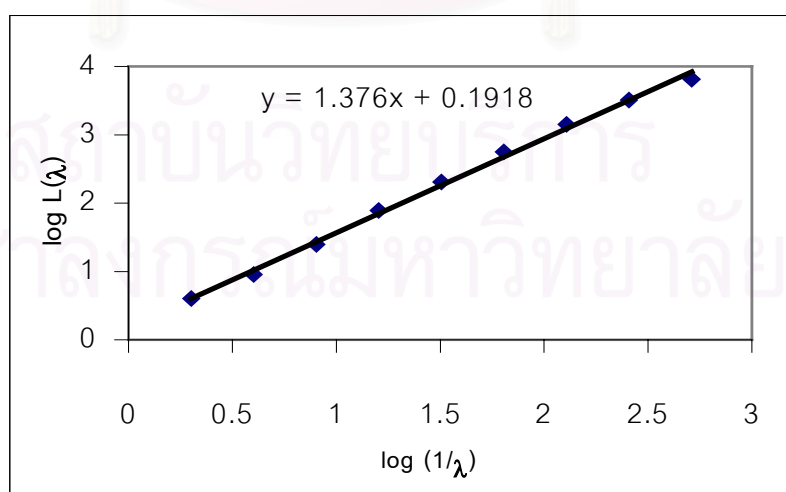


รูปที่ 3.7 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Snow ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.262 พบได้ค่ามิติแฟรคทัล = 1.203

สำหรับภาพแฟรคทัลซึ่งเรียกว่า Quadric Koch Island นั้นโดยทฤษฎีมีค่ามิติแฟรคทัลเป็น 1.500 แต่จากการใช้โปรแกรม Fractal พบว่าสามารถประมาณ ค่ามิติแฟรคทัลของรูปดังกล่าว เป็น 1.376 (ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 3.2 และรูป 3.8)

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500

$1/\lambda$	$L(\lambda)$	$\log(1/\lambda)$	$\log L(\lambda)$
2	4	0.301	0.602
4	9	0.602	0.954
8	25	0.903	1.397
16	78	1.204	1.892
32	203	1.505	2.307
64	559	1.806	2.747
128	1419	2.107	3.151
256	3232	2.408	3.509
512	6464	2.709	3.810

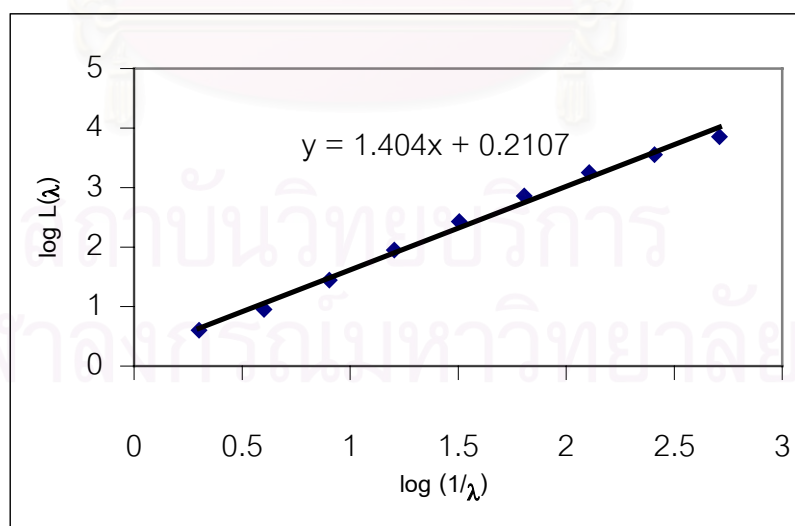


รูปที่ 3.8 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Quadric Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.500 พบได้ค่ามิติแฟรคทัล = 1.376

ในกรณีภาพแฟรคทัลภาพที่สามซึ่งเรียกว่า Koch Island นั้นมีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับ 1.613 แต่เมื่อใช้โปรแกรม Fractal ทำการวิเคราะห์พบว่าได้ค่ามิติแฟรคทัลเป็น 1.404 (ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 3.3 และรูป 3.9)

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613

$1/\lambda$	$L(\lambda)$	$\log(1/\lambda)$	$\log L(\lambda)$
2	4	0.301	0.602
4	9	0.602	0.954
8	28	0.903	1.447
16	89	1.204	1.949
32	269	1.505	2.430
64	729	1.806	2.863
128	1800	2.107	3.255
256	3600	2.408	3.556
512	7200	2.709	3.857

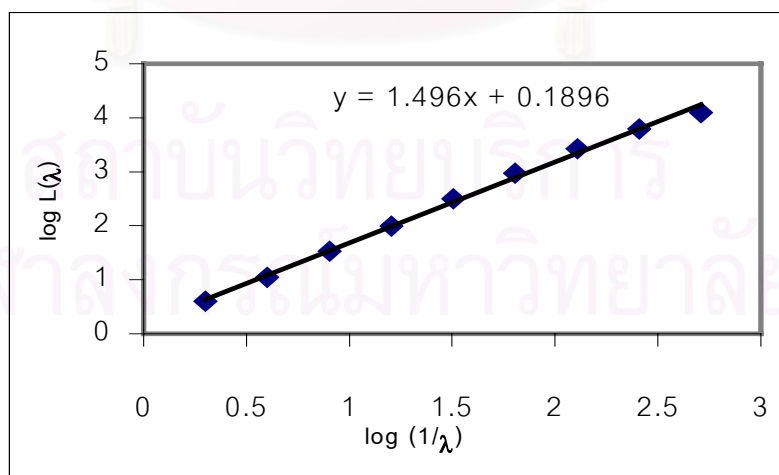


รูปที่ 3.9 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.613 พบได้ค่ามิติแฟรคทัล = 1.404

สำหรับรูปแฟรคทัลรูปสุดท้ายซึ่งเป็น Koch Island เช่นกัน แต่มีค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎี 1.667 จากการใช้โปรแกรม Fractal ที่พัฒนาขึ้นพบว่าได้ค่ามิติแฟรคทัลเป็น 1.496 (ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมแสดงในตารางที่ 3.4 และรูป 3.10)

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667

$1/\lambda$	$L(\lambda)$	$\log(1/\lambda)$	$\log L(\lambda)$
2	4	0.301	0.602
4	11	0.602	1.041
8	34	0.903	1.531
16	99	1.204	1.996
32	319	1.505	2.504
64	950	1.806	2.978
128	2687	2.107	3.429
256	6254	2.408	3.796
512	12532	2.709	4.098



รูปที่ 3.10 กราฟ Richardson ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fractal ในการประเมินค่ามิติแฟรคทัลของภาพ Koch Island ที่มีค่ามิติแฟรคทัล 1.667 พบได้ค่ามิติแฟรคทัล = 1.496

3.3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมที่ได้ และการแก้ไขโปรแกรม

ค่ามิติแฟรคทัลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม Fractal ของภาพที่เป็นแฟรคทัลที่สร้างขึ้นจากทฤษฎีทั้ง 4 แบบนั้นจะเห็นว่ายังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 3.5) ทั้งนี้น่าจะเนื่องมาจากว่าการใช้ขนาดของช่องตารางที่เล็กที่สุดที่ใช้ในโปรแกรม Fractal นี้มีขนาดเล็กเกินไป (ในที่นี้คือขนาด 1 พิกเซล) และขนาดของช่องตารางที่ใหญ่ที่สุดที่ใช้ในโปรแกรม Fractal นี้มีขนาดใหญ่เกินไป (ในที่นี้คือขนาดหนึ่งในสี่ของภาพทั้งภาพ) ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีผลกับความถูกต้องของค่ามิติแฟรคทัล ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงการใช้ขนาดของช่องที่เล็กที่สุด และใหญ่ที่สุดของโปรแกรม Fractal ใหม่ พบว่าการตัดค่าของช่องตารางที่มีขนาดเล็กที่สุดออก 3 ค่าคือให้ขนาดของช่อง $1/\lambda$ ที่เล็กที่สุด มีค่าเท่ากับ 64 และตัดค่าของช่องตารางที่มีขนาดใหญ่ที่สุดออก 1 ค่าคือให้ขนาดของช่อง $1/\lambda$ ที่ใหญ่ที่สุด เท่ากับ 4 จะทำให้ได้ค่ามิติแฟรคทัลของภาพทั้ง 4 ที่ได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับค่ามิติแฟรคทัลเชิงทฤษฎีเท่ากับมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องตารางทั้งสองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Graf (1991) และ Foroutan-pour (1999) กล่าวคือการใช้สเกลของช่องวัดขนาดแฟรคทัลที่เล็กเกินไปจะทำให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่สามารถอธิบายรูปทรงในเชิงมหภาคของอนุภาคได้ แต่จะเป็นการแสดงผลข้อมูลในเชิงจุลภาคแทน ส่วนการใช้ช่องขนาดของตารางที่ใหญ่ที่สุดไม่ควรเกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดที่กว้างที่สุดของภาพ

ตารางที่ 3.5 ค่ามิติแฟรคทัล และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม Fractal ก่อนและหลังการปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม

ชนิดของภาพ	ค่าเชิงทฤษฎี เท่ากับ	ค่าที่ได้จาก โปรแกรม (ก่อนแก้ไข)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ค่าที่ได้จาก โปรแกรม (หลังแก้ไข)	ความคลาด เคลื่อน (%)
Snow	1.262	1.203	4.67	1.248	1.11
Quadric Koch Island	1.500	1.376	8.27	1.494	0.40
Koch Island	1.613	1.404	12.96	1.594	1.12
Koch Island	1.667	1.496	10.26	1.610	3.42

บทที่ 4

โปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาค

การประเมินขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพในปัจจุบันสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้นเนื่องจากเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพที่สูงมาก จึงทำให้มีโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ภาพถูกประดิษฐ์ขึ้นมาจำนวนมากจากหลากหลายบริษัท อาทิเช่น โปรแกรม Image-Pro Plus Version 3.0 ของบริษัท Media Cybernetics ที่มีความสามารถในการประเมินขนาดของรูปทรงได้หลายรูปแบบ เช่น ขนาดที่สั้นที่สุด, ขนาดที่ยาวที่สุด และอัตราส่วนด้าน เป็นต้น แต่ทั้งนี้โปรแกรกดังกล่าวยังไม่มีการประเมินเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในบางลักษณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอร์เรท (Ferret diameter) ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงสถิติที่มีผู้ใช้เป็นจำนวนมากในการประเมินขนาดของอนุภาคเนื่องจากสามารถทำได้ง่าย ดังนั้นโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินขนาดของอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจะประเมินขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอร์เรท ในที่นี้ได้ตั้งชื่อโปรแกรมน่าว่า "Det-Feret" ซึ่งรวมอยู่ในโปรแกรม "IMAGE-FF"

4.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมประเมินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแบบเฟอร์เรทเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยคณะผู้วิจัยโดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก เวอร์ชัน 6.0 (Visual Basic 6) ซึ่งการทำงานมีขั้นตอนดังนี้คือ

- ขั้นตอนการรับข้อมูล
- ขั้นตอนการประมวลผล
- ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล

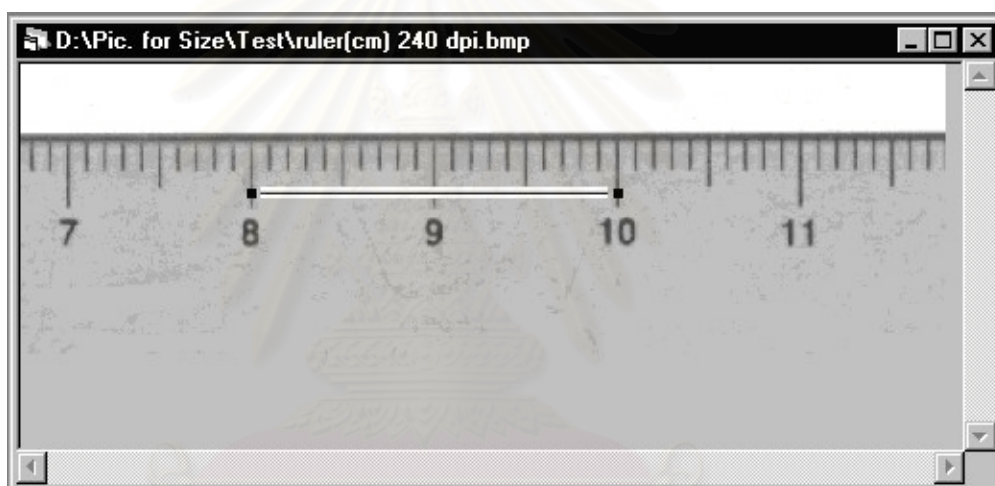
โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 ขั้นตอนการรับข้อมูล

ข้อมูลที่ได้รับเข้าสู่โปรแกรมนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1) ข้อมูลสำหรับการสอบเทียบ (Calibration Data)

ขั้นตอนนี้ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องมีการเปิดภาพที่เป็นภาพดิจิทัลของสเกลที่ทราบขนาดแน่นอน จากนั้นให้ผู้ใช้ทำการขยายขนาดของเส้นตรงที่อยู่ในภาพสเกลนั้นให้มียาวตามขนาดของสเกลที่ต้องการกำหนดเช่น 10, 20, 25 หรือ 35 ไมครอน/เซนติเมตร หรือหน่วยความยาวอื่นๆ ดังตัวอย่างจากรูป 4.1 เส้นตรงถูกขยายขนาดให้มีความยาวเท่ากับสเกลขนาด 2 เซนติเมตร จากนั้นผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลความยาวของเส้นตรงสเกลตามที่ได้ขยายไว้ข้างต้น (ตามรูปที่ 4.1 คือ 2 เซนติเมตร) โปรแกรมก็จะได้ข้อมูลของจำนวนพิกเซลต่อหน่วยความยาว ซึ่งจะใช้ในการประมวลผลต่อไป



รูปที่ 4.1 การป้อนข้อมูลการสอบเทียบด้วยการกำหนดความยาวของเส้นตรงตามขนาดของสเกลที่มีขนาด 2 เซนติเมตร

2) ข้อมูลของกลุ่มของอนุภาค

หลังจากที่ได้ข้อมูลสำหรับการสอบเทียบแล้วข้อมูลต่อไปที่โปรแกรมต้องการคือข้อมูลของภาพดิจิทัลที่เป็นหนึ่งระนาบมิติของกลุ่มของอนุภาคที่ต้องการหาขนาดโดยภาพของกลุ่มอนุภาคเหล่านี้จะต้องมีการแต่งรูปภาพก่อน เช่นแบ่งอนุภาคที่ติดกันอยู่ออกจากกัน ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางด้านกราฟิกที่มีอยู่ทั่วไป

4.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล

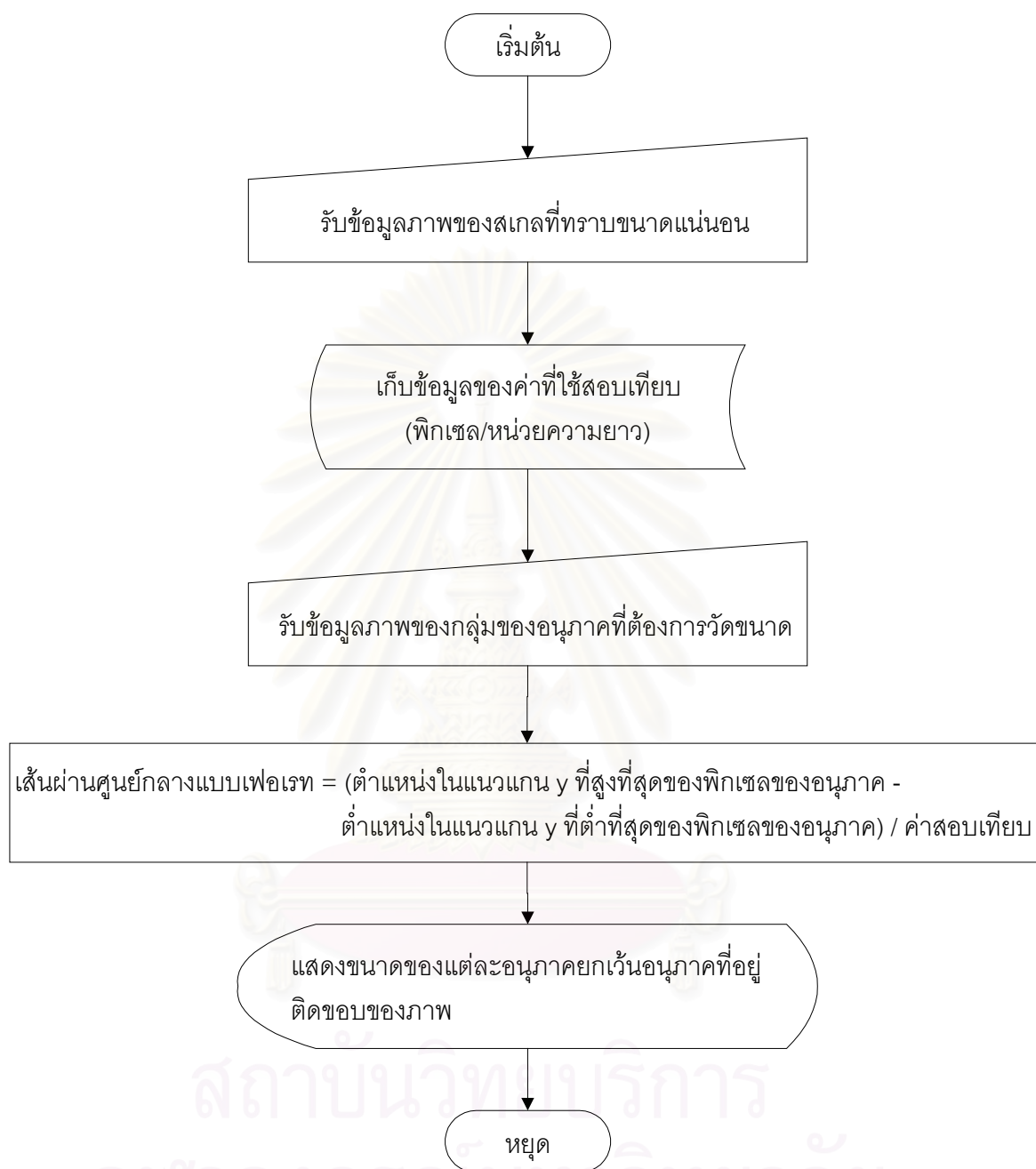
ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะหาค่าของตำแหน่งของพิกเซลที่อยู่สูงที่สุด และต่ำที่สุดของแต่ละอนุภาคในภาพตามแนวตั้ง จากนั้นจะหาระยะห่างระหว่างสองจุดนั้น (ในหน่วยพิกเซล) ของทุกอนุภาค เมื่อนำค่าระยะห่างนี้ไปคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้มาจากการสอบเทียบก็จะได้ขนาดที่แท้จริงของอนุภาคแต่ละอนุภาคเหล่านั้น

4.1.3 ขั้นตอนการแสดงผลข้อมูล

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะแสดงข้อมูลของขนาดซึ่งเป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรทของแต่ละอนุภาคในภาพดิจิทัลหนึ่งระนาบปิดทั้งหมด ยกเว้นอนุภาคที่อยู่ติดขอบของภาพ เนื่องจากขนาดของอนุภาคนั้นอาจจะผิดพลาดได้เพราะอนุภาคที่อยู่ติดขอบของภาพมักจะเป็นภาพที่ไม่เต็มอนุภาค



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

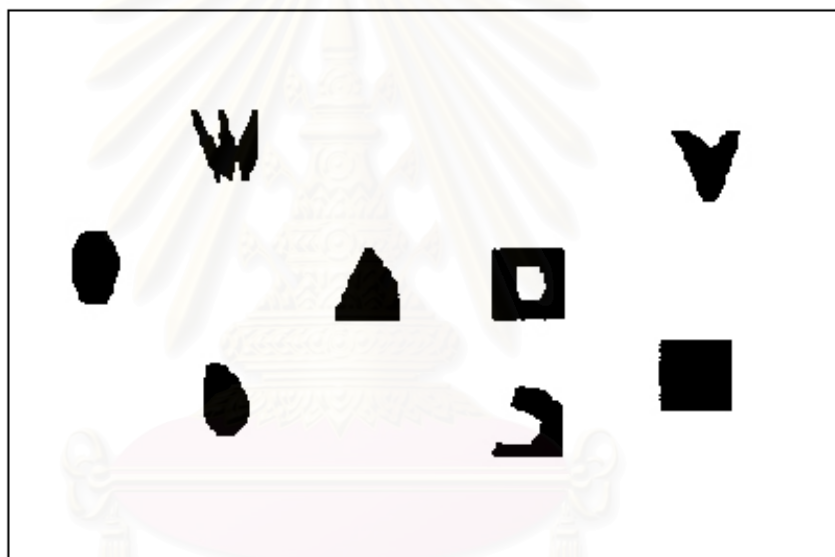


รูปที่ 4.2 ^๕ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลโปรแกรมวิเคราะห์ขนาดของภาพของกลุ่มอนุภาค

4.2 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมและผลที่ได้

4.2.1 วิธีการทดสอบโปรแกรม

การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาค (โปรแกรม Det-Feret) ทำโดยการนำภาพของกลุ่มรูปทรงต่างๆ ที่แตกต่างกัน 8 รูปโดยที่แต่ละรูปมีเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรตามแนวตั้งขนาด 4 มิลลิเมตรเท่ากันทุกรูป (รูปที่ 4.3) มากราดภาพด้วยเครื่องส่องกราดภาพที่ความคมชัดของภาพ 240 จุดต่อนิ้ว จากนั้นนำไปประเมินขนาดโปรแกรม Det-Feret โดยภาพที่ใช้ในการสอบเทียบในครั้งนี้คือ ภาพสเกลของไม้บรรทัดที่มีสเกลที่ละเอียดที่สุดคือ 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.3 ภาพของกลุ่มของรูปทรงที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาค

4.2.2 ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม Det-Feret ของภาพกลุ่มรูปทรงต่างๆ ทั้ง 8 รูป พบว่าโปรแกรมสามารถประเมินค่าเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรทได้ถูกต้องทั้งหมดทุกรูปทรงคือ 4 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

4.3 การทดลองวัดการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น

4.3.1 อนุภาคที่ใช้ทดลอง

อนุภาคที่ใช้ในการทดลองนี้มีสองชนิดซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกัน คือ JIS TEST POWDER I No.5 และ JIS TEST POWDER II No.4 ซึ่งผลิตโดย The Association of Powder Process Industry & Engineering, Japan มีคุณสมบัติตามที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น JIS Z8901 (JIS Z8901 – Test powders and test particles) โดยทั่วไปใช้สำหรับการทดสอบและสอบเทียบเครื่องมือทางอุตสาหกรรม ทั้งนี้อนุภาสดังกล่าวมีคุณสมบัติดังนี้

1) JIS TEST POWDER I No. 5

ชื่อ : Fly ash

องค์ประกอบทางเคมี :

ส่วนประกอบ	สัดส่วนมวล (%)
SiO ₂	> 45
Al ₂ O ₃	> 20

ความหนาแน่นของอนุภาค : 2.0 ~ 2.3 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

พื้นที่ผิวจำเพาะ : 0.36 ตารางเมตร/กรัม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน : 13 ~ 17 ไมโครเมตร

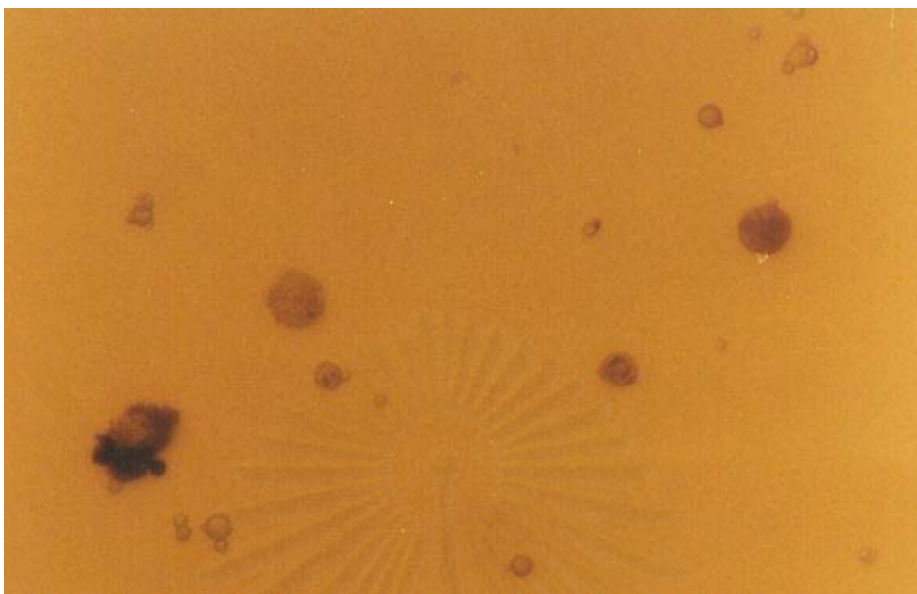
การกระจายขนาด :

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดใหญ่กว่าแบบมวลเป็นฐาน (%)
5	84 ± 5
10	60 ± 5
20	32 ± 3
30	15 ± 3
40	8 ± 3
106	0

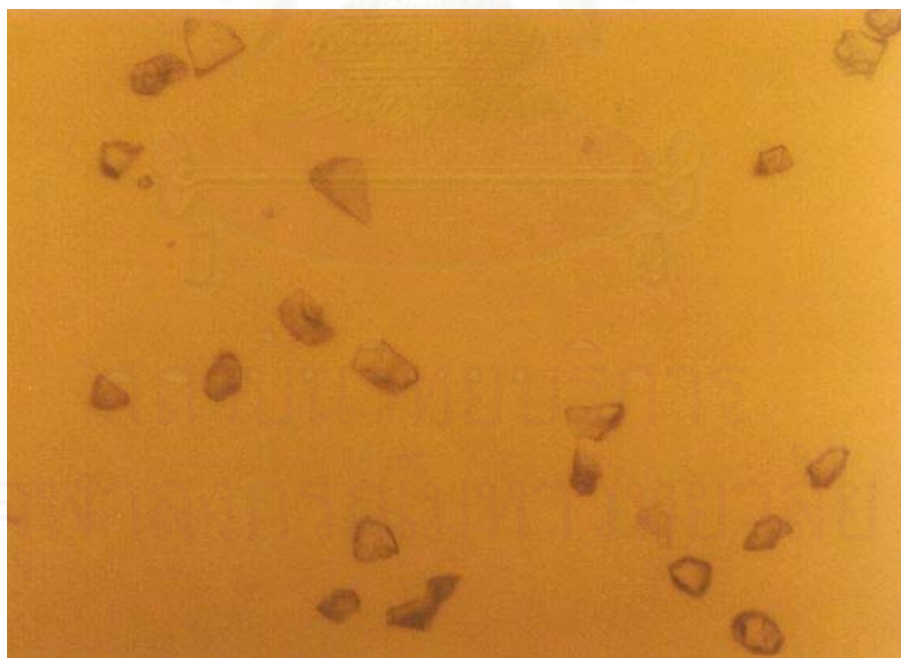
2) JIS TEST POWDER II No.4

- ชื่อ : White fused alumina
องค์ประกอบทางเคมี : ประกอบด้วย Al_2O_3 99% หรือมากกว่า
ความหนาแน่นของอนุภาค : 3.9 ~ 4.0 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
พื้นที่ผิวจำเพาะ : 0.3 ~ 0.5 ตารางเมตร/กรัม
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน : 14 ± 0.45 ไมโครเมตร
การกระจายขนาด :

ขนาด (ไมโครเมตร)	สัดส่วนจำนวน (%)	สัดส่วนมวล (%)
3.17 – 4.00	0.0	0.0
4.00 – 5.04	0.0	0.0
5.04 – 6.35	2.5	0.2
6.35 – 8.00	2.8	0.4
8.00 – 10.1	3.3	0.9
10.1 – 12.7	24.0	13.9
12.7 – 16.0	50.7	51.1
16.0 – 20.2	15.2	28.2
20.2 – 25.4	1.4	4.9
25.4 – 32.0	0.1	0.5
32.0 – 40.3	0.0	0.0



รูปที่ 4.4 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค *JIS TEST POWDER I No.5*
(กำลังขยาย 132 เท่า)

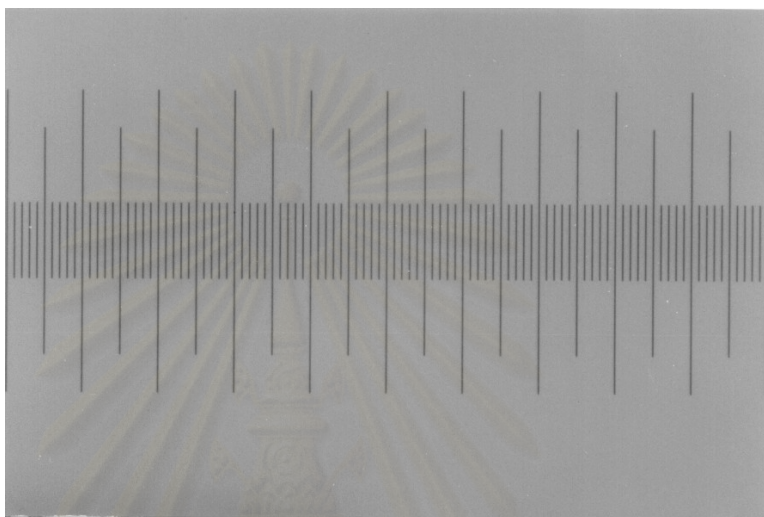


รูปที่ 4.5 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของอนุภาค *JIS TEST POWDER II No.4*
(กำลังขยาย 66 เท่า)

4.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) กล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ (Optical microscope) รุ่น BH-2 ของ Olympus
- 2) สเตจไมโครมิเตอร์ (Stage micrometer)

เป็นแผ่นสไลด์ที่มีสเกลที่มีขนาดแน่นอนบรรจุอยู่ด้วยความยาวของสเกลทั้งหมดคือ 0.01 มิลลิเมตร และภายในจะถูกแบ่งเป็นเป็นช่องเล็กๆ 100 ช่อง



รูปที่ 4.6 ลักษณะของสเกลภายในสเตจไมโครมิเตอร์

- 3) ขวดไวอัล (Vial) ขนาด 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 4) ปิเปต (Pipet) ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 5) แผ่นกระจกสไลด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

- 1) เตรียมอนุภาคตัวอย่างที่จะใช้สำหรับการทดสอบประมาณ 10 มิลลิกรัม (การสุ่มตัวอย่างควรสุ่มตัวอย่างมาจากกลุ่มของอนุภาคผงตัวอย่างเริ่มต้นที่มีจำนวนไม่เกิน 5 กรัมโดยปราศจากอคติ)
- 2) นำอนุภาคตัวอย่างแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นของเหลว (ความเข้มข้นของอนุภาคตัวอย่างในของเหลวสามารถเปลี่ยนแปลงได้เพื่อให้อนุภาคไม่ติดกันบนแผ่นสไลด์ (glass slide) และเรียงตัวเป็นชั้นเดียว (monolayer))

หมายเหตุ ตัวกลางที่เป็นของเหลวควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ต้องไม่ทำละลาย หรือเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์
 - มีค่าดัชนีหักเห (refractive index) ต่ำเพียงพอที่ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างอนุภาคตัวอย่างกับตัวกลางของเหลว
- 3) นำสารแขวนลอยที่ได้ใส่ลงในขวดไวอัลเพื่อกระจายตัวอย่างอนุภาคด้วยการกลับขวดไปมาหลายๆ ครั้ง จนอนุภาคกระจายเป็นเนื้อเดียวกันในตัวกลางที่เป็นของเหลว
 - 4) นำสารแขวนลอยที่กระจายเป็นเนื้อเดียวกันหยดลงบนแผ่นสไลด์ด้วยปิเปตที่มีปากค่อนข้างใหญ่ (เพื่อป้องกันการคัดแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกไป)
 - 5) ถ่ายภาพของกลุ่มของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงทัศนศาสตร์ อย่างต่ำจำนวน 500 อนุภาค และถ่ายภาพของสเตจไมโครมิเตอร์ที่กำลังขยายเดียวกันกับที่ใช้ในการถ่ายอนุภาค
 - 6) นำภาพถ่ายของกลุ่มอนุภาคมาส่งกราฟภาพด้วยความละเอียด 240 จุดต่อนิ้ว
 - 7) ทำการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคแบบเฟอเรทด้วยการใช้โปรแกรม Det-Feret (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 4.2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดลองบดย่อยอนุภาคด้วยเครื่องบดย่อยแบบฟันขบ

5.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในการบดย่อยในงานวิจัยนี้คือ หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต(บ.ปูนคุณภาพจำกัด) มีการกระจายขนาดดังตารางที่ 5.1 ซึ่งได้มาจากการคัดแยกอนุภาคด้วยการใช้ตะแกรงร่อนจากนั้นนำอนุภาคเหล่านี้ไปหารูปทรงด้วยหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัล และหาคุณสมบัติการไหลด้วยเครื่อง powder tester ได้ค่าต่างๆ ดังนี้

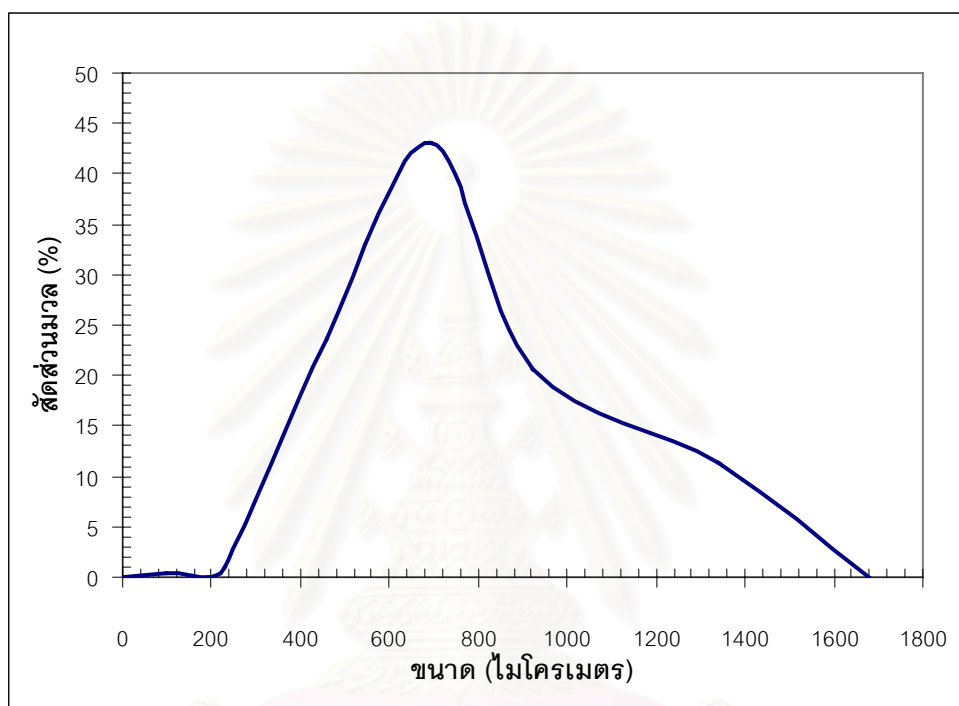
$$\text{ดัชนีการไหล (Flowability Index)} = 88.50$$

$$\text{ดัชนีการไหลทะเล็ก (Floodability Index)} = 57.25$$

$$\text{ค่ามิติแฟรคทัลเฉลี่ย} = 1.056$$

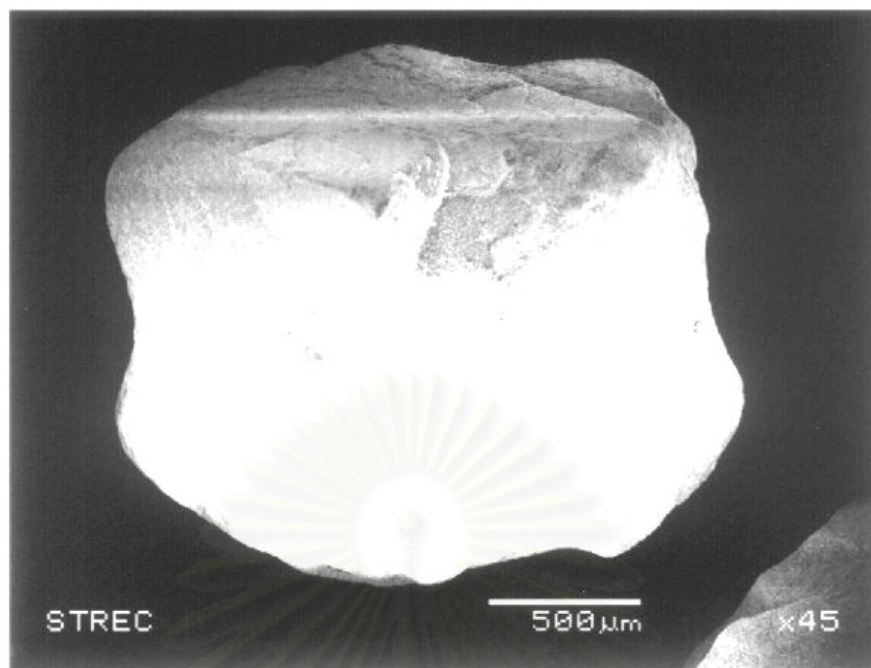
ตารางที่ 5.1 การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุประสงค์สำหรับการทดลอง

ขนาด	ครั้งที่								เฉลี่ย	%โดยน้ำหนัก
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1000-1680	19.94	26.88	25.83	29.20	18.45	34.53	32.03	24.99	26.48	11.25
841-1000	39.01	46.72	48.12	56.54	38.20	59.99	54.68	46.99	48.78	20.73
548-841	114.24	110.61	102.03	91.23	110.57	83.86	97.33	99.22	101.14	42.98
373-548	62.13	66.46	57.49	41.54	68.72	42.10	47.01	59.09	55.57	23.61
289-373	2.53	2.72	2.18	1.34	2.94	1.58	1.59	2.36	2.15	0.92
199-289	0.12	0.18	0.07	0.07	0.16	0.09	0.08	0.14	0.11	0.05
0-199	0.97	1.80	1.05	0.97	0.69	1.13	1.18	0.81	1.08	0.46
รวม									235.31	100.00

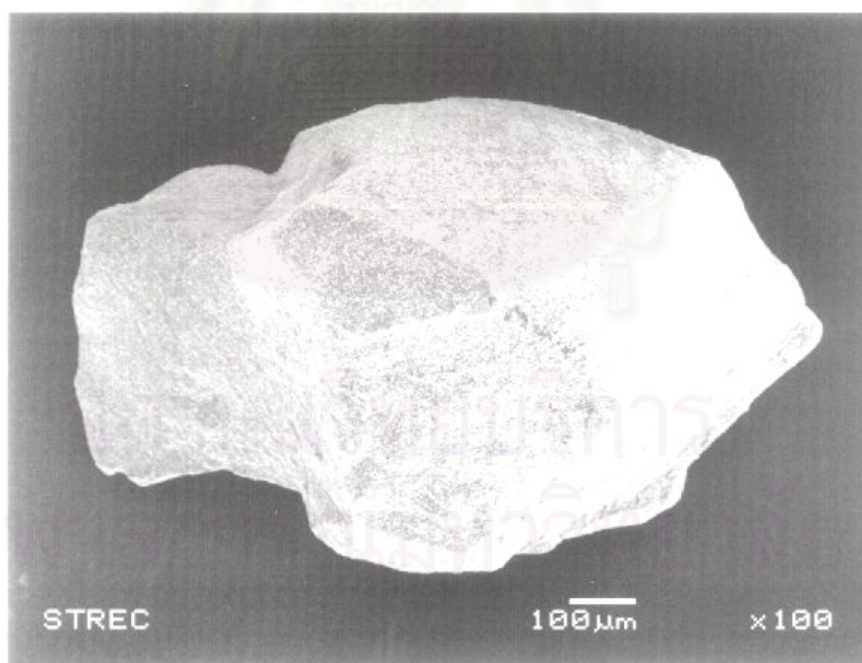


รูปที่ 5.1 การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุดิบสำหรับการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.056 (กำลังขยาย 45 เท่า)



รูปที่ 5.3 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.057 (กำลังขยาย 100 เท่า)

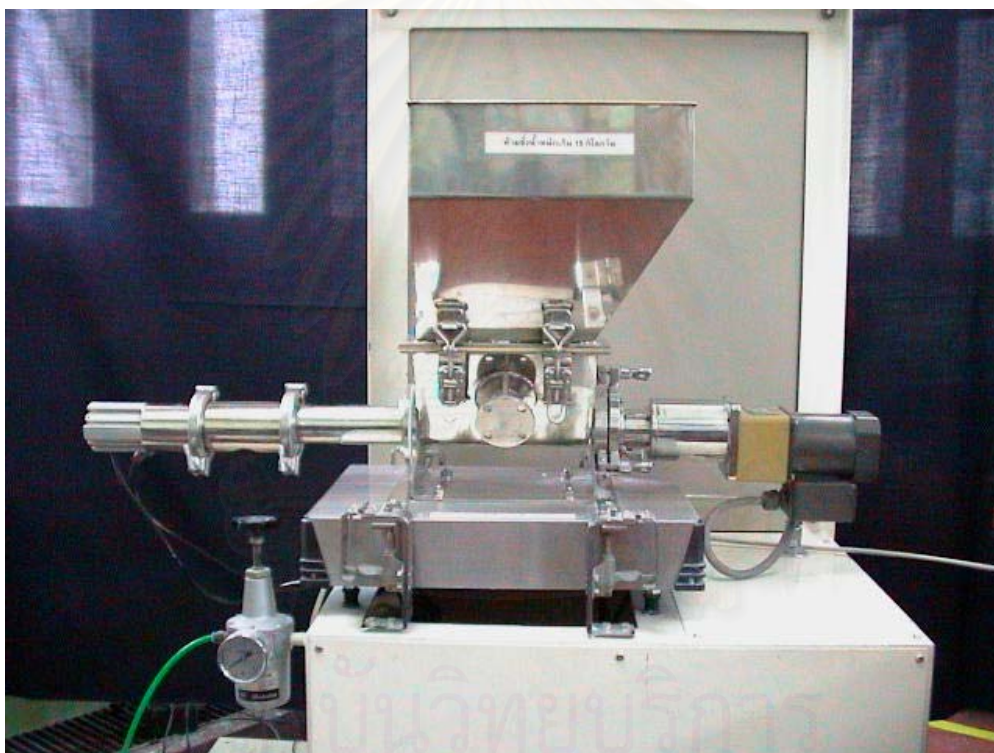
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องบดย่อย Nara Jiyu Mill

รายละเอียดดูในภาคผนวก ก.

2. เครื่องป้อนสารแบบสกรู (Screw feeder)

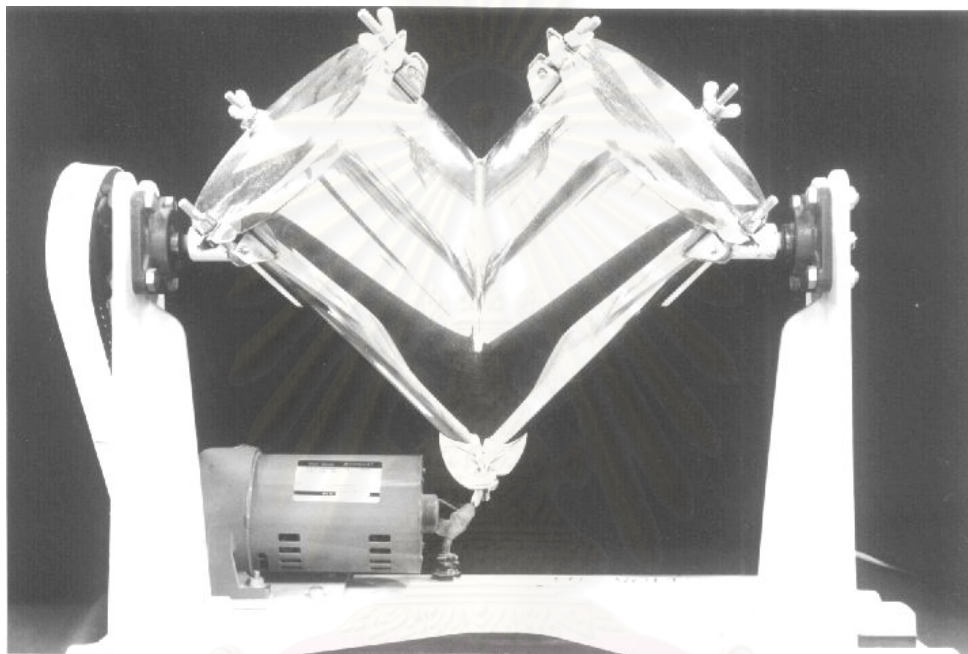
เครื่องป้อนสารแบบสกรู จากบริษัท Akatake Engineering Co.,Ltd. เป็นอุปกรณ์สำหรับการป้อนวัสดุผงแบบเชิงปริมาตร (volumetric feeder) เพื่อการชั่งปริมาณสารแบบแบทช์ที่มีความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 5.4 เครื่องป้อนแบบสกรู(Screw feeder)

3. เครื่องผสมรูปตัววี (V-Shape mixer)

เครื่องผสมรูปตัววีรุ่น V5 จากบริษัท Tokuju Corporation โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 ซม. ปริมาตรของภาชนะรูปตัววีจะมีประมาณ 13 ลิตร แต่ปริมาตรที่เหมาะสมในการปฏิบัติงานคือ 5 ลิตร จะมีช่องเปิดสำหรับเทสารออกที่บริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง เครื่องผสมนี้ไม่สามารถปรับความเร็วรอบในการผสมได้โดยจะมีความเร็ว 30 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.5 เครื่องผสมรูปตัววี (V-Shape mixer)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. เครื่องร่อนแบบมาตรฐาน (Vibro Standard Screen Shaker)

เครื่องร่อนแบบมาตรฐานรุ่น VSS-50 จากบริษัท Koei Sangyo Co., Ltd. เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับคัดแยกขนาดของวัสดุผง โดยอาศัยหลักการของการสั่นร่วมกับการหมุนด้วยความเร็ว 1,000-5,000 รอบต่อนาที ในเวลาเดียวกัน มีตัวตั้งเวลาหยุดการสั่น และปุ่มปรับแรงสั่น ตะแกรงร่อนที่ใช้ร่วมกับเครื่องร่อนแบบมาตรฐานนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เพื่อให้การคัดแยกอนุภาคสารได้อย่างมีประสิทธิภาพเกณฑ์แนะนำสำหรับปรับความแรงของการสั่นโดยพิจารณาตามขนาดของอนุภาคดังนี้

ขนาดใหญ่กว่า 60 เมช	ให้ปรับที่เบอร์ 5-7
ขนาด 60-150 เมช	ให้ปรับที่เบอร์ 7-8.5
ขนาด 150-325 เมช	ให้ปรับที่เบอร์ 10



รูปที่ 5.6 เครื่องร่อนแบบมาตรฐาน (Vibro Standard Screen Shaker)

5. เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester)

เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester) รุ่น PT-N จากบริษัท Hosokawa Micron ซึ่งได้สร้างและพัฒนาขึ้นตามหลักการของ Carr (1969) ในการประเมินค่าดัชนีการไหลและดัชนีการไหลทะลักของ (Flowability และ Floodability Index) วัสดุผงแห้งโดยลักษณะสมบัติต่างๆ ที่วัด แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่วัดลักษณะสมบัติเชิงกล ได้แก่

- มุมขณะสงบ (angle of repose)
- มุมหลังตก (angle of fall)
- มุมบนพายตัก (angle of spatula)
- มุมผลต่าง (angle of difference)
- ค่าความอัดตัว (compressibility)
- ค่าการแผ่กระจาย (dispersibility)
- ค่าความเกาะกัน (cohesiveness)

2. กลุ่มที่วัดลักษณะสมบัติสัณฐาน ได้แก่

- ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม (aerated bulk density)
- ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด (packed bulk density)
- ค่าความสม่ำเสมอ (uniformity)



รูปที่ 5.7 เครื่องทดสอบลักษณะสมบัติของวัสดุผง (Powder Characteristic Tester)

5.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงปัจจัย 2 ชนิดอันได้แก่ อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ และขนาดช่องเปิดของแรง เพื่อทำการศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับขนาด, รูปร่าง และคุณสมบัติการไหลตัวของอนุภาคสารที่ได้จากการบดย่อยจากการเปลี่ยนปัจจัยทั้งสองชนิดนี้

ช่วงของสภาวะปฏิบัติงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังนี้

- 1) อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ : 12, 63, 114 และ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- 2) ขนาดช่องเปิดของแรง(ช่องเปิดแบบวงกลม) : 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร

5.4 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนในการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

5.4.1 การบดย่อย และวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของอนุภาคที่ผ่านการบดย่อย

- 1) ประกอบแรงที่มีขนาดช่องเปิดตามสภาวะที่ใช้ในการทดลองกับเครื่องบด Nara Jiyu Mill(ซึ่งต่อไปจะขอเรียกว่า เครื่องบด)
- 2) เติมน้ำมันคาร์บอนลงในฮอปเปอร์ของเครื่องป้อนสารแบบสกรู ปรับอัตราความเร็วของเครื่องป้อนสารแบบสกรู ตามสภาวะที่ใช้ในการทดลอง
- 3) เดินเครื่องป้อนสารแบบสกรูทิ้งไว้ประมาณ 3 นาทีก่อนที่จะทำการต่อท่อจากช่องเปิดของเครื่องป้อนสารแบบสกรูเข้ากับช่องสำหรับป้อนสารของเครื่องบด เพื่อให้มีแคลเซียมคาร์บอเนตเต็มท่อทางออกของเครื่องป้อนสารแบบสกรู
- 4) ต่อท่อจากช่องเปิดของเครื่องป้อนสารแบบสกรูเข้ากับช่องสำหรับป้อนสารของเครื่องบด
- 5) เดินเครื่องบดตัวเปล่าทิ้งไว้ก่อนเป็นเวลาประมาณ 3 นาที จึงเริ่มเดินเครื่องป้อนสารแบบสกรูเพื่อป้อนแคลเซียมคาร์บอเนตให้กับเครื่องบด
- 6) เมื่อป้อนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นจำนวนประมาณ 5 กิโลกรัม ให้หยุดเครื่องป้อนสารแบบสกรูแต่ให้เดินเครื่องบดต่อไปอีกประมาณ 2 นาทีจึงหยุดเครื่อง
- 7) นำอนุภาคที่ได้จากการบดทั้งหมด (lot) มาผสมในเครื่องผสมรูปตัววีเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้อนุภาคมีเนื้อเดียวกันทั้งหมดจากนั้นนำไปวัดขนาดด้วยเครื่องร่อนแบบมาตรฐาน

8) วิเคราะห์คุณสมบัติการไหลด้วยเครื่อง powder tester โดยคุณสมบัติที่ทำการวิเคราะห์มีดังนี้

ก. ค่าดัชนีการไหล ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

- มุมขณะสงบ
- มุมบนพายตัก
- ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม
- ความหนาแน่นปรากฏขณะอัดค่าความอัดตัว
- ค่าความเกาะกัน

ข. ค่าดัชนีการไหลทะลัก ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

- มุมหลังตก
- มุมผลต่าง
- ค่าการแผ่กระจาย

5.4.2 การวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลของอนุภาคที่ผ่านการบดย่อย

- 1) นำอนุภาคที่ได้จากการบดและผ่านการผสมด้วยเครื่องผสมรูปตัววีมาคัดแยกขนาดออกเป็น 5 ช่วง คือ 0-45, 45-75, 75-106, 106-180 และ 180-250 ไมโครเมตร
- 2) นำตัวอย่างอนุภาคที่ได้จากการคัดแยกขนาด (จากข้อ 1) ไปถ่ายภาพอนุภาคเดี่ยวๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูรูปร่างของอนุภาคที่ได้จากการบด
- 3) นำภาพถ่ายที่ได้มากราดด้วยเครื่องส่องกราดภาพที่ความละเอียด 240 จุดต่อนิ้ว
- 4) ทำการวิเคราะห์รูปร่างของอนุภาคที่ได้จากการบดด้วยหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัลด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมา (ดูรายละเอียดในบทที่ 3)

บทที่ 6

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ค่ากระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพจากโปรแกรมประเมินขนาดของอนุภาคที่ประดิษฐ์ขึ้นมา (ดูรายละเอียดของวิธีการทดลองได้ในหัวข้อ 4.3) เปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์การกระจายขนาดด้วยวิธีอื่นและวิธีที่คล้ายคลึงกัน เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของการวัดขนาดอนุภาคของโปรแกรมที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมา ในส่วนที่สองจะกล่าวถึงผลการทดลองการบดย่อยอนุภาคและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยพิจารณาลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเงื่อนไขการบดย่อยต่างๆ (ดูรายละเอียดของวิธีการทดลองในบทที่ 5)

6.1 ผลการทดลองวัดการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

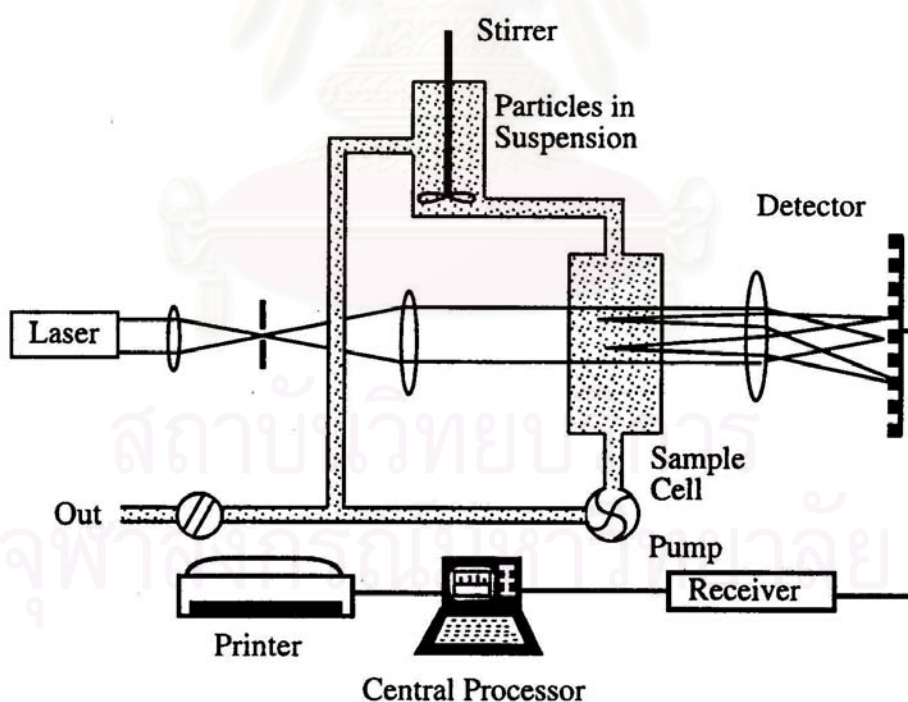
ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่นำมาใช้ทำการเปรียบเทียบในการทดลองนี้มีสามแบบ คือ ค่าการกระจายขนาดที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพ ค่าการกระจายขนาดอ้างอิง และค่าการกระจายขนาดที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องมือที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์ (laser diffraction) ซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะดังนี้

ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากเทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองชนิด คือ ค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดขนาดของอนุภาคด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอร์เรท (Ferret diameter) ด้วยโปรแกรม Det-Feret ที่ประดิษฐ์ขึ้น และค่าการกระจายขนาดที่วิเคราะห์โดยอาศัยหลักการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลม (Equivalent circle diameter) ด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus Version 3.0 (บริษัท Media Cybernetics)

ค่าการกระจายขนาดอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ ค่าการกระจายขนาดที่วัดโดยเครื่อง Coulter Multisizer (สำหรับอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4) ซึ่งวัดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard, JIS) และค่าการกระจายขนาดที่วัดโดยวิธีตะแกรงร่อนที่กำหนดในมาตรฐาน JIS (สำหรับอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5) อนึ่งค่าการกระจายขนาดอ้างอิงเป็นค่าการกระจายขนาดโดยมวล (mass basis) ส่วนค่าการกระจาย

ขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่วัดได้จากเครื่องที่ใช้เทคนิคการกระเจิงของแสงเลเซอร์ เป็นค่าการกระจายขนาดโดยปริมาตร แต่เนื่องจากอนุภาคมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นคงที่ ดังนั้นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยปริมาตรที่วัดได้จากเครื่องที่ใช้เทคนิคการกระเจิงของแสงเลเซอร์ จึงมีค่าเท่ากับค่าการกระจายขนาดโดยมวล

ค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์ เป็นค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง Mastersizer S Particle Size Analyzer (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และเครื่อง Beckman Coulter LS (ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคข้างต้นอาศัยหลักการในการวิเคราะห์ขนาดที่เรียกว่า Low-angle laser light-scattering instrument คือ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ (laser beam) จะทำให้แสงเกิดการกระจาย (scatter) โดยที่มุมของการกระจายจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของอนุภาค แสงที่ถูกทำให้กระจายทั้งหมดจะถูกเก็บรวบรวมโดยตัวรับสัญญาณ (detector) เพื่อนำมาประมวลการกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยทั่วไปขนาดอนุภาคเล็กสุดที่วัดได้โดยวิธีการกระเจิงของแสงเลเซอร์ คือประมาณ 0.1 ไมโครเมตร



รูปที่ 6.1 หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเทคนิคการกระเจิงของแสง

6.1.1 การเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน และคล้ายคลึงกัน

อนุภาคที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีสองชนิดซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกัน คือ JIS TEST POWDER I No.5 ซึ่งมีลักษณะกลมเมื่อมองในลักษณะสองมิติจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 4.4) และ JIS TEST POWDER II No.4 ซึ่งมีรูปร่างแบบไม่ปกติ (irregular shape) (รูปที่ 4.5) เพื่อศึกษาค่าการกระจายขนาดที่ได้จากอนุภาคที่มีรูปร่างแตกต่างกัน

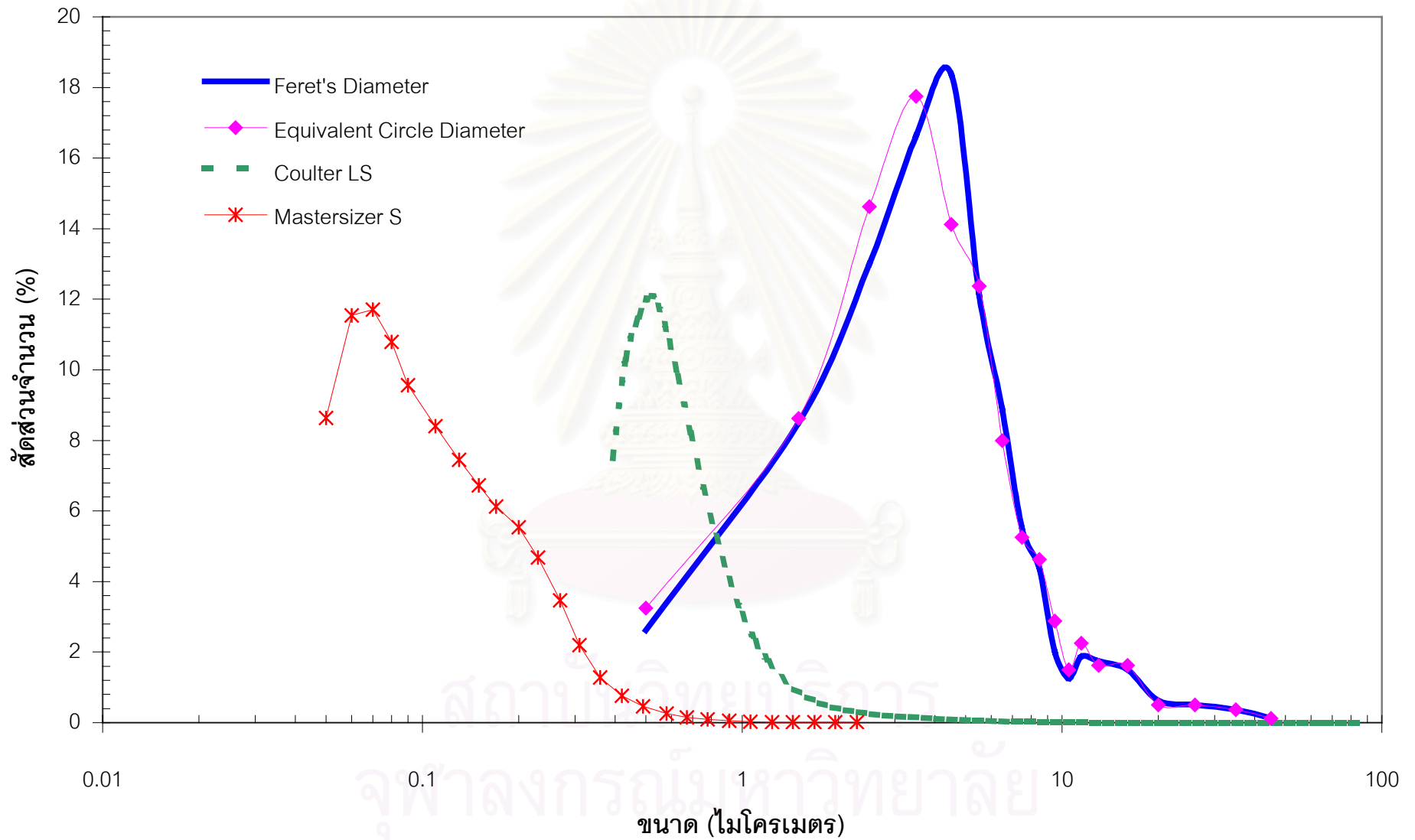
ผลจากการทดลองพบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์และค่าการกระจายขนาดแบบสะสมโดยจำนวนของอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพคือการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท และการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมมีลักษณะแตกต่างกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องมือที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์คือ Coulter LS และ Mastersizer S ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ส่วนค่าการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ และค่าการกระจายขนาดแบบสะสมโดยมวลของอนุภาคชนิดนี้ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mastersizer S จะมีลักษณะแตกต่างจากค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิงและค่าจากวิธีการอื่นๆ มาก แต่วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Coulter LS และวิธีการวิเคราะห์ภาพทั้งสองจะให้ลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับค่าการกระจายขนาดอ้างอิงมาตรฐานของ JIS ดังแสดงในรูปที่ 6.5

สำหรับอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 จากรูปที่ 6.6-6.9 พบว่าค่าการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์และค่าการกระจายขนาดแบบสะสมทั้งโดยจำนวนและโดยมวล ที่ได้จากเครื่อง Coulter LS และ Mastersizer S จะมีลักษณะแตกต่างจากค่าการกระจายขนาดอ้างอิงมาตรฐาน JIS มาก แต่ลักษณะการกระจายขนาดที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพทั้งสองวิธี จะมีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายขนาดอ้างอิงของ JIS

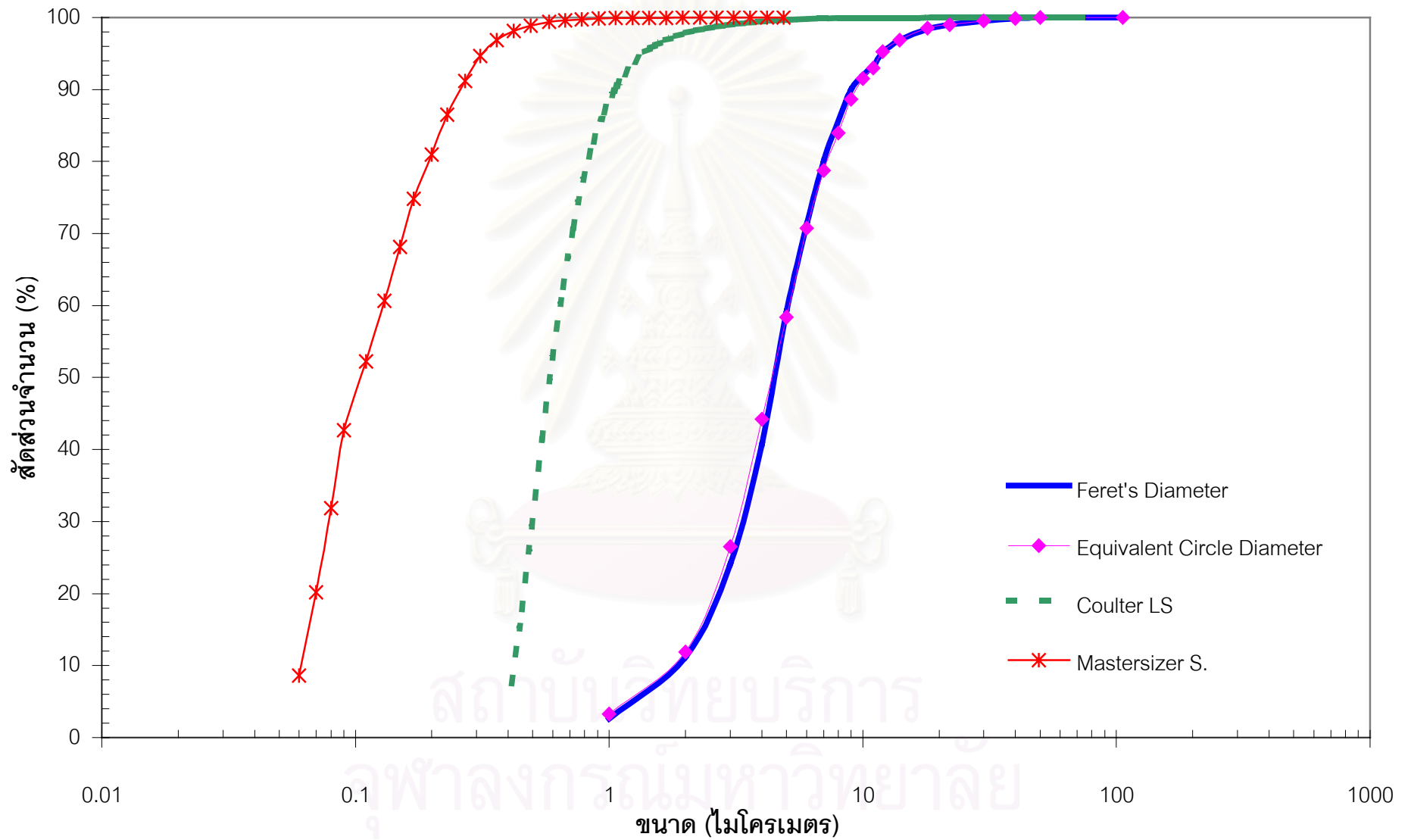
เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานที่ได้ก็มีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6.1 และ 6.2 ทั้งนี้เนื่องจากการใช้วิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่ต่างกันก็จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคถ้าข้อมูลที่ต้องการให้มีลักษณะของข้อมูลแบบใด (โดยจำนวน, โดยมวล หรือโดยปริมาตรเป็นฐาน) ก็ควรเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับข้อมูลนั้น

เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าการกระจายขนาดที่ได้มาจากการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเดียวกันพบว่า ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมและค่าการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์ทั้งแบบโดยจำนวน และโดยมวล ของอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 ที่วัดโดยใช้เครื่อง Mastersizer S กับค่าการกระจายขนาดที่วัดโดยใช้เครื่อง Beckman Coulter LS230 ซึ่งเป็นเครื่องที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์เหมือนกันก็ยังไม่ให้ลักษณะการกระจายขนาดที่แตกต่างกัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานที่ได้ก็มีความแตกต่างกันเช่นกัน (รูปที่ 6.2 - 6.5 และตารางที่ 6.1 - 6.2) ในทำนองเดียวกันค่าการกระจายขนาด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 ที่วัดโดยใช้เครื่อง Mastersizer S, เครื่อง Beckman Coulter LS230 และค่าการกระจายขนาดอ้างอิงที่วัดโดยใช้เครื่อง Coulter Multisizer (รูปที่ 6.6, 6.7, 6.8 และ 6.9 และตารางที่ 6.1 - 6.2) จะให้ลักษณะการกระจายขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่ได้เกิดจากความแตกต่างการออกแบบเครื่องมือ และ/หรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล หรือทั้งนี้คาดว่าอาจจะเกิดจากการขาดการสอบเทียบเครื่องมือ (calibration)

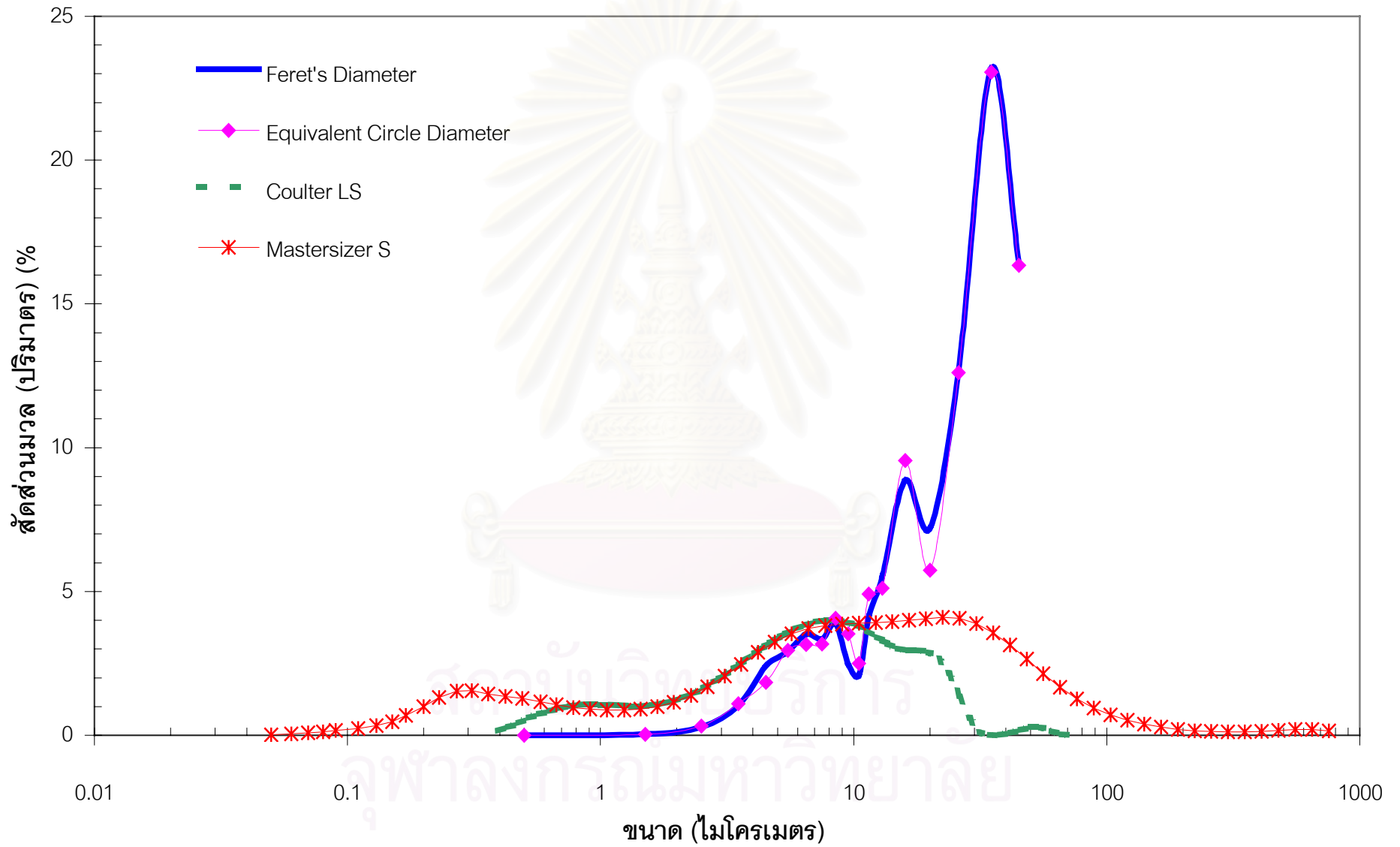
ส่วนค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ภาพ คือค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดขนาดของอนุภาคด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรนทโดยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น และค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดขนาดของอนุภาคด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่างกลมโดยโปรแกรม Image-Pro Plus Version 3.0 ของอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 จะมีลักษณะเหมือนกันโดยอาจมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยในบางจุดของข้อมูล ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคมาตรฐานชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะกลมเมื่อมองในลักษณะสองมิติ (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) สำหรับค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 ซึ่งมีรูปร่างแบบไม่ปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายขนาดที่ได้จะคล้ายคลึงกันเพียงแต่เส้นกราฟแสดงค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรนทจะเลื่อนออกไปในลักษณะที่ขนาดอนุภาคโดยรวมมีขนาดใหญ่กว่าค่าการกระจายขนาดที่ได้จากการวัดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่างกลม ดังจะเห็นได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานมีขนาดใหญ่กว่าดังในตารางที่ 6.1 เนื่องจากการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรนทในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่ปกติจะให้ขนาดที่ใหญ่กว่าการวัดขนาดโดยเส้นผ่านศูนย์กลางแบบอื่น (Allen, 1997)



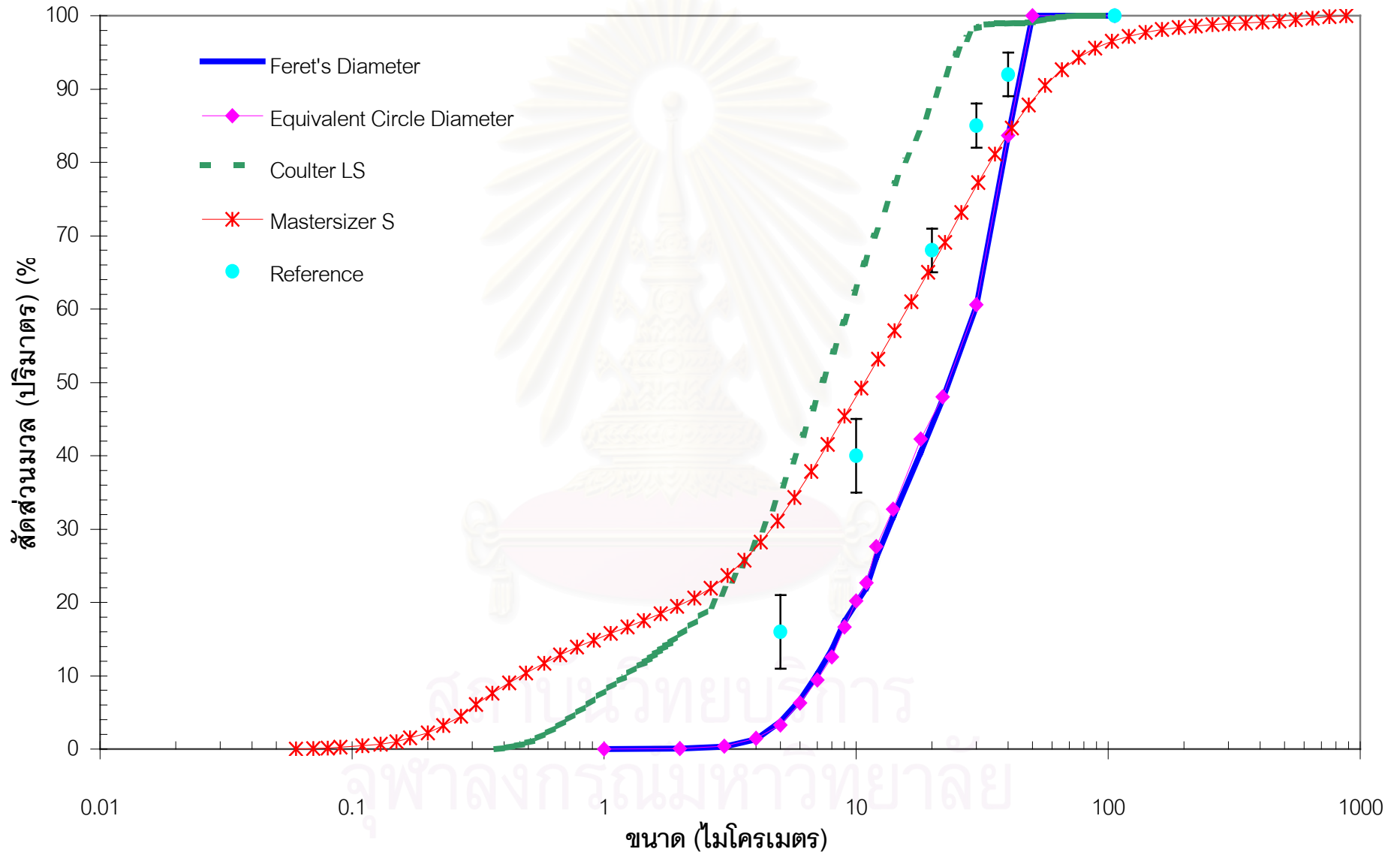
รูปที่ 6.2 การกระจายขนาดโดยใช้จำนวนเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



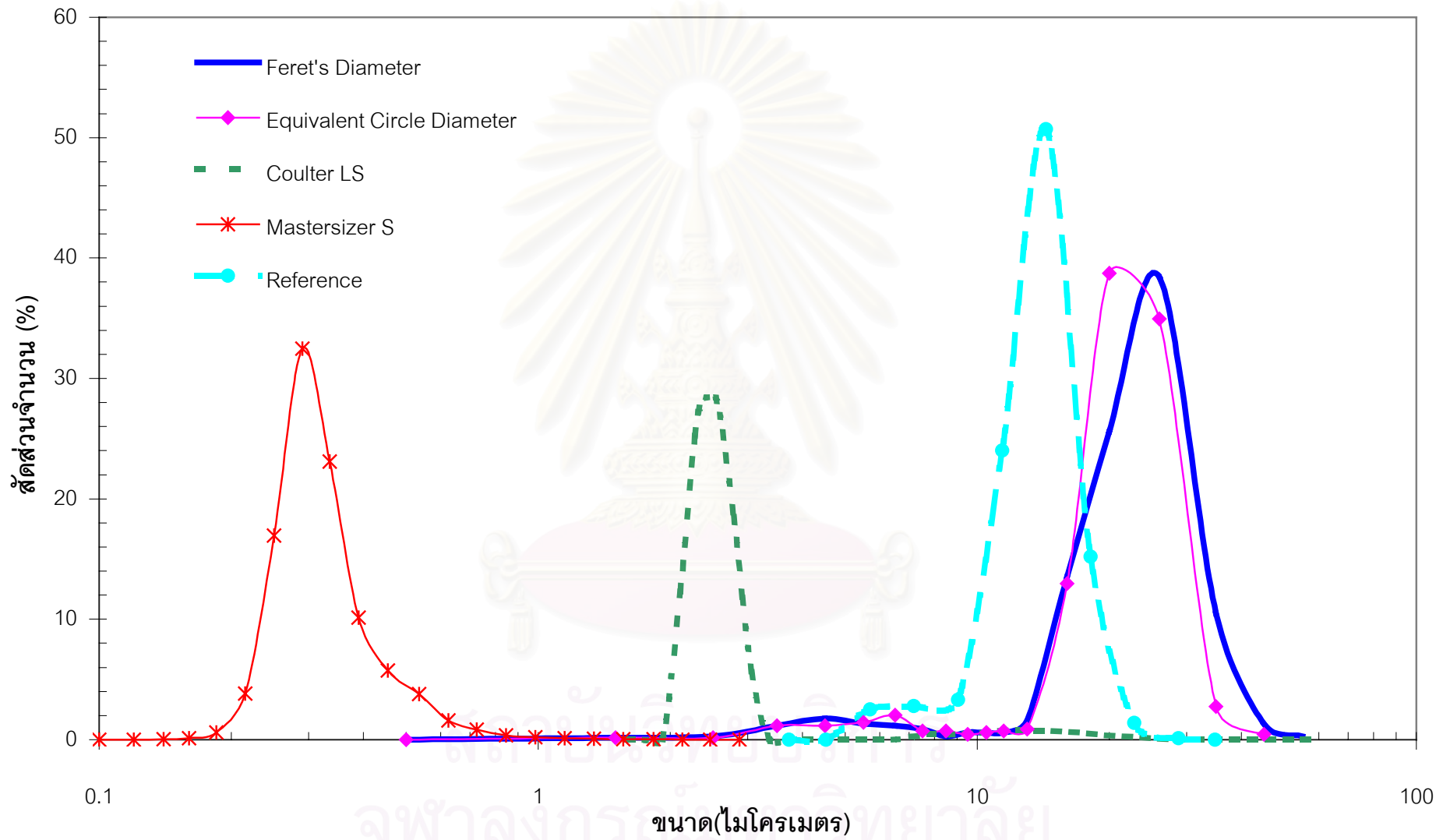
รูปที่ 6.3 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้จำนวนเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



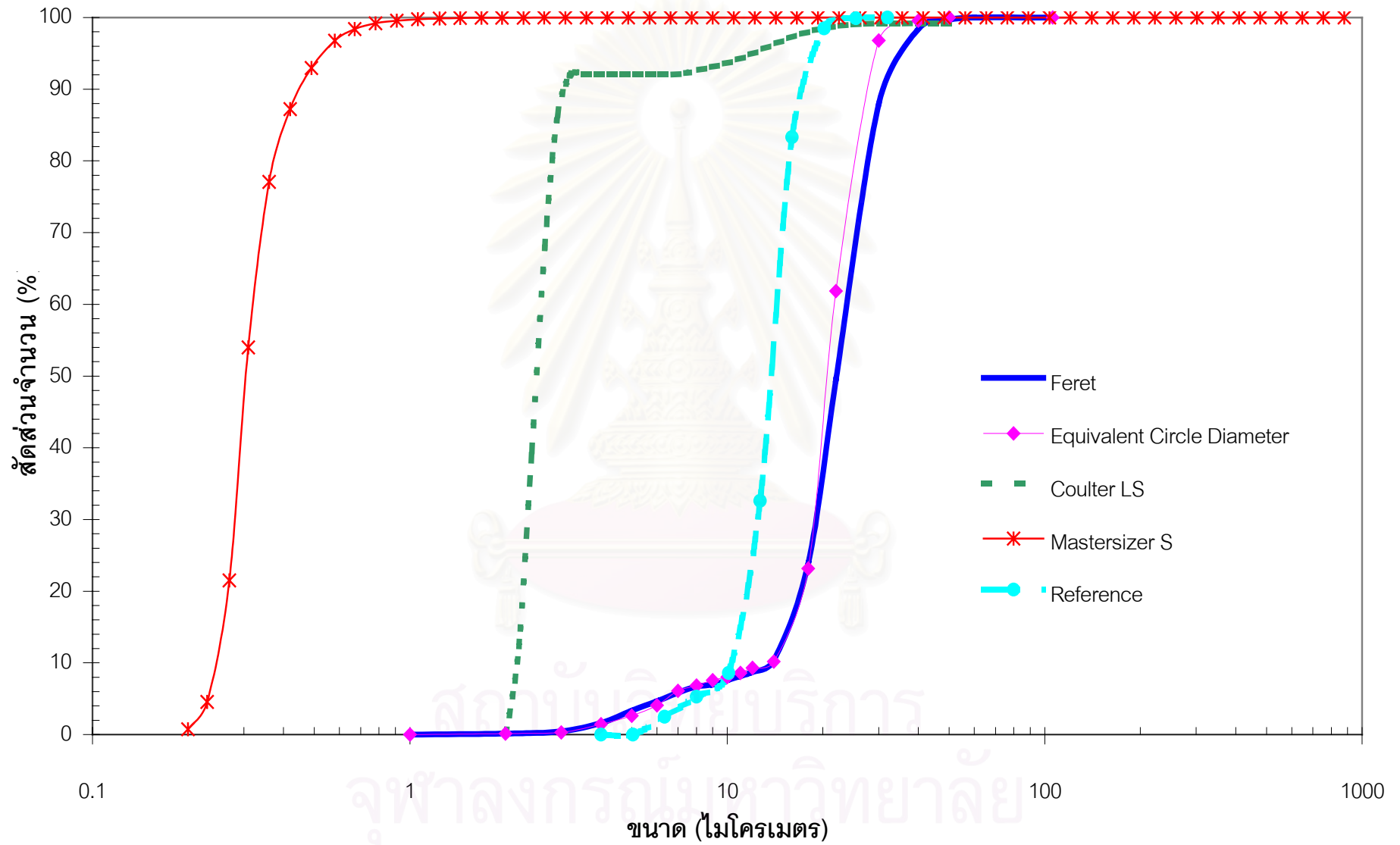
รูปที่ 6.4 การกระจายขนาดโดยใช้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



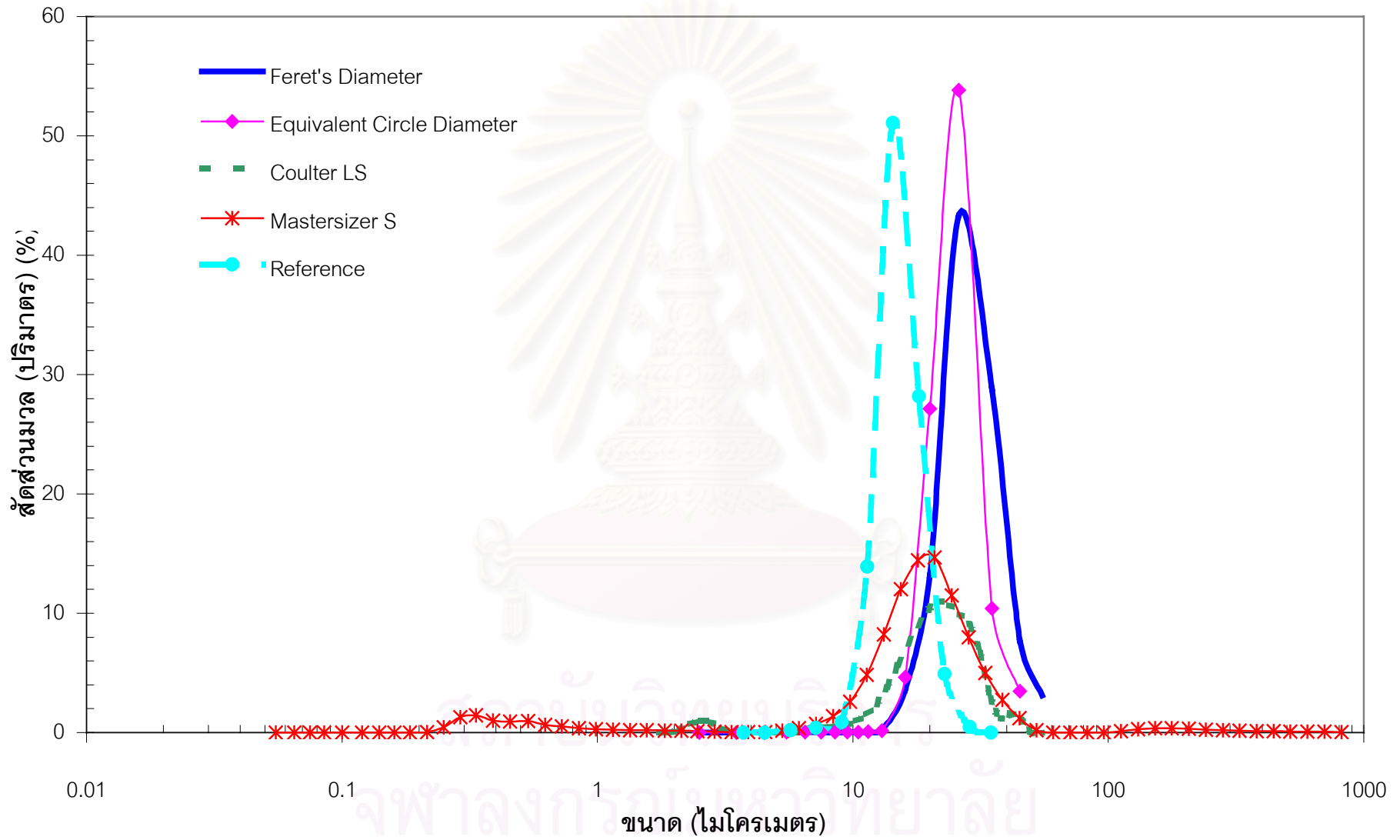
รูปที่ 6.5 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



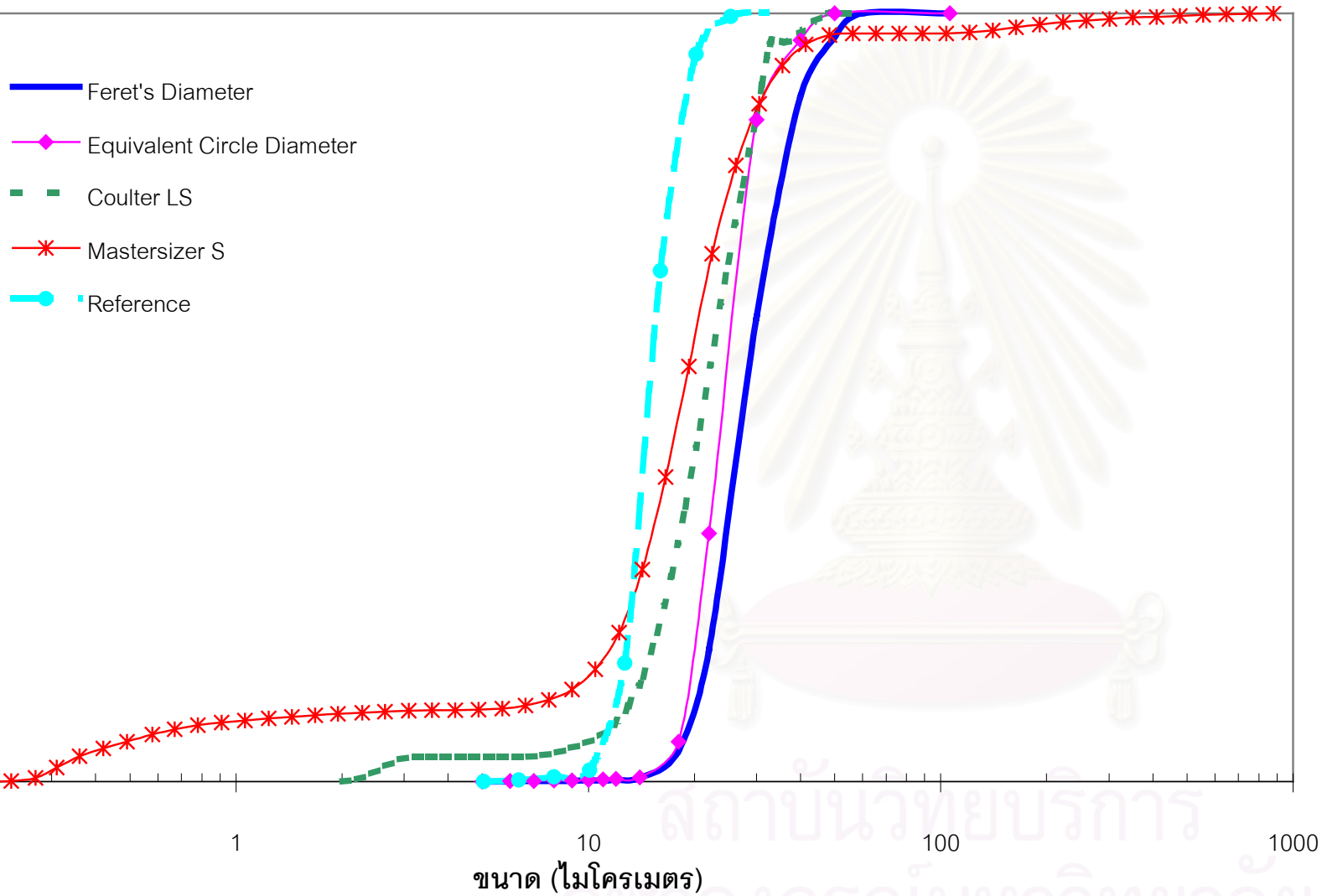
รูปที่ 6.6 การกระจายขนาดโดยใช้จำนวนเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



รูปที่ 6.7 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้จำนวนเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



รูปที่ 6.8 การกระจายขนาดโดยใช้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ



รูปที่ 6.9 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ

ตารางที่ 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER I No.5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์
ต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์	เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (ไมโครเมตร)	
	ใช้จำนวนเป็นฐานคำนวณ	ใช้มวลเป็นฐานคำนวณ
Feret's Diameter	4.48	23.23
Equivalent Circle Diameter	4.39	23.12
Coulter LS 230	0.58	7.37
Mastersizer S	0.10	10.79
Reference*	-	13 – 17

*หมายเหตุ : ในกรณีของอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 ไม่มีผลการวัดโดยใช้เครื่องมือ Coulter Multisizer จึง
ไม่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานในกรณีที่ใช้จำนวนเป็นฐานคำนวณ

ตารางที่ 6.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER II No.4 ที่ได้จากวิธีการ
วิเคราะห์ต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์	เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (ไมโครเมตร)	
	ใช้จำนวนเป็นฐานคำนวณ	ใช้มวลเป็นฐานคำนวณ
Feret's Diameter	22.19	27.04
Equivalent Circle Diameter	20.72	24.37
Coulter LS 230	2.39	21.44
Mastersizer S	0.31	18.52
Reference	13.64	14.88

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

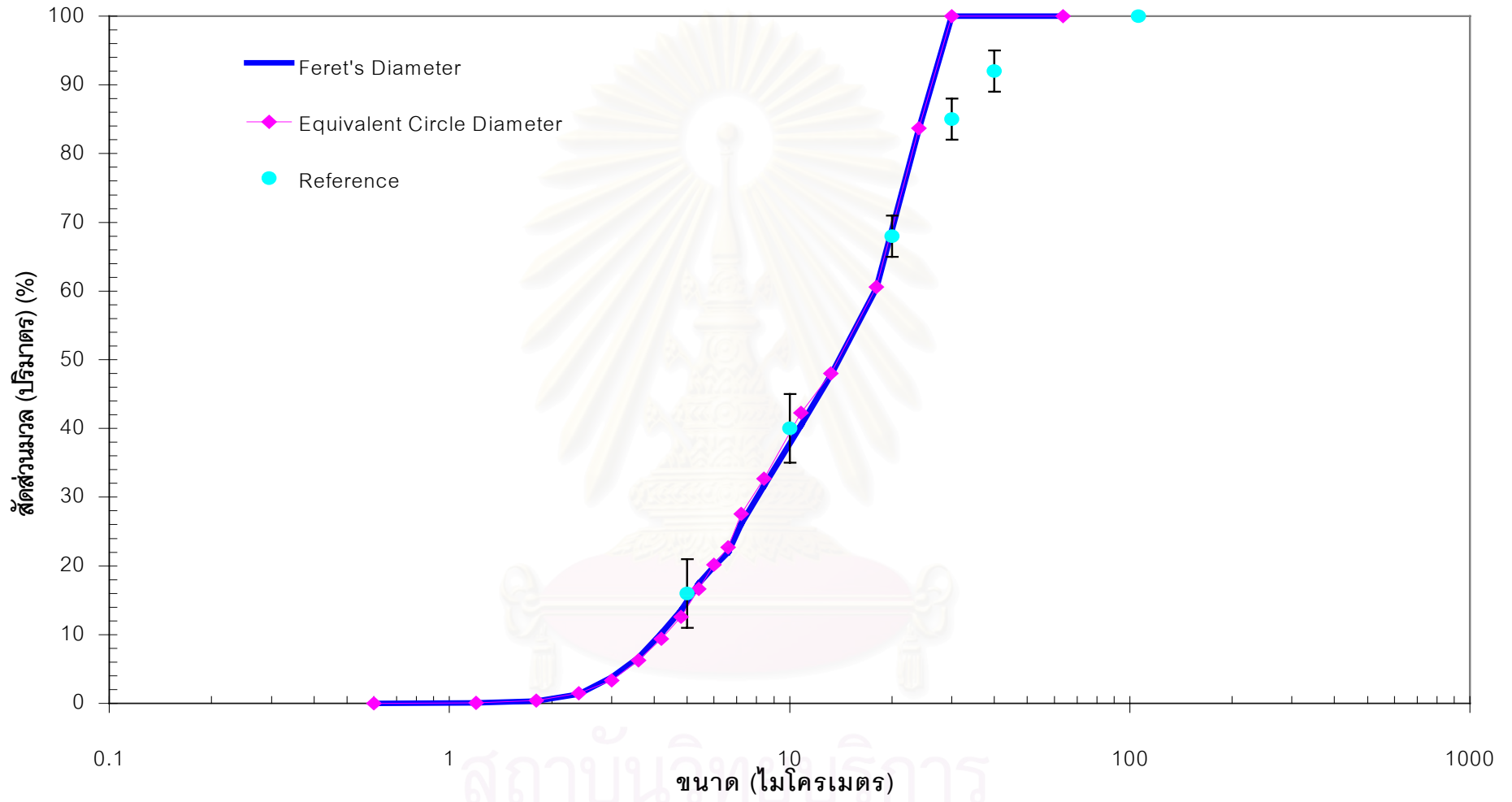
6.1.2 การปรับแก้ค่าเมื่อต้องการค่ากระจายขนาดแบบมวลเป็นฐานจากวิธีการวิเคราะห์ภาพ

เนื่องจากลักษณะการกระจายขนาดโดยมวลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมาจากค่าการกระจายขนาดโดยจำนวนโดยอาศัยสมมติฐานว่าอนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลม ซึ่งอนุภาคที่แท้จริงเหล่านั้นไม่ได้เป็นทรงกลม ดังนั้นควรจะมีการใช้ค่าคงที่การปรับแก้ (Calibration constant) เพื่อปรับแก้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีความถูกต้องมากขึ้น

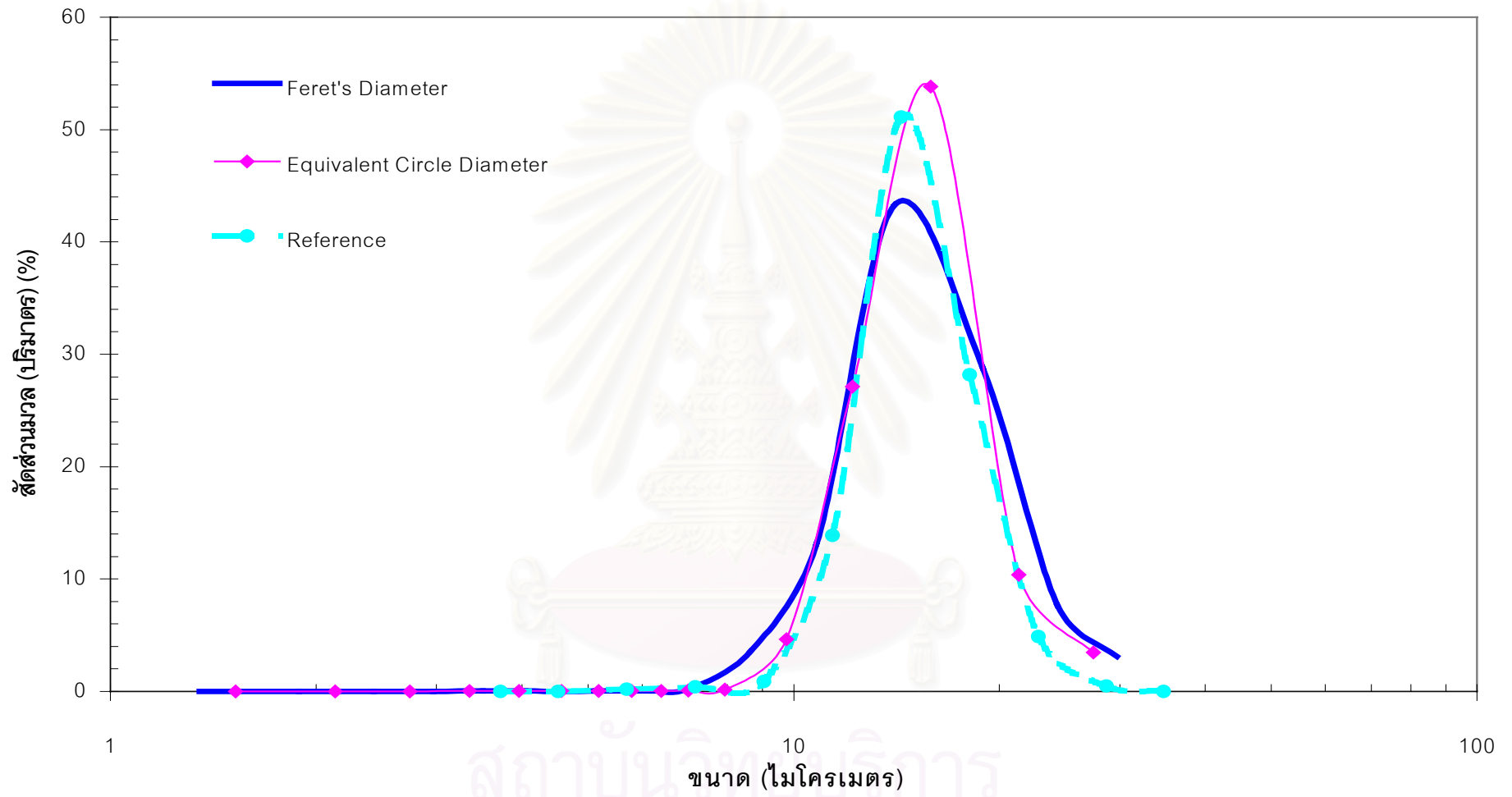
จากการทดลองโดยการลองผิดลองถูก (trial and error) พบว่าเมื่อใช้ค่าคงที่การปรับแก้ เท่ากับ 0.60 สำหรับอนุภาค JIS TEST POWDER I No.5 สำหรับวิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองวิธี พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 6.3 และจะทำให้ลักษณะการกระจายขนาดที่วิเคราะห์ได้ตรงกันกับค่าจากเอกสารอ้างอิงในช่วงของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.10 แต่ในช่วงของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมโครเมตรพบว่าค่าการกระจายที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าอ้างอิง ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีความลึกของจุดรวมแสง (focus) น้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็กที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้กำลังขยายเดียวกันทำให้ขนาดของอนุภาคที่เห็นผิดไป

การใช้ค่าคงที่การปรับแก้เท่ากับ 0.54 และ 0.61 สำหรับการวัดขนาดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท และเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมตามลำดับในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 พบว่าลักษณะการกระจายขนาดที่ได้จะมีความแตกต่างจากค่าอ้างอิงที่วัดโดยใช้เครื่อง Coulter Multisizer เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และ 6.12 นอกจากนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานก็มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับค่าจากเอกสารอ้างอิง

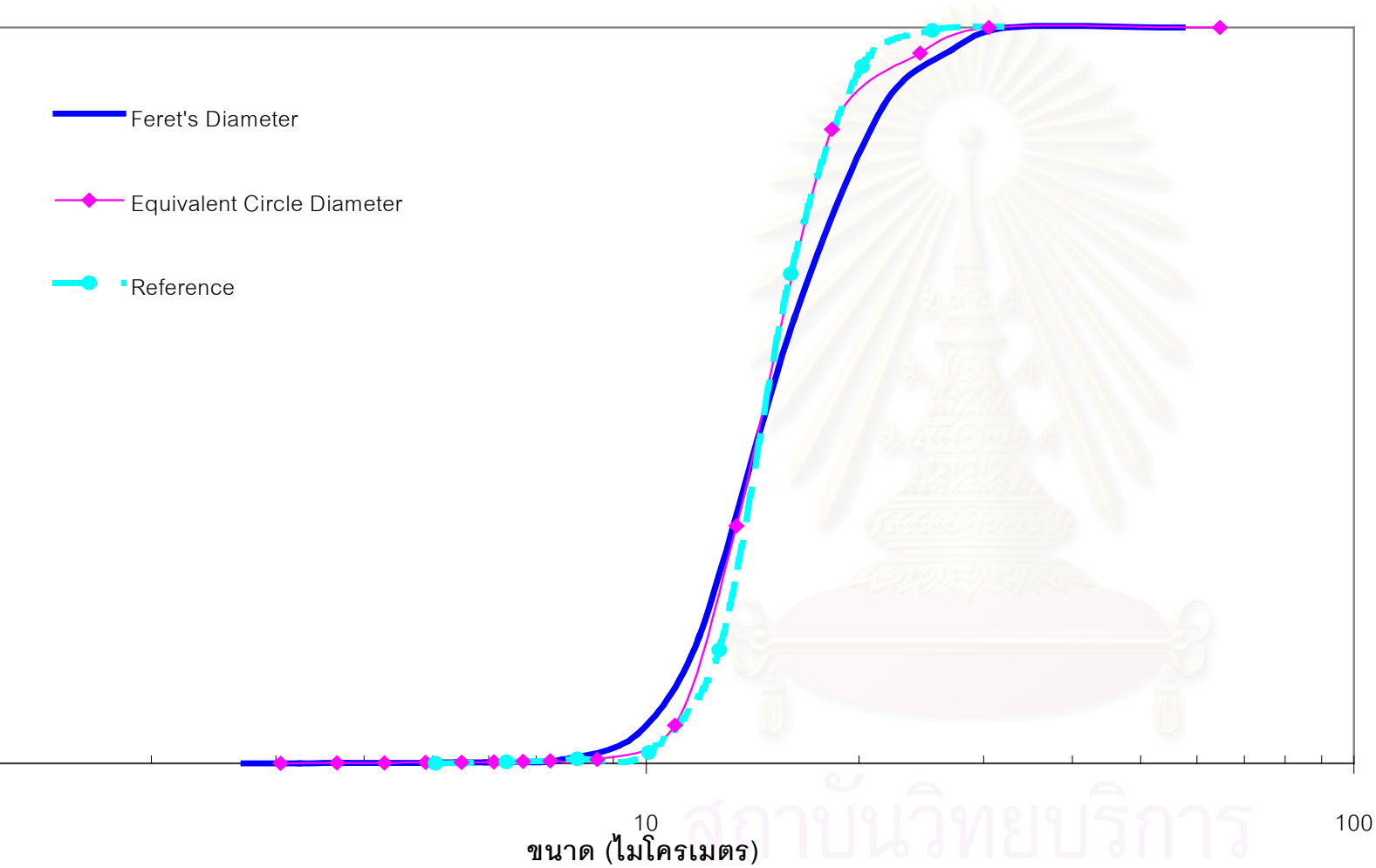
ดังนั้นในกรณีที่ต้องการวัดค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยปริมาตร หรือโดยมวล (ในกรณีที่อนุภาคมีความหนาแน่นคงที่) ของอนุภาคด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ ผู้วิจัยแนะนำว่าควรมีการปรับแก้ค่าด้วยการใช้ค่าคงที่การปรับแก้ในการปรับแก้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อให้ค่าการกระจายขนาดที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 6.10 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยให้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER I No 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากการปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้



รูปที่ 6.11 การกระจายขนาดโดยใช้มวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากการปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้



รูปที่ 6.12 การกระจายขนาดแบบสะสมโดยใช้นิวลเป็นฐานของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No 4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ หลังจากการปรับแก้ด้วยค่าคงที่การปรับแก้

ตารางที่ 6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER I No.5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ ภาพภายหลังแก้ไขด้วยค่าคงที่การปรับแก้

วิธีการวิเคราะห์	เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (ไมโครเมตร) ใช้มวลเป็นฐานคำนวณ
Feret's Diameter	14.05
Equivalent Circle Diameter	13.95
Reference	13-17

ตารางที่ 6.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน JIS TEST POWDER II No.4 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ ภาพภายหลังแก้ไขด้วยค่าคงที่การปรับแก้

วิธีการวิเคราะห์	เส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (ไมโครเมตร) ใช้มวลเป็นฐานคำนวณ
Feret's Diameter	14.60
Equivalent Circle Diameter	14.87
Reference	14.88

6.2 ผลการทดลองบดย่อยอนุภาค และการวิเคราะห์

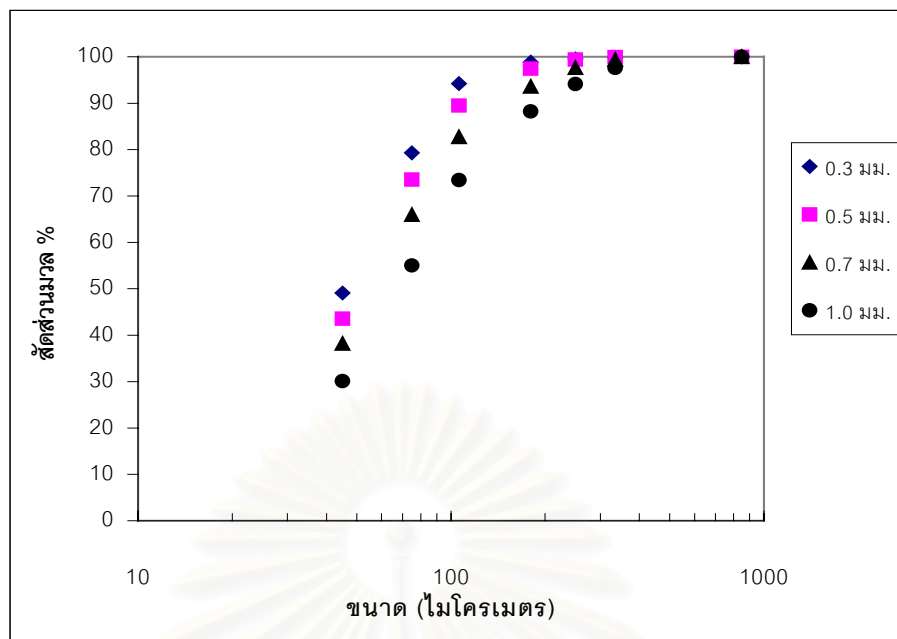
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อย (ซึ่งต่อไปจะขอเรียกว่าผลิตภัณฑ์) ด้วยการใช้สภาวะเงื่อนไขต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.3 จากเครื่องบดย่อยแบบฟันขบ ดังนี้

6.2.1 ผลของสภาวะในการบดย่อยที่มีต่อการกระจายขนาดของผลิตภัณฑ์

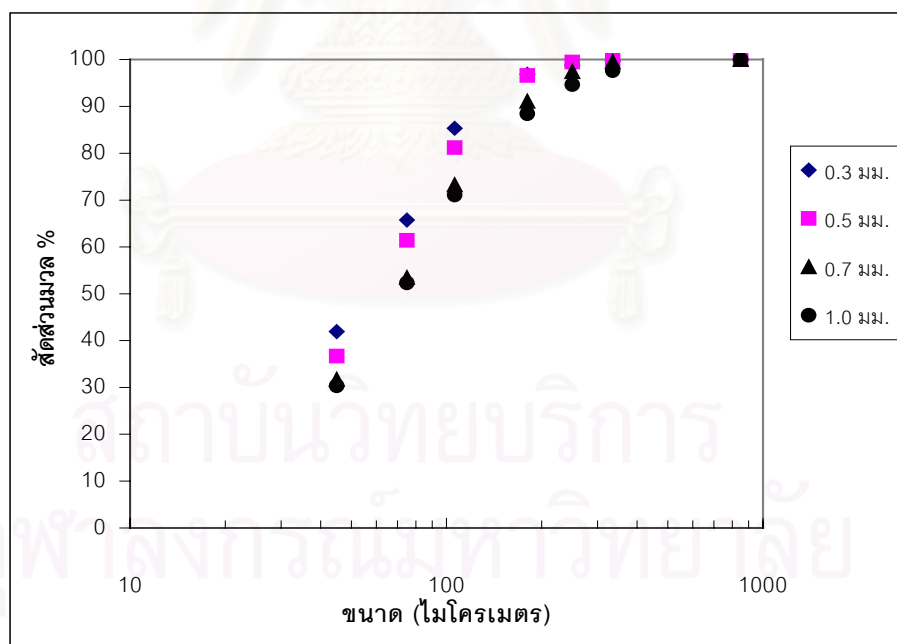
ค่าการกระจายขนาดของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากการบดย่อยด้วยสภาวะเงื่อนไขต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 6.13 – 6.16 และเมื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (geometric mean) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละสภาวะเงื่อนไขพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาค หรือใช้แรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.17 การที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาค สามารถอธิบายได้จากการพิจารณาหลักการบดภายในเครื่องบด เมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาค อัตราการไหลออกของผลิตภัณฑ์ก็จะเพิ่มขึ้นโดยสังเกตได้จากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดย่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นที่เดินเครื่องเปล่าเมื่อเริ่มทำการบดอนุภาค เมื่อเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง กระแสไฟฟ้าที่ใช้ก็จะมีค่าคงที่ตลอดการบดอนุภาคและจะลดลงจนมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้นที่เดินตัวเปล่าก็ต่อเมื่อหยุดการบดอนุภาค เมื่ออัตราการไหลออกของผลิตภัณฑ์มากขึ้นอนุภาคของผลิตภัณฑ์ก็จะมีโอกาสที่ถูกบดย่อยซ้ำน้อยลงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาคสอดคล้องกับผลการทดลองของ Muller และ Polke, 1999

ส่วนการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จะมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้แรงที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่ขึ้น เนื่องมาจากขนาดของช่องเปิดที่ใหญ่ขึ้นจะมีผลทำให้อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ยังมีขนาดใหญ่มีโอกาสที่จะผ่านแรงออกมาเป็นผลิตภัณฑ์โดยที่ไม่ได้ถูกบดย่อยจนมีขนาดเล็กลงมีสูงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแรงเป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุมขนาดสารที่ต้องการจากการบดย่อย (ไกรสิทธิ์ อัมพรายน, 2543)

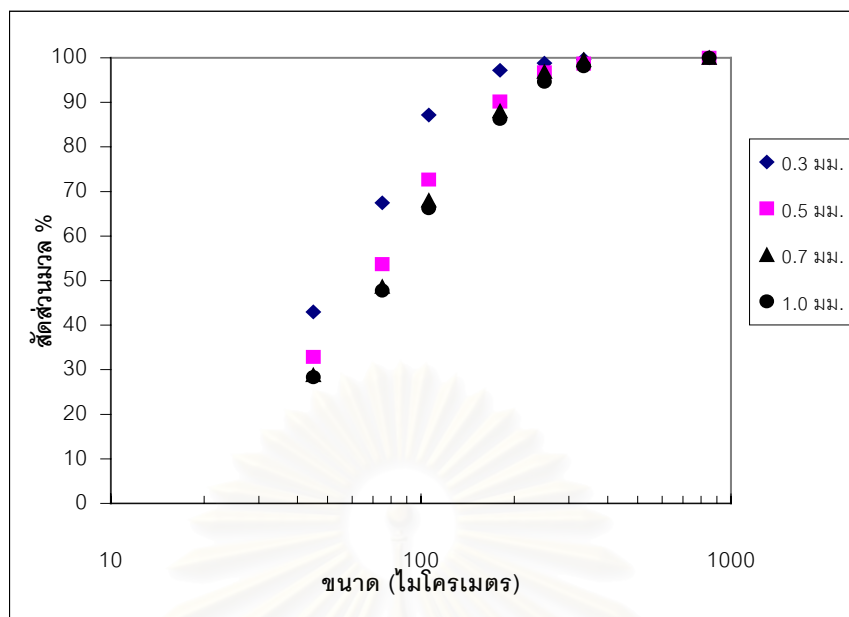
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



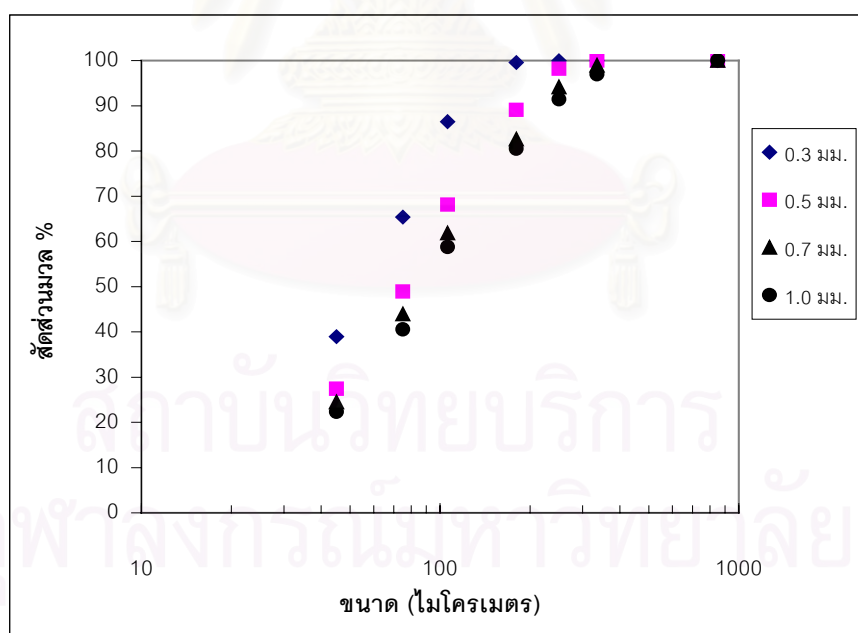
รูปที่ 6.13 ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยอัลตราการบด 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร



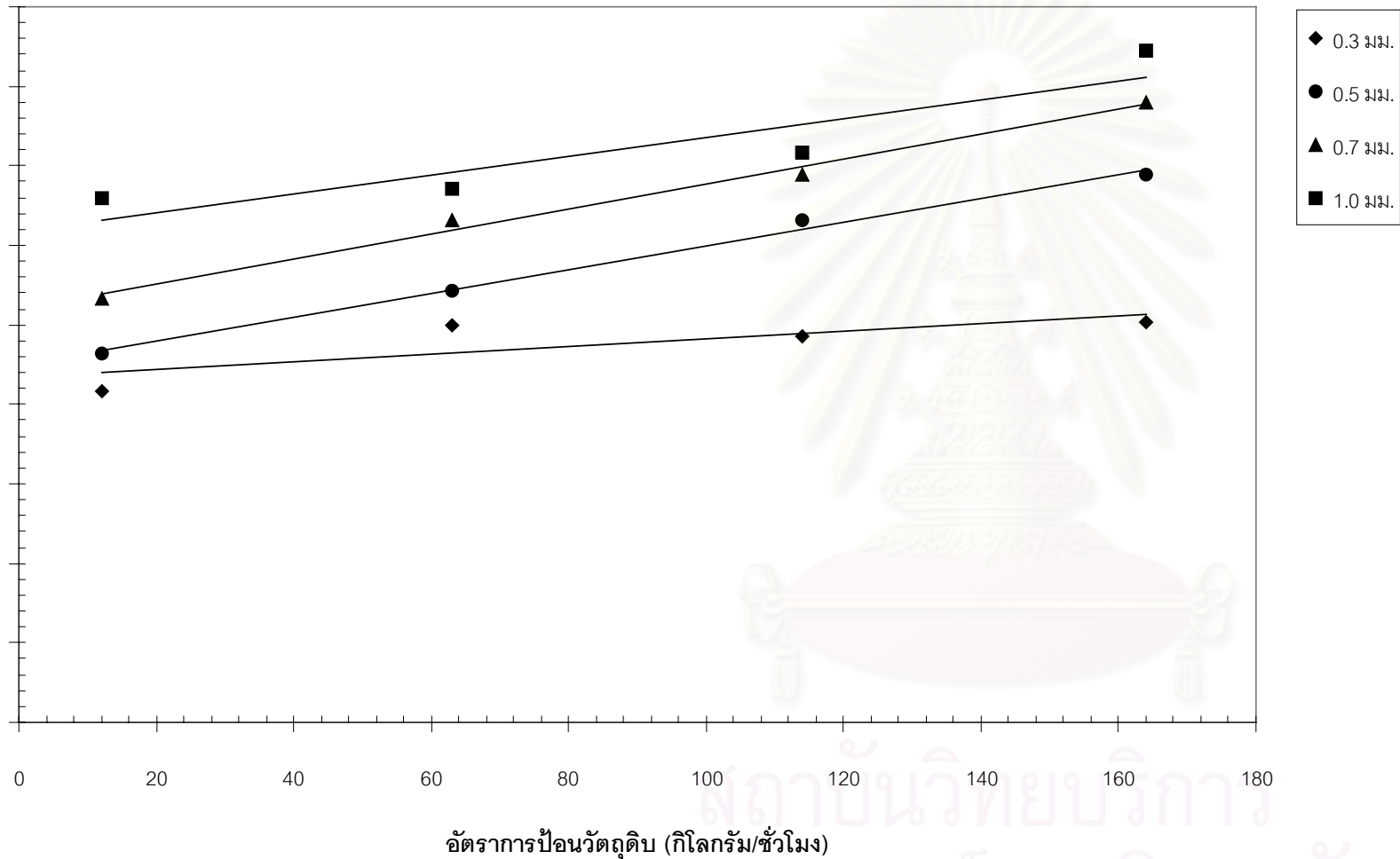
รูปที่ 6.14 ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยอัลตราการบด 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.15 ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยอัตรา
การป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0
มิลลิเมตร



รูปที่ 6.16 ค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยอัตรา
การป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0
มิลลิเมตร



รูปที่ 6.17 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Geometric Mean Diameter) ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยสภาวะเงื่อนไขต่างๆ

6.2.2 ผลของสภาวะในการบดย่อยที่มีต่อลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์อันได้แก่ ค่าดัชนีการไหล และค่าดัชนีการไหลทะเล็ก

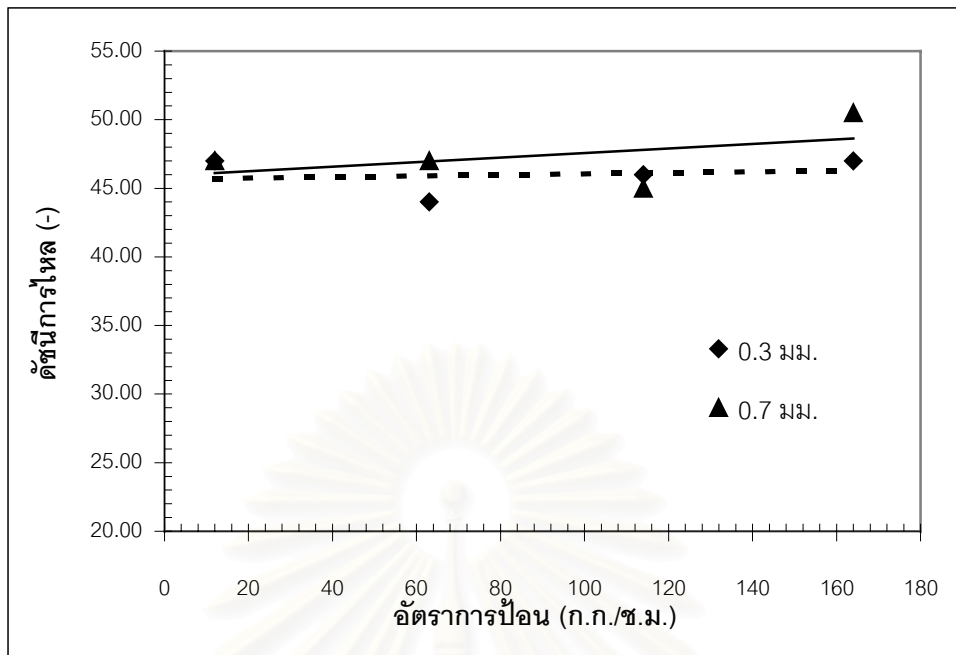
6.2.2.1 เปรียบเทียบผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อค่าดัชนีการไหลของผลิตภัณฑ์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของผลิตภัณฑ์กับอัตราการป้อนวัตถุดิบแสดงดังรูปที่ 6.18 พบว่าค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบเพิ่ม เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะทำให้ขนาดเฉลี่ย (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย) ของผลิตภัณฑ์ใหญ่ขึ้น (จากหัวข้อ 6.2.1) ซึ่งเป็นคุณสมบัติข้อหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น (Carr, 1965)

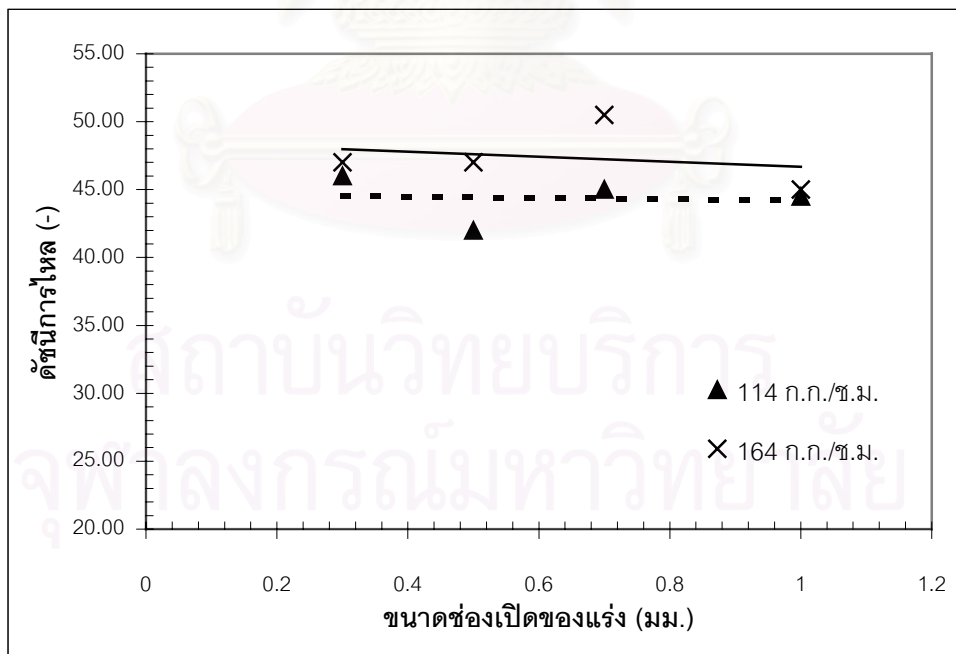
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของผลิตภัณฑ์กับขนาดของช่องเปิดของแรงแสดงดังรูปที่ 6.19 พบว่าค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อขนาดของช่องเปิดของแรงมากขึ้นนั่นจึงน่าจะมีอิทธิพลอื่น เช่นจากรูปทรงของอนุภาคซึ่งจะพิจารณาต่อไปในหัวข้อที่ 6.2.3

6.2.2.2 เปรียบเทียบผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อค่าดัชนีการไหลทะเล็กของผลิตภัณฑ์

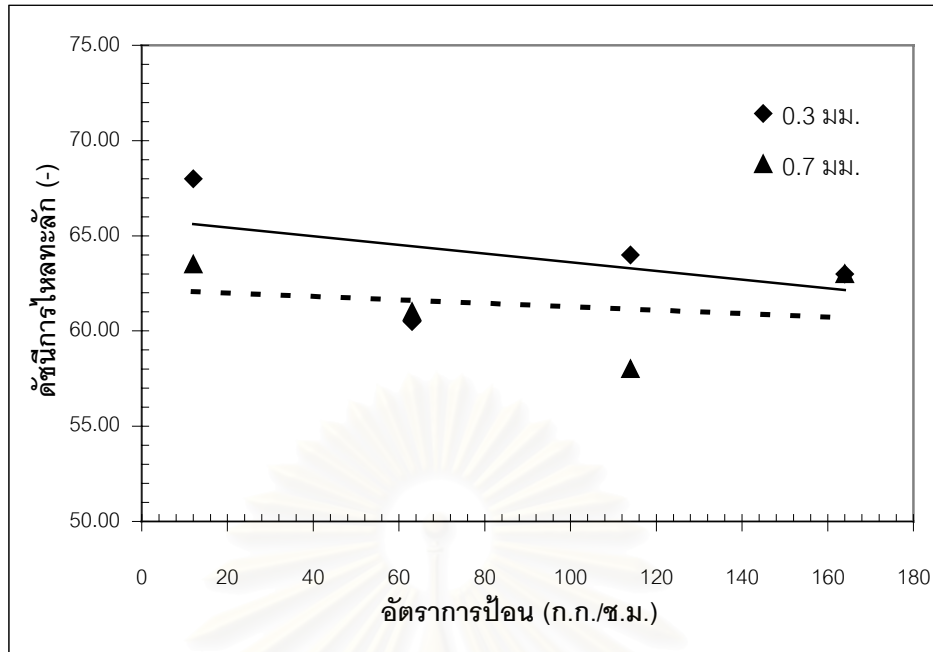
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลทะเล็กของผลิตภัณฑ์กับขนาดช่องเปิดของแรงแสดงดังรูปที่ 6.20 และ 6.21 พบว่าค่าดัชนีการไหลทะเล็กมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้นสำหรับทุกขนาดช่องเปิดของแรง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะมีผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ใหญ่ขึ้นซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยของน้ำหนักของอนุภาคน้อยลงซึ่งจะมีผลทำให้ค่าดัชนีการไหลทะเล็กมีค่าลดลง



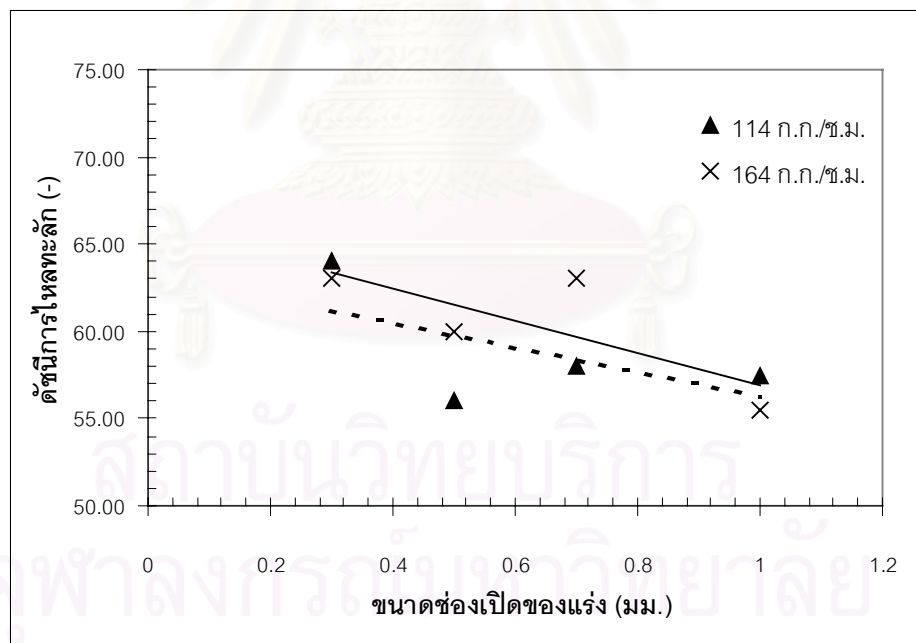
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยกับ อัตราการป้อนวัตถุเติม ที่ช่องเปิดของแรงขนาด 0.3 และ 0.7 มม.



รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยกับ ขนาดช่องเปิดของแรง ที่อัตราการป้อนวัตถุเติม 114 และ 164 ก.ก./ซ.ม.



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลทะลักของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับอัตราการใช้ปุ๋ยที่ช่องเปิดของแรงขนาด 0.3 และ 0.7 มม.

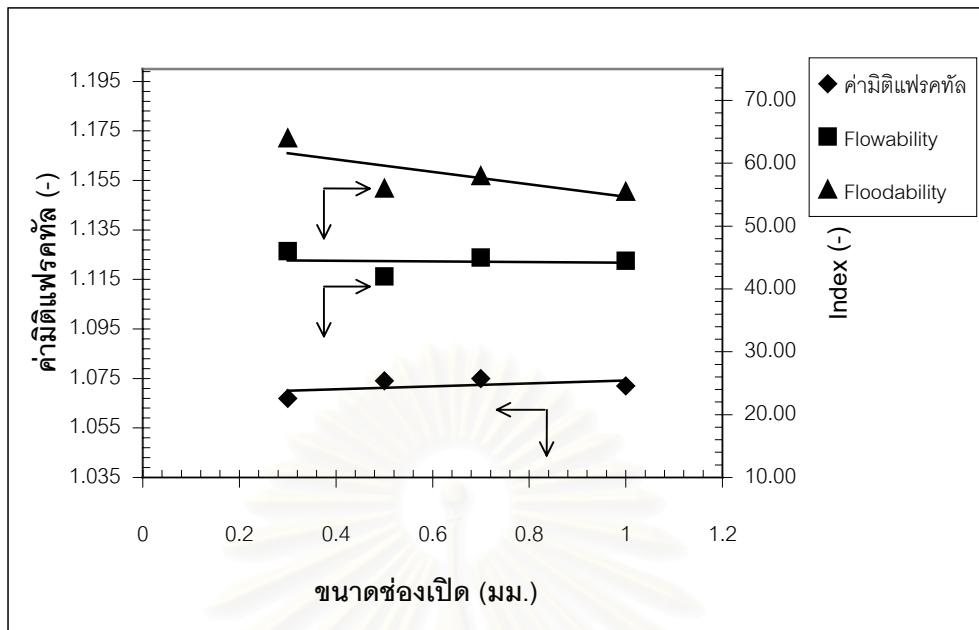


รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลทะลักของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อย กับขนาดช่องเปิดของแรง ที่อัตราการใช้ปุ๋ย 114 และ 164 ก.ก./ช.ม.

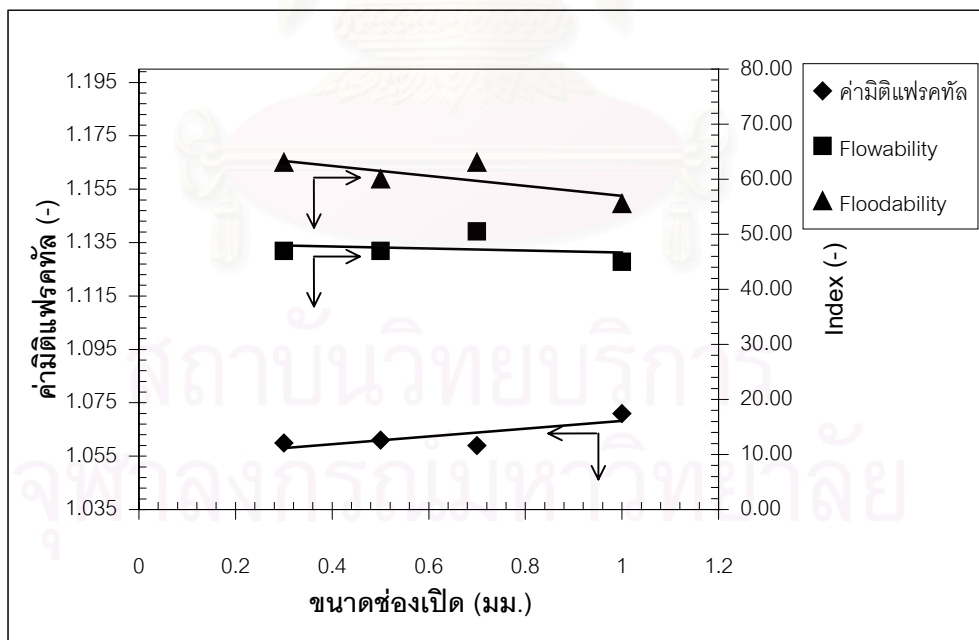
6.2.3 ผลของสภาวะการบดย่อยที่มีต่อรูปทรงของอนุภาค

รูปทรงของอนุภาคที่จะพิจารณาในหัวข้อนี้คือ ค่ามิติแฟรคทัลเฉลี่ยของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มาจากการบดย่อยที่สภาวะต่างๆ จากรูปที่ 6.22 และ 6.23 พบว่าค่ามิติแฟรคทัลเฉลี่ยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของช่องเปิดของแรงมากขึ้น และมีความสัมพันธ์ผกผันกับค่าดัชนีการไหล กล่าวคือเมื่อค่ามิติแฟรคทัลมีค่ามากขึ้นค่าดัชนีการไหลก็จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่ามิติแฟรคทัลจะบอกความขรุขระของพื้นผิวของอนุภาค (Oshima และคณะ, 1995) และเมื่อความขรุขระของพื้นผิวมีมากขึ้นแรงเสียดทานของพื้นผิว (surface friction) ของแต่ละอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการไหลของอนุภาคมีลดลง ดังนั้นการที่ค่าดัชนีการไหลที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อช่องเปิดของแรงมากขึ้น (ในหัวข้อที่ 6.2.2.1) น่าจะมีอิทธิพลมาจากรูปทรงของอนุภาคนั่นเอง

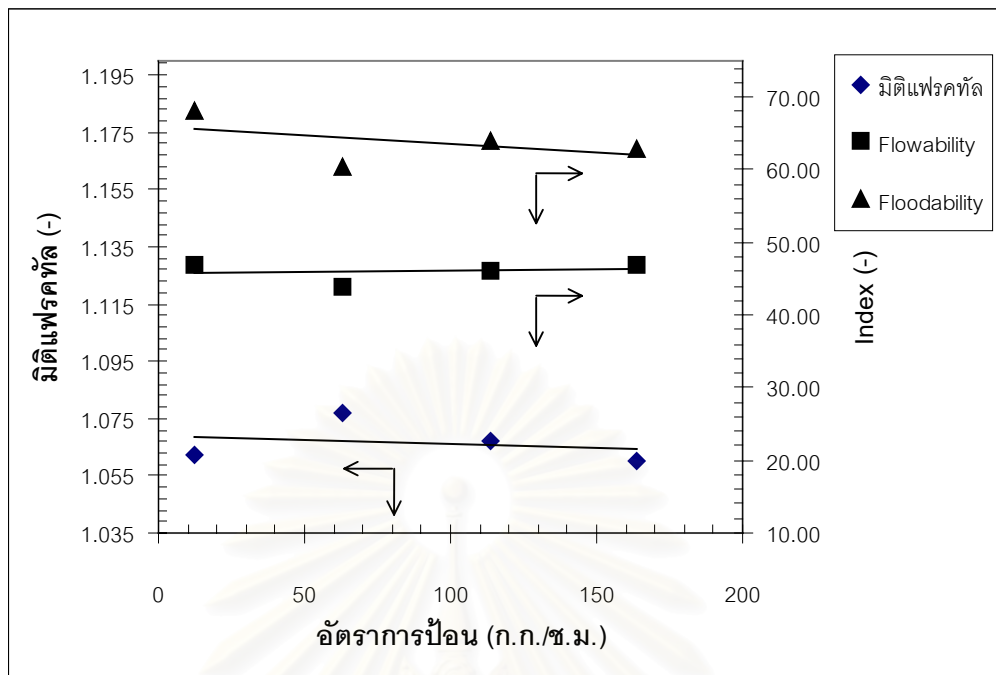
จากรูปที่ 6.24 และ 6.25 จะเห็นได้ว่าค่ามิติแฟรคทัลมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการบดของวัตถุดิบและมีความสัมพันธ์ผกผันกับค่าดัชนีการไหลเช่นกัน



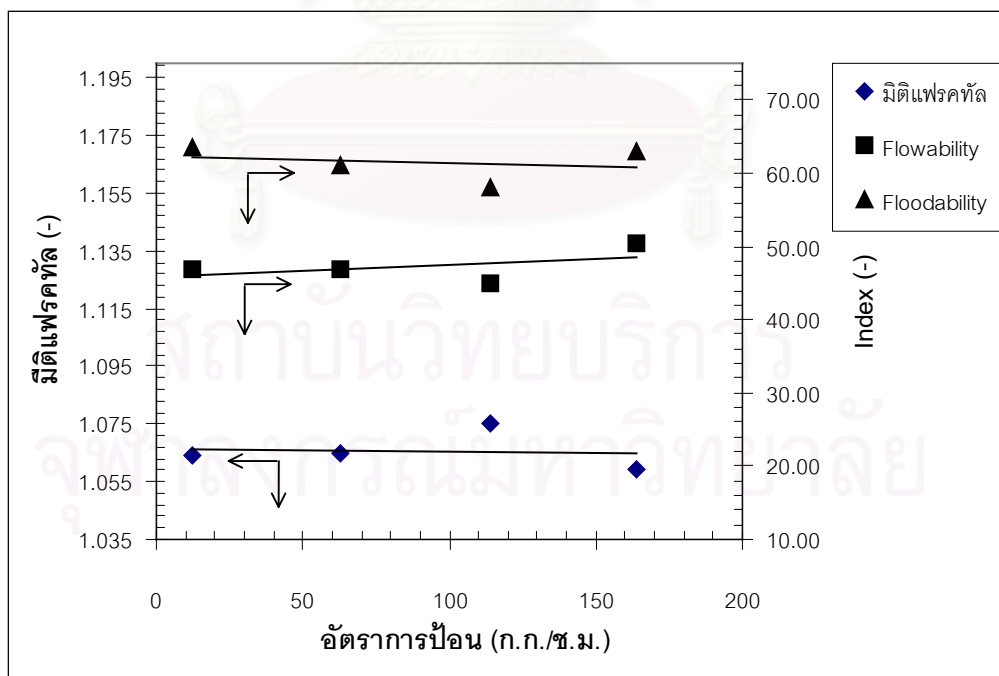
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลและค่ามิติพรคทลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยกับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 ก.ก./ช.ม.



รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการไหลและค่ามิติพรคทลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยกับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 ก.ก./ช.ม.



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยที่ขนาดช่องเปิดของแร่ขนาด 0.3 มม.



รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติการไหลและค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยที่ขนาดช่องเปิดของแร่ขนาด 0.7 มม.

โดยหลักการปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในการเดินเครื่องบดย่อยจะมีค่าแปรผันตามปริมาณอนุภาคที่นำมาบดย่อยภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นในขณะที่มีการป้อนวัตถุดิบระหว่างที่ทำการบดย่อยบอกถึงปริมาณอนุภาคที่มีค้างอยู่ในเครื่องบดระหว่างทำการบดย่อย ปริมาณอนุภาคที่ตกค้างดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับเวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องบด (resident time) ที่อัตราการป้อนหนึ่งๆ ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลของปริมาณกระแสไฟฟ้า ปริมาณอนุภาคที่ตกค้างในเครื่องบด และเวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องบดมาพิจารณาจะได้สมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I_0 \propto H_0 \quad (6.1)$$

$$I \propto H \quad (6.2)$$

$$H = H_0 \frac{I}{I_0} \quad (6.3)$$

$$\theta \propto \frac{H}{Q} \quad (6.4)$$

แทนค่า H จากสมการที่ (6.3) ลงในสมการที่ (6.4) จะได้

$$\theta = \left(\frac{H_0}{I_0} \right) \frac{I}{Q} \quad (6.5)$$

ดังนั้น

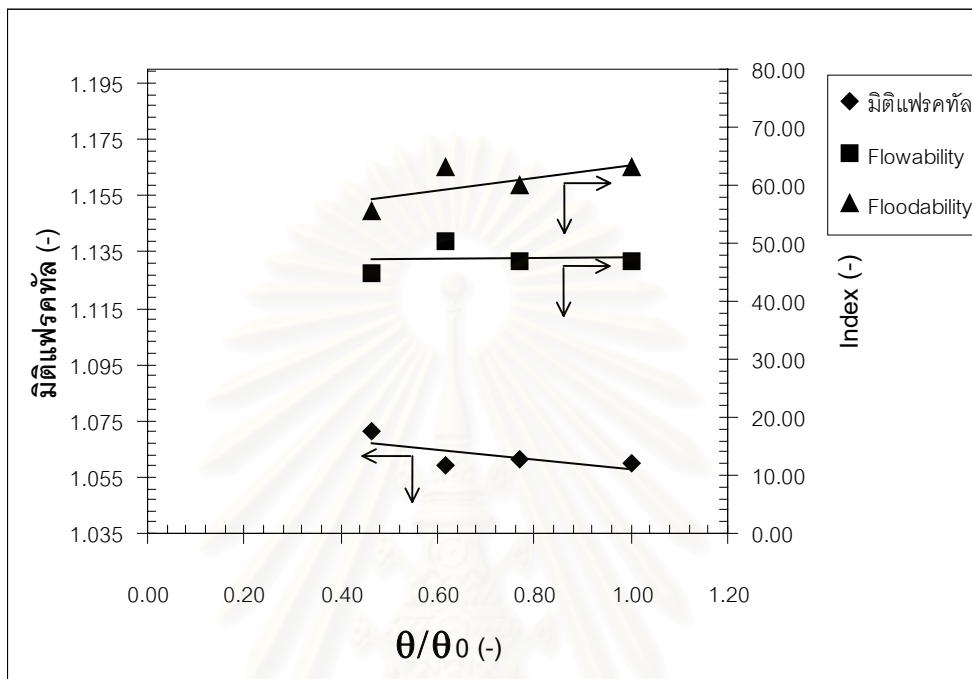
$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{I}{I_0} \left(\frac{Q_0}{Q} \right) \quad (6.6)$$

- เมื่อ θ คือ เวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องสัมผัสที่อัตราการป้อนวัตถุดิบใดๆ (ชั่วโมง)
- H คือ ปริมาณสารที่ค้างอยู่ภายในเครื่องบด (กิโลกรัม)
- I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในกรณีที่ไม่ได้ป้อนวัตถุดิบ (แอมแปร์)
- Q คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ (กิโลกรัม/ชั่วโมง)

- H_0 คือ ปริมาณสารที่ค้างอยู่ในเครื่องบดที่สภาวะอ้างอิง (อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มิลลิเมตร) (กิโลกรัม)
- I_0 คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในกรณีที่ไม่ได้ป้อนวัตถุดิบที่สภาวะอ้างอิง (อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มิลลิเมตร) (แอมแปร์)
- θ_0 คือ เวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องที่สภาวะอ้างอิง (อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มิลลิเมตร) (ชั่วโมง)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิติแฟรคทัล, ค่าดัชนีการไหล และค่าดัชนีการไหลหลักกับเวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องสัมพันธ์กับเวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องสัมพันธ์ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มิลลิเมตร (θ/θ_0) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.26 พบว่าเมื่อเวลาที่อนุภาคค้างอยู่ในเครื่องบดเพิ่มขึ้นค่ามิติแฟรคทัลหรือความขรุขระของพื้นผิวอนุภาคของผลิตภัณฑ์จะลดลง เมื่อพิจารณาจากกลไกการบดภายในเครื่องบดย่อยแบบฟันขบซึ่งเกิดขึ้นจากหลายกลไกได้แก่ แรงกระแทก (impact) และ แรงเฉือน (shear) เป็นต้น โดยวัตถุที่ถูกป้อนที่ตรงกลางของตัวหมุน (rotor) และตัวอยู่กับที่ (stator) สารที่ป้อนได้รับแรงลม (air flow) จากเครื่องทำให้เกิดการกระจายตัวตามแรงลม และจะถูกย่อยขนาดโดยชุดแท่งเหล็กของตัวหมุนและตัวอยู่กับที่ด้วยกลไกการกระแทกทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กลงสารที่ได้จากการย่อยขนาดจะผ่านวงนอกของชุดแท่งเหล็ก และถ้าสารยังมีขนาดใหญ่กว่าขนาดช่องเปิดของแรงก็จะถูกย่อยสารต่อจนได้ความละเอียดที่ผ่านรูแรงออกมาได้ (Lowrison, 1974 และ ไกรสิทธิ์ อัมพรายน, 2543) ดังนั้นเมื่ออนุภาคอยู่ในเครื่องนานขึ้นก็จะมีโอกาสที่จะเกิดการขัดสีระหว่างแรงกับอนุภาคนานขึ้น และมีโอกาสเกิดการขัดสีกันระหว่างอนุภาคมากขึ้นจึงทำให้อนุภาคที่ได้มีความขรุขระน้อยลง ดังนั้นการที่ขนาดช่องเปิดของแรงลดลง หรือการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบสูงขึ้นจะทำให้ค่ามิติแฟรคทัลหรือความขรุขระของพื้นผิวอนุภาคลดลง

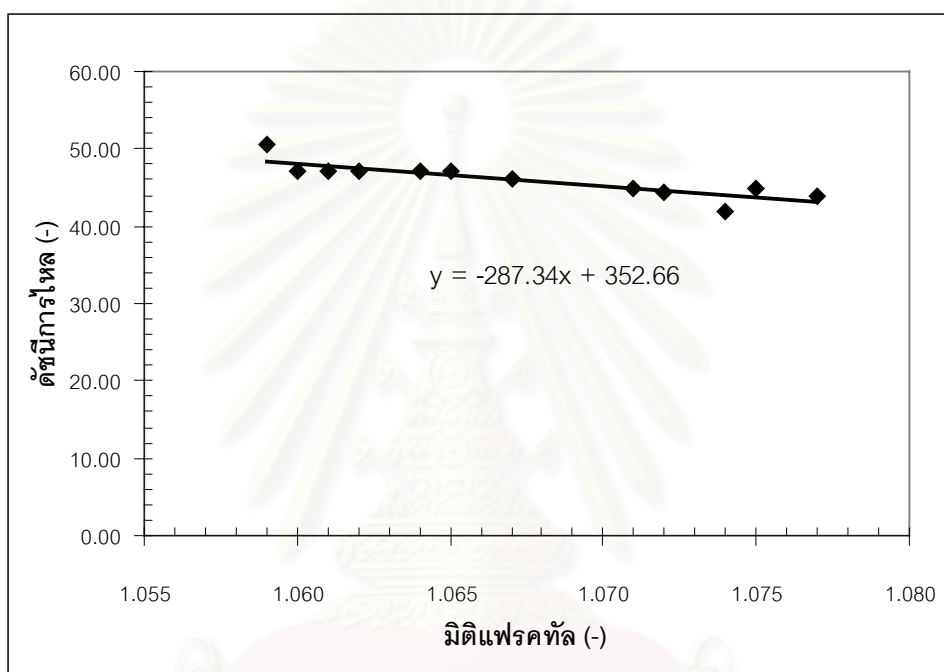
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



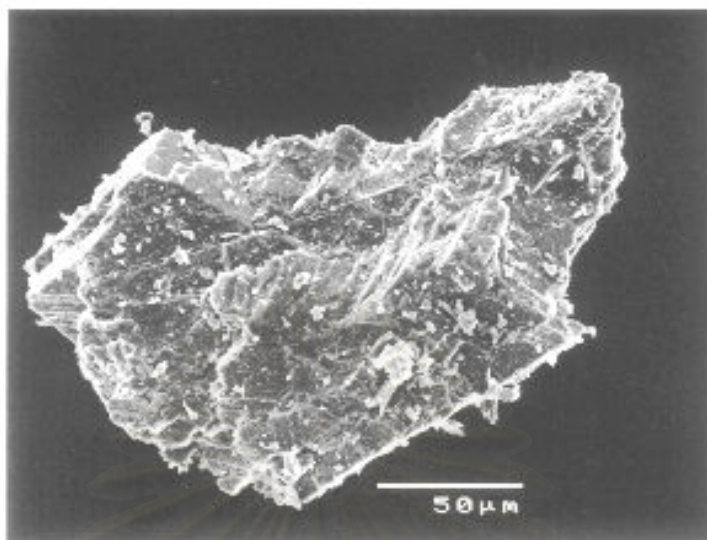
รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า θ/θ_0 และค่ามิติแฟรคทัลของแคลเซียมคาร์บอเนตได้จากการบด
 ย่อยกับขนาดช่องเปิดของแร่ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 ก.ก./ช.ม

6.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิติแฟรคทัลกับค่าดัชนีการไหล

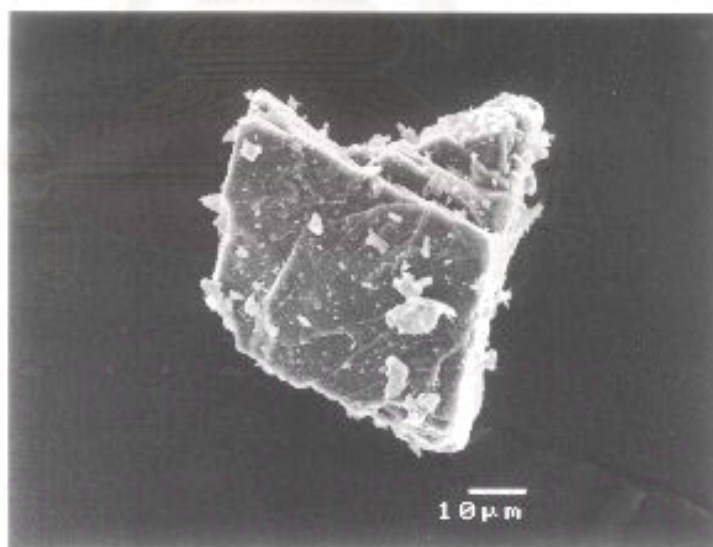
จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าค่ามิติแฟรคทัลจะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการไหลซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.27 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อค่ามิติแฟรคทัลมีค่าเพิ่มขึ้น หรือก็คือความขรุขระของพื้นผิวอนุภาคมีมากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 6.28 – 6.33) จะทำให้ค่าดัชนีการไหลหรือความสามารถในการไหลของอนุภาคก็จะลดลง



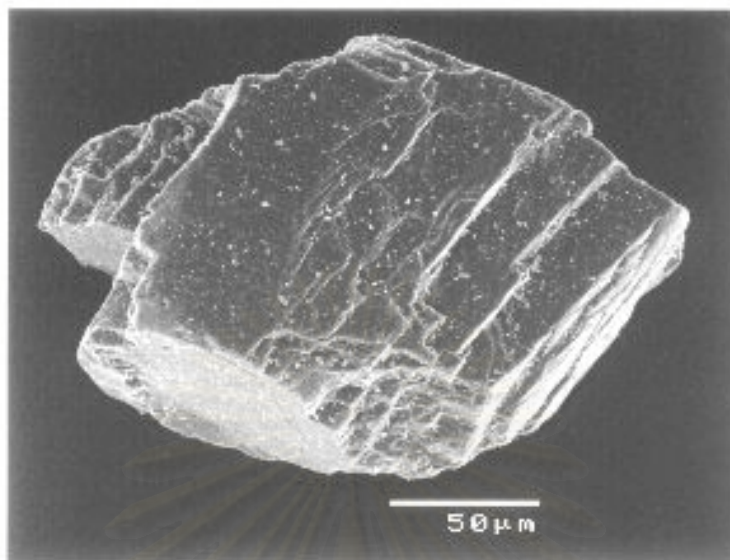
รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิติแฟรคทัลกับค่าดัชนีการไหล



รูปที่ 6.28 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการป้อน 63 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มม.มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.159 (กำลังขยาย 500 เท่า)



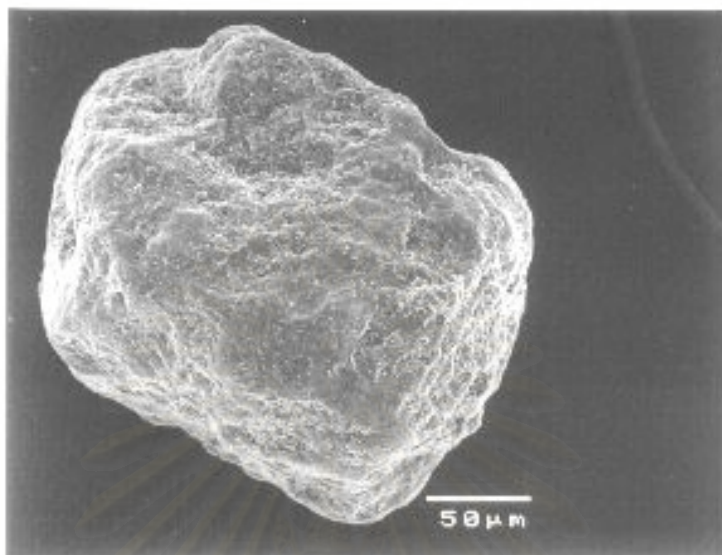
รูปที่ 6.29 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการป้อน 63 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มม.มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.141 (กำลังขยาย 1,000 เท่า)



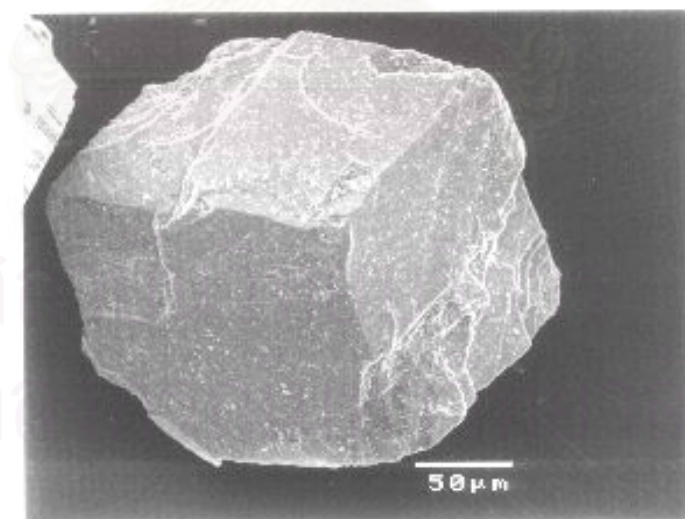
รูปที่ 6.30 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการบิน 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3 มม. มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.070 (กำลังขยาย 350 เท่า)



รูปที่ 6.31 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการบิน 164 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3 มม. มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.057 (กำลังขยาย 350 เท่า)



รูปที่ 6.32 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการป้อน 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.3 มม. มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.005 (กำลังขยาย 350 เท่า)



รูปที่ 6.33 รูปถ่ายจากเครื่อง SEM ของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกบดย่อยที่อัตราการป้อน 12 ก.ก./ช.ม. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.7 มม. มีค่ามิติแฟรคทัลเท่ากับ 1.004 (กำลังขยาย 350 เท่า)

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม

7.1 สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอนุภาคมีความสำคัญเนื่องจากสามารถนำมาใช้ซึ่งความยากง่ายในกระบวนการผลิตหรือการจัดการอนุภาคฝุ่นผง ในส่วนแรกงานวิจัยนี้จึงได้ประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอนุภาคได้แก่ ขนาดของอนุภาคด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท และรูปทรงของอนุภาคด้วยการใช้หลักการของเรขาคณิตแฟรคทัล และในส่วนที่สองงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการบดในเครื่องบดแบบฟันขบที่มีผลต่อคุณสมบัติการไหลตัวของอนุภาค และการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงภายหลังการบด จากการทำการวิจัยได้ผลซึ่งสรุปได้ดังนี้

การทดสอบโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสำหรับการประเมินขนาดของอนุภาคด้วยวิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรทโดยการใช้ภาพของรูปทรงต่างๆ ที่แตกต่างกันพบว่าโปรแกรมนี้สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง จากนั้นได้นำมาทำการทดลองวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากวิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่างกลม และเปรียบเทียบกับค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่องมือที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์ และค่าอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS ปรากฏว่าได้ข้อสรุปดังนี้

1. การใช้หลักการวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแตกต่างกันจะให้ค่าการกระจายขนาดที่ต่างกัน กล่าวคือวิธีการวิเคราะห์ภาพซึ่งวัดโดยใช้จำนวนอนุภาคเป็นฐานคำนวณ (number basis) จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐานของอนุภาคที่เล็กกว่ากรณีของวิธีการวัดด้วยเครื่องมือที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์ซึ่งใช้น้ำหนักเป็นฐาน (mass basis) หรือปริมาตรเป็นฐานคำนวณ (volume basis)

2. การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องมือที่อาศัยหลักการการกระเจิงของแสงเลเซอร์เหมือนกันแต่ผลิตโดยบริษัทแตกต่างกันก็จะให้ค่าการกระจายขนาดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้คาดว่าสืบเนื่องจากการขาดการสอบเทียบ (calibration) เครื่องมือ หรือเกิดจากความแตกต่างของการออกแบบเครื่องมือ และหรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล
3. ค่าการกระจายขนาดของอนุภาคมาตรฐานโดยใช้มวลเป็นฐานที่ได้จากการวัดขนาดด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ คือการวัดขนาดด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท และการวัดขนาดด้วยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมจะให้ลักษณะการกระจายขนาดที่คล้ายคลึงกับค่าอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS แต่มีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อยเสมอ แต่เมื่อทำการแก้ไขด้วยค่าคงที่การปรับแก้ (calibration constant) แล้วจะทำให้ได้ค่าการกระจายขนาดที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของการศึกษากระบวนการบดย่อยอนุภาค จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะเงื่อนไขของการบดย่อยที่มีต่อลักษณะสมบัติของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดย่อยด้วยเครื่องบดแบบฟันขบ ซึ่งในการทดลองได้มีการประเมินขนาด ประเมินค่าดัชนีการไหล และค่าดัชนีการไหลทะเล็กของอนุภาคที่ได้จากการบดย่อย และมีการวิเคราะห์รูปทรงของอนุภาคที่ได้จากการบดย่อยด้วยหลักการของเรขาคณิตแฟรคทัลจากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราการบดอนุภาค หรือเพิ่มขนาดช่องเปิดของแรงจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (geometric mean) ของอนุภาคมีมากขึ้น
2. เมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาค แนวโน้มของค่าดัชนีการไหลของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีผิวขรุขระน้อยลง แต่เมื่อเพิ่มขนาดของช่องเปิดของแรงแนวโน้มของค่าดัชนีการไหลจะมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่อนุภาคมีผิวขรุขระมากขึ้นซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากค่ามิติแฟรคทัลมีค่ามากขึ้น
3. ค่าดัชนีการไหลทะเล็กของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการบดอนุภาค หรือเพิ่มขนาดช่องเปิดของแรง
4. ค่ามิติแฟรคทัลจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สภาวะที่ทำให้เวลาที่อนุภาคอยู่ในเครื่องบดนานขึ้น
5. ค่ามิติแฟรคทัลมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าดัชนีการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่บดย่อยด้วยเครื่องบดแบบฟันขบสำหรับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0 ถึง 250 ไมโครเมตร สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้ $y = -287.34x + 352.66$ เมื่อ y คือค่าดัชนีการไหล และ x คือค่ามิติแฟรคทัล

7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค และการวิเคราะห์รูปร่างอนุภาคด้วยหลักการวิเคราะห์ภาพควรจะทำการศึกษาวิเคราะห์ด้วยการใช้ระบบที่มีกล้องวิดีโอทัศนมิติติดต่อกับกล้องจุลทรรศน์ และต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นการลดสิ่งรบกวน (noise) ที่อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการดิจิทัลไท์ด้วยการกราดภาพด้วยเครื่องกราดภาพ
2. ทำการศึกษารูปร่างของอนุภาคที่ได้จากการบ่อน้ำผ่านเครื่องบดย่อยแบบฟันชบ
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การปรับแก้กับค่ามิติแฟรคทัลหรือค่าดัชนีที่บอกลักษณะรูปร่างอนุภาคแบบอื่น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ไกรสิทธิ์ อัมพรายนน์. การย่อยขนาดอนุภาค. กรุงเทพฯ : คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

ปยุตนรัตน์ พิชญ์ไพบุลย์. Computer Graphics : สำหรับนักออกแบบ. กรุงเทพมหานคร: บริษัทด้านสถาปัตย์คอมพิวเตอร์ จำกัด, 2542.

ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538

ราชบัณฑิตยสถาน. ศัพท์คอมพิวเตอร์ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์มหาจุฬาลงกรณ์ราชวิทยาลัย, 2540.

ภาษาอังกฤษ

Brown, G. J. ; Miles, N. J. ; and Hall, S. T. Fractal Assessment of Finely Ground Limestone for Flue Gas Desulphurisation Part II : Effect of Pulveriser Type Upon Limestone Product. Minerals Engineering 7 (1994): 1057-1067.

Broyles, D. A. ; Rimmer, H. W. ; and Adel, G. T. Rapid Shape Analysis of Crushed Stone Using Image Analysis. KONA. 14 (1996): 130-137.

Carr, L. R. Evaluating Flow Properties of Solids. Chemical Engineering 18 (1965): 163-168.

Charles, R. J. Energy-Size Reduction Relationships in Comminution. Trans.AIME. 208 (1957): 80-88.

Clark, N. N. A New Scheme for Particle Shape Characterization Based on Fractal Harmonics and Fractal Dimensions. Powder Technology 51 (1987): 243-249.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Foroutan-pour, K. ; Dutilleul, P.; Smith, D. L. Advances in the Implementation of the Box-Counting Method of Fractal Dimension Estimation. Applied Mathematics and Computation 105 (1999): 195-210.
- Graf, J. C. The Importance of Resolution Limits to the Interpretation of Fractal Descriptions of Fine Particles. Powder Technology 67 (1991): 83-85.
- Gregory, A. B. Digital Image Processing : principles and applications. New York: John Wileys & Sons, 1994.
- Huang, C. C. Effect of Feeding Mechanisms on the Grinding Efficiency of Pulverizers. Particulate Science and Technology 15 (1997): 87-93.
- Kutsuwada, N. ; Nakamura, Y. ; and Sasabe, S. Size Distribution of Electrophotographic Toner and Carrier by Image Processing Method .Journal of Imaging Technology 17 (1991): 115-118.
- Li, G. and Xu, X. Experimental Investigation of The Energy-Size Reduction Relationship in Comminution Using Fractal Theory. Minerals Engineering 6 (1993): 163-172.
- Lowrison, G. C. Crushing and grinding : the size reduction of solid materials. London: Butterworths, 1979.
- Muller, F. and Polke, F. R. From the Product and Process Requirements to the Milling Facility. Powder Technology 105 (1999): 2-13.
- Oshima, T. , et al. The Effect of the Type of Mill on the Flow Ability of Ground Powders. Advance Powder Technology 16 (1995). 35-42.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Rhodes, M. Introduction to Particle Technology. New York: John Wileys & Sons, 1998.
- Supakij Samuthpongthorn. Analysis of the Change in Particle Shape During Comminucation Using Vibration Mill. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University, 1998.
- Schwarz, H. and Exner, H. E. The Implementation of the Concept of Fractal Dimension on a Semi-Automatic Image Analyser. Powder Technology 27 (1980). 207-213.
- Sinha, D. and Dougherty, R. E. Introduction to Computer-Based Imaging Systems. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- Suzuki, M.; Muguruma, Y.; Hirota, M.; and Oshima,T. Fractal Dimensions of Particle Projected Shapes. Advanced Powder Technology 1 (1990). 115-123.
- Terence A. Particle Size Measurement Vol. 1. New York: Chapman & Hall, 1997.
- Zingerman, J. P. ; Mehta, S. C. ; Salter, J. M. ; and Radebaugh, W. G. Validation of a Computerized Image Analysis System for Particle Size Determination Pharmaceutical Applications. International Journal of Phamaceutics 88 (1992). 303-312.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
เครื่องบดย่อยแบบพินซบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องบดย่อยแบบฟันขบ

เครื่องบดย่อยแบบฟันขบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Nara Jiyu Mill Pulverizer รุ่น M-2 ของบริษัท Nara Machinery Co., Ltd. ซึ่งเป็นเครื่องบดย่อยแบบฟันขบที่มีลักษณะเป็นแบบ Single – runner โดยประกอบด้วยตัวเครื่องเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมอาจอยู่ในแนวตั้ง (vertical) หรือแนวระนาบ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่อยู่กับที่ (stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ มีแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมเล็กๆ ติดอยู่ เหล็กกล้าไร้สนิมเล็กๆ เรียกว่า pin breaker เป็นการเรียงสลับเกิดช่องว่าง (clearance) ระหว่าง pin breaker การจัดเรียงตัวเช่นนี้เรียกว่า intermeshing studs

เมื่อเดินเครื่องเพื่อย่อยขนาดสารตัวโรเตอร์ (rotor) จะหมุนด้วยความเร็วรอบสูงส่วนสเตเตอร์ (stator) จะอยู่กับที่ เกิดกลไกการย่อยขนาดหลายกลไก เช่น แรงเฉือน (shear force) แรงกระแทก (impact) เหมือนแฮมเมอร์ มิลล์ ช่องว่างระหว่าง rotor และ stator สามารถปรับได้ ทำให้สามารถควบคุมขนาดอนุภาคของสารหลังจากการย่อยขนาดได้

ตาราง ก1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องบดย่อยแบบฟันขบ

TYPE	SINGLE RUNNER	
MODEL	M-2	
Required power	(KW)	2.2
Number of Revolution	(RPM.)	8000
Diameter of Rotor	(m.m.)	180



รูปที่ ก1 เครื่องบดแบบฟันขบ (Nara Jiyu Mill)



ภาคผนวก ข

การทดสอบหาความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการกราดภาพ
เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปขนาดของอนุภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบหาค่าความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการส่งกราฟเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

เนื่องจากในขั้นตอนของการ binarize (การเปลี่ยนภาพจากภาพที่มีหลายระนาบเป็นภาพที่มีหนึ่งระนาบ) ของภาพดิจิทัลของอนุภาคเพื่อที่จะนำภาพที่มีหนึ่งระนาบนั้นมาทำการวิเคราะห์ขนาดในแต่ละครั้งพบว่า ภาพของอนุภาคที่มีหนึ่งระนาบที่ได้จะมีความแตกต่างไปจากภาพต้นฉบับเล็กน้อยขึ้นอยู่กับการเลือกเงื่อนไขในการ binarize โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความคมชัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาความคมชัดของภาพที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือเริ่มนำภาพไปทำการ binarize โดยกำหนดให้มีค่าความคมชัดแตกต่างกันแล้วนำไปวิเคราะห์ขนาดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพจากนั้นจึงนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบว่าค่าความคมชัดมีผลต่อการประมาณขนาดของอนุภาคโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์รูปภาพที่เข้าร่วมกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นอย่างไร

ข.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบนี้ทำโดยใช้กลุ่มของภาพ 2 ชุดคือ

- ชุดที่ 1 : กลุ่มของภาพวงกลมที่มีขนาดประมาณ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มิลลิเมตร แสดงดังรูป



- ชุดที่ 2 : กลุ่มของภาพวงรีที่มีขนาดแกนเอกประมาณ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มิลลิเมตร โดยแต่ละรูปจะมีขนาดของแกนโทประมาณ 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 และ 4.5 มิลลิเมตรตามลำดับ แสดงดังรูป



กลุ่มของอนุภาคทั้ง 2 ชุดจะถูกนำมาทดสอบตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกลุ่มของภาพทั้งสองชุดทำให้เป็นภาพดิจิทัลด้วยการส่องกราดภาพด้วยเครื่องส่องกราดภาพที่ความคมชัดของภาพ 120, 240, 360 และ 600 จุดต่อนิ้วตามลำดับ โดยกำหนดให้ระดับความเข้มเกรย์สเกลมี 8 ระนาบิต (256 สี) และระดับความคมชัดของการส่องกราดที่ค่าหนึ่งๆ ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการส่องกราดภาพทั้งหมด 5 ครั้ง ในแนวต่างๆ ได้แก่ แนวภาพที่ทำมุมกับพื้น 0, 45, 90, 135 และ 180 องศา ตามลำดับ
2. ทำการแปลงภาพดิจิทัลที่มี 8 ระนาบิตเหล่านั้นให้เป็นภาพดิจิทัลที่มีหนึ่งระนาบิต
3. นำภาพทั้งสองกลุ่มที่มีระนาบิตเดียวมาทำการหาขนาดด้วยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์รูปภาพ โดยแต่ละกลุ่มจะมีการหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางชนิดต่างๆ ดังนี้
 - 3.1) กลุ่มของภาพวงกลม : ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลม และขนาดที่ยาวและสั้นที่สุดของวงกลมแต่ละรูป
 - 3.2) กลุ่มของภาพวงรี : ขนาดที่ยาวที่สุด และสั้นที่สุด
4. ทำการเปรียบเทียบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิสัยของข้อมูลที่ได้ทั้งหมด

ข.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้แบ่งตามชนิดของกลุ่มอนุภาคดังนี้

- กลุ่มภาพวงกลม

- 1) ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปหามากตามค่าความคมชัดของภาพเป็นดังนี้คือ 120 จุดต่อนิ้วจะมีค่าต่ำที่สุด แต่ที่ความคมชัดของภาพที่ 240, 360 และ 600 จุดต่อนิ้ว จะมีค่าเท่ากัน
- 2) ค่าพิสัยของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเทียบเท่าวงกลมสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปหามากตามค่าความคมชัดของภาพเป็นดังนี้คือ ที่ 120 จุดต่อนิ้วจะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือที่ 240 จุดต่อนิ้ว ส่วนที่ 360 และ 600 จุดต่อนิ้วจะมีค่าพิสัยสูงที่สุดเท่ากัน
- 3) ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของขนาดที่ยาวที่สุดกับขนาดที่สั้นที่สุดสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปหามากตามค่าความคมชัดของภาพเป็นดังนี้คือ ที่ 240 จุดต่อนิ้วจะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ 360, 600 ตามลำดับ และที่ 120 จุดต่อนิ้วจะมีค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างนี้สูงที่สุด

อนึ่งได้ทำการสรุปข้อมูลดังกล่าวข้างต้นไว้ในตาราง ข.1 – ข.4

- กลุ่มภาพวงรี

- 1) ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของพิสัยของขนาดที่ยาวที่สุดสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปหามากตามค่าความคมชัดของภาพเป็นดังนี้คือ ที่ 600 จุดต่อนิ้วจะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ 240, 360 ตามลำดับ และที่ 120 จุดต่อนิ้วจะมีค่าทั้งสองสูงที่สุด
- 2) ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของพิสัยของขนาดที่สั้นที่สุดสามารถเรียงลำดับได้เช่นเดียวกับค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของพิสัยของขนาดที่ยาวที่สุด

ในทำนองเดียวกันข้อมูลการวิเคราะห์รูปภาพวงรีได้ทำการสรุปข้อมูลดังกล่าวไว้ในตาราง ข.5 – ข.8

ตาราง ข.1 แสดงผลการหาขนาดของวงกลมที่ความคมชัดของภาพ 120 จุดต่อนิ้ว

ขนาด(mm)	Area	Eqv. Circle Dia.	Ave Dev.	Range	Length	Width	Diff	Ave. Diff
2	3.86	2.22	0.03	0.06	2.18	1.98	0.20	0.12
2	3.86	2.22			2.12	2.12	0.00	
2	3.91	2.23			2.24	2.05	0.19	
2	3.99	2.25			2.05	2.05	0.00	
2	4.08	2.28			2.24	2.05	0.19	
3	7.90	3.17	0.02	0.04	3.13	3.00	0.12	0.13
3	7.77	3.14			3.15	2.95	0.21	
3	7.81	3.15			3.23	3.03	0.20	
3	7.99	3.19			3.10	3.10	0.00	
3	7.94	3.18			3.10	2.96	0.14	
4	13.50	4.14	0.02	0.04	4.19	4.01	0.19	0.15
4	13.54	4.15			4.25	4.05	0.20	
4	13.54	4.15			4.19	3.98	0.21	
4	13.50	4.14			4.17	4.00	0.16	
4	13.76	4.18			4.11	4.11	0.00	
5	20.88	5.15	0.02	0.06	5.41	4.95	0.46	0.25
5	20.83	5.15			5.36	5.15	0.20	
5	21.05	5.18			5.15	5.07	0.07	
5	21.31	5.21			5.40	5.31	0.09	
5	21.14	5.19			5.34	4.92	0.42	
6	29.38	6.12	0.02	0.05	5.97	5.97	0.00	0.12
6	29.60	6.14			6.04	5.83	0.21	
6	29.56	6.13			6.00	6.00	0.00	
6	29.64	6.14			6.37	5.97	0.41	
6	29.86	6.16			5.97	5.97	0.00	
7	38.41	6.99	0.03	0.07	7.28	6.87	0.40	0.20
7	38.67	7.02			7.13	6.93	0.21	
7	38.72	7.02			7.12	7.12	0.00	
7	38.89	7.04			7.13	7.00	0.13	
7	39.19	7.06			7.03	6.78	0.25	
8	48.96	7.89	0.02	0.05	7.83	7.64	0.19	0.17
8	49.09	7.90			7.78	7.58	0.20	
8	49.22	7.91			8.01	7.81	0.21	
8	49.26	7.92			7.84	7.84	0.00	
8	49.61	7.95			8.04	7.78	0.26	
		Average	0.02	0.05				0.16

ตาราง ข.2 แสดงผลการหาขนาดของวงกลมที่ความคมชัดของภาพ 240 จุดต่อนิ้ว

ขนาด(mm)	Area	Eqv. Circle Dia.	Ave Dev.	Range	Length	Width	Diff	Ave. Diff
2	3.63	2.15	0.03	0.07	2.24	2.15	0.10	0.06
2	3.77	2.19			2.24	2.15	0.10	
2	3.77	2.19			2.15	2.14	0.01	
2	3.85	2.21			2.19	2.08	0.10	
2	3.88	2.22			2.19	2.19	0.00	
3	7.57	3.10	0.03	0.07	3.10	3.10	0.00	0.07
3	7.69	3.13			3.03	3.03	0.00	
3	7.78	3.15			3.29	3.09	0.20	
3	7.82	3.16			3.25	3.11	0.15	
3	7.91	3.17			3.03	3.03	0.00	
4	13.13	4.09	0.03	0.07	4.09	3.87	0.23	0.14
4	13.22	4.10			4.07	3.96	0.10	
4	13.37	4.12			4.10	4.01	0.09	
4	13.41	4.13			4.17	3.96	0.21	
4	13.61	4.16			4.19	4.15	0.05	
5	20.32	5.09	0.04	0.10	5.07	5.07	0.00	0.09
5	20.59	5.12			5.10	5.00	0.10	
5	20.76	5.14			5.15	5.05	0.10	
5	21.06	5.18			5.26	5.08	0.18	
5	21.14	5.19			5.21	5.13	0.08	
6	28.67	6.04	0.04	0.11	5.93	5.93	0.00	0.10
6	29.00	6.08			6.15	6.13	0.03	
6	28.99	6.07			6.05	5.94	0.10	
6	29.25	6.10			6.22	5.98	0.23	
6	29.71	6.15			6.20	6.07	0.13	
7	37.80	6.94	0.05	0.13	6.95	6.85	0.10	0.16
7	38.23	6.98			6.99	6.78	0.21	
7	38.53	7.00			7.03	6.96	0.07	
7	38.54	7.00			7.09	6.90	0.19	
7	39.23	7.07			7.19	6.97	0.22	
8	48.23	7.83	0.05	0.11	7.91	7.78	0.13	0.10
8	48.31	7.84			7.88	7.78	0.10	
8	48.71	7.87			7.92	7.83	0.09	
8	49.12	7.91			7.94	7.84	0.10	
8	49.56	7.94			8.01	7.91	0.10	
Average			0.04	0.09				0.10

ตาราง ข.3 แสดงผลการหาขนาดของวงกลมที่ความคมชัดของภาพ 360 จุดต่อนิ้ว

ขนาด(mm)	Area	Eqv. Circle Dia.	Ave Dev.	Range	Length	Width	Diff	Ave. Diff
2	3.68	2.17	0.03	0.07	2.17	2.03	0.14	0.06
2	3.86	2.22			2.22	2.22	0.00	
2	3.89	2.22			2.24	2.18	0.06	
2	3.92	2.23			2.29	2.20	0.10	
2	3.93	2.24			2.16	2.16	0.00	
3	7.62	3.11	0.03	0.09	3.17	3.11	0.06	0.09
3	7.87	3.16			3.28	3.08	0.19	
3	7.90	3.17			3.24	3.24	0.00	
3	7.98	3.19			3.20	3.06	0.14	
3	8.08	3.21			3.24	3.18	0.06	
4	13.20	4.10	0.03	0.08	4.18	4.04	0.13	0.09
4	13.53	4.15			4.17	4.11	0.06	
4	13.51	4.15			4.17	4.03	0.14	
4	13.56	4.15			4.16	4.10	0.06	
4	13.71	4.18			4.26	4.20	0.07	
5	20.48	5.11	0.04	0.10	5.19	5.10	0.09	0.11
5	20.94	5.16			5.29	5.14	0.15	
5	20.97	5.17			5.14	5.07	0.07	
5	21.09	5.18			5.32	5.13	0.19	
5	21.32	5.21			5.29	5.23	0.07	
6	28.64	6.04	0.05	0.13	6.10	5.95	0.15	0.14
6	29.17	6.09			6.18	6.05	0.14	
6	29.39	6.12			6.17	6.02	0.15	
6	29.36	6.11			6.11	5.97	0.14	
6	29.85	6.16			6.22	6.09	0.14	
7	38.01	6.96	0.05	0.13	7.16	6.85	0.31	0.18
7	38.60	7.01			7.06	6.87	0.20	
7	38.59	7.01			7.09	6.96	0.13	
7	38.69	7.02			7.08	6.94	0.14	
7	39.43	7.08			7.13	7.01	0.12	
8	48.21	7.83	0.06	0.13	7.86	7.80	0.07	0.16
8	48.39	7.85			7.93	7.69	0.24	
8	48.83	7.88			8.01	7.70	0.31	
8	49.56	7.94			7.94	7.80	0.14	
8	49.85	7.97			8.11	8.04	0.07	
Average			0.04	0.10				0.12

ตาราง ข.4 แสดงผลการหาขนาดของวงกลมที่ความคมชัดของภาพ 600 จุดต่อนิ้ว

ขนาด(mm)	Area	Eqv. Circle Dia.	Ave Dev.	Range	Length	Width	Diff	Ave. Diff
2	3.62	2.15	0.04	0.10	2.18	2.01	0.16	0.08
2	3.69	2.17			2.17	2.09	0.08	
2	3.81	2.20			2.19	2.15	0.04	
2	3.83	2.21			2.22	2.14	0.08	
2	3.95	2.24			2.26	2.21	0.04	
3	7.52	3.09	0.03	0.07	3.15	3.01	0.14	0.10
3	7.63	3.12			3.20	3.08	0.12	
3	7.70	3.13			3.16	3.04	0.12	
3	7.82	3.15			3.17	3.14	0.03	
3	7.89	3.17			3.24	3.15	0.09	
4	12.88	4.05	0.03	0.08	4.14	3.98	0.16	0.10
4	13.03	4.07			4.12	4.04	0.08	
4	13.07	4.08			4.14	3.98	0.16	
4	13.31	4.12			4.12	4.10	0.02	
4	13.41	4.13			4.18	4.08	0.09	
5	19.95	5.04	0.04	0.11	5.13	4.97	0.16	0.12
5	20.16	5.07			5.12	5.01	0.11	
5	20.33	5.09			5.16	4.96	0.20	
5	20.65	5.13			5.17	5.13	0.04	
5	20.81	5.15			5.19	5.13	0.06	
6	27.98	5.97	0.04	0.11	6.07	5.85	0.22	0.16
6	28.24	5.99			6.10	5.93	0.17	
6	28.43	6.02			6.07	5.90	0.16	
6	28.78	6.05			6.10	5.95	0.15	
6	28.99	6.07			6.13	6.05	0.08	
7	37.00	6.86	0.04	0.11	6.95	6.74	0.21	0.16
7	37.24	6.88			7.02	6.80	0.22	
7	37.51	6.91			7.04	6.83	0.20	
7	37.82	6.94			6.98	6.84	0.15	
7	38.24	6.98			6.99	6.95	0.04	
8	47.08	7.74	0.05	0.10	7.86	7.60	0.26	0.20
8	47.10	7.74			7.88	7.62	0.26	
8	47.21	7.75			7.86	7.67	0.18	
8	48.04	7.82			7.88	7.67	0.20	
8	48.33	7.84			7.86	7.76	0.09	
Average			0.04	0.10				0.13

ตาราง ข.5 แสดงผลการหาขนาดของวงรีที่ความคมชัดของภาพ 120 จุดต่อนิ้ว

Maj	Min	Length	Standard dev.	Range	Width	Standard dev.	Range
2	1.5	1.88	0.09	0.21	1.25	0.12	0.29
2	1.5	1.97			1.21		
2	1.5	2.08			1.50		
2	1.5	2.08			1.25		
2	1.5	2.08			1.25		
3	2	3.13	0.15	0.38	1.88	0.17	0.39
3	2	2.92			1.88		
3	2	3.29			2.25		
3	2	3.26			1.86		
3	2	3.15			1.89		
4	2.5	3.96	0.13	0.33	2.29	0.10	0.23
4	2.5	4.17			2.29		
4	2.5	4.29			2.52		
4	2.5	4.19			2.33		
4	2.5	4.05			2.43		
5	3	4.79	0.22	0.52	2.71	0.11	0.30
5	3	4.79			2.92		
5	3	5.09			3.00		
5	3	5.31			2.89		
5	3	5.02			2.95		
6	3.5	5.83	0.16	0.43	3.33	0.19	0.49
6	3.5	6.15			3.82		
6	3.5	6.04			3.54		
6	3.5	6.13			3.42		
6	3.5	6.26			3.55		
7	4	6.88	0.16	0.31	3.96	0.10	0.21
7	4	7.18			4.11		
7	4	6.88			3.96		
7	4	6.89			3.98		
7	4	7.17			4.17		
8	4.5	7.83	0.21	0.44	4.57	0.15	0.43
8	4.5	7.71			4.58		
8	4.5	7.71			4.38		
8	4.5	8.15			4.81		
8	4.5	8.09			4.63		
		Average	0.16	0.37		0.13	0.33

ตาราง ข.6 แสดงผลการหาขนาดของวงรีที่ความคมชัดของภาพ 240 จุดต่อนิ้ว

Maj	Min	Length	Standard dev.	Range	Width	Standard dev.	Range
2	1.5	2.20	0.07	0.15	1.45	0.04	0.10
2	1.5	2.08			1.46		
2	1.5	2.08			1.46		
2	1.5	2.20			1.35		
2	1.5	2.23			1.42		
3	2	3.13	0.07	0.13	1.88	0.06	0.13
3	2	3.26			2.00		
3	2	3.13			1.88		
3	2	3.24			1.97		
3	2	3.24			1.99		
4	2.5	4.17	0.09	0.25	2.50	0.06	0.16
4	2.5	4.08			2.52		
4	2.5	4.17			2.40		
4	2.5	4.33			2.56		
4	2.5	4.13			2.54		
5	3	5.00	0.11	0.27	3.02	0.07	0.16
5	3	4.90			3.02		
5	3	5.13			3.04		
5	3	5.17			3.17		
5	3	5.09			3.00		
6	3.5	5.83	0.15	0.37	3.65	0.09	0.23
6	3.5	6.20			3.73		
6	3.5	6.04			3.54		
6	3.5	6.06			3.66		
6	3.5	6.19			3.50		
7	4	7.13	0.09	0.19	4.29	0.09	0.23
7	4	6.98			4.17		
7	4	6.98			4.06		
7	4	7.10			4.18		
7	4	7.17			4.25		
8	4.5	7.92	0.05	0.11	4.69	0.06	0.12
8	4.5	8.02			4.81		
8	4.5	7.92			4.69		
8	4.5	7.94			4.81		
8	4.5	8.00			4.71		
		Average	0.09	0.21		0.07	0.16

ตาราง ข.7 แสดงผลการหาขนาดของวงรีที่ความคมชัดของภาพ 360 จุดต่อนิ้ว

Maj	Min	Length	Standard dev.	Range	Width	Standard dev.	Range
2	1.5	2.15	0.08	0.18	1.46	0.06	0.17
2	1.5	2.18			1.56		
2	1.5	2.15			1.39		
2	1.5	2.22			1.46		
2	1.5	2.33			1.43		
3	2	3.06	0.11	0.25	1.88	0.09	0.18
3	2	3.13			1.88		
3	2	3.21			2.02		
3	2	3.29			2.02		
3	2	3.31			2.06		
4	2.5	4.03	0.11	0.28	2.50	0.07	0.15
4	2.5	4.17			2.43		
4	2.5	4.19			2.58		
4	2.5	4.29			2.58		
4	2.5	4.31			2.45		
5	3	4.93	0.13	0.32	2.99	0.07	0.15
5	3	5.00			2.99		
5	3	5.09			3.10		
5	3	5.25			3.14		
5	3	5.16			3.07		
6	3.5	5.90	0.10	0.26	3.61	0.06	0.15
6	3.5	6.06			3.69		
6	3.5	6.12			3.73		
6	3.5	6.04			3.68		
6	3.5	6.17			3.58		
7	4	6.88	0.11	0.29	4.17	0.06	0.12
7	4	7.09			4.29		
7	4	7.02			4.17		
7	4	7.04			4.25		
7	4	7.17			4.28		
8	4.5	7.85	0.11	0.23	4.72	0.12	0.27
8	4.5	7.99			4.58		
8	4.5	8.08			4.85		
8	4.5	7.87			4.80		
8	4.5	8.07			4.59		
		Average	0.11	0.26		0.08	0.17

ตาราง ข.8 แสดงผลการหาขนาดของวงรีที่ความคมชัดของภาพ 600 จุดต่อนิ้ว

Maj	Min	Length	Standard dev.	Range	Width	Standard dev.	Range
2	1.5	2.13	0.04	0.08	1.44	0.02	0.07
2	1.5	2.17			1.43		
2	1.5	2.13			1.44		
2	1.5	2.20			1.41		
2	1.5	2.21			1.48		
3	2	3.16	0.02	0.04	2.01	0.04	0.10
3	2	3.18			2.02		
3	2	3.19			2.02		
3	2	3.16			1.93		
3	2	3.19			1.96		
4	2.5	4.02	0.06	0.14	2.50	0.05	0.13
4	2.5	4.16			2.49		
4	2.5	4.14			2.46		
4	2.5	4.12			2.55		
4	2.5	4.14			2.42		
5	3	4.92	0.05	0.14	2.99	0.04	0.09
5	3	5.06			3.03		
5	3	5.00			2.99		
5	3	5.04			3.00		
5	3	5.02			3.09		
6	3.5	5.86	0.07	0.18	3.61	0.03	0.07
6	3.5	6.04			3.61		
6	3.5	5.96			3.66		
6	3.5	5.99			3.58		
6	3.5	5.98			3.61		
7	4	6.80	0.08	0.19	4.18	0.05	0.11
7	4	6.90			4.16		
7	4	6.97			4.10		
7	4	6.99			4.19		
7	4	6.97			4.08		
8	4.5	7.79	0.06	0.13	4.67	0.04	0.10
8	4.5	7.91			4.68		
8	4.5	7.91			4.59		
8	4.5	7.85			4.69		
8	4.5	7.91			4.63		
		Average	0.05	0.13		0.04	0.10

ข.3 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่าที่ความคมชัดของภาพ 120 จุดต่อนิ้วให้ค่าเฉลี่ยของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของค่าพิสัยต่ำที่สุดสำหรับภาพกลุ่มที่เป็นวงกลม แต่ที่ความคมชัดนี้จะเห็นว่าให้ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของขนาดที่ยาวที่สุดกับขนาดที่สั้นที่สุดของกลุ่มภาพวงกลม และกลุ่มภาพวงรี สูงที่สุด และแม้ว่าที่ความคมชัดของภาพที่ 600 จุดต่อนิ้วจะให้ค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของพิสัยของขนาดที่ยาวที่สุด และค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของพิสัยของขนาดที่สั้นที่สุดของกลุ่มภาพที่เป็นวงรีต่ำที่สุด แต่ในส่วนของภาพวงกลมพบว่าที่ความคมชัด 600 จุดต่อนิ้วจะให้ค่าต่างๆ สูงทุกค่า ดังนั้นจึงน่าจะทำการเลือกค่าความคมชัดที่ 240 จุดต่อนิ้วเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากจะให้ค่าต่างๆ ที่ค่อนข้างต่ำสำหรับทุกกรณี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

การทดสอบหาความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการกราดภาพ
เพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปทรงของอนุภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบหาความชัดที่เหมาะสมสำหรับการกราดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปทรงของอนุภาค

ค.1 วิธีการทดสอบ

1. นำภาพถ่ายของอนุภาคที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนมาทำการกราดภาพด้วยเครื่องกราดภาพที่ความคมชัด 72, 120, 240 และ 360
2. นำภาพดิจิทัลที่ได้จากข้อ 1 มาทำให้เป็นภาพที่มีหนึ่งระนาบิตด้วยโปรแกรมประยุกต์ทั่วไป
3. นำภาพดิจิทัลที่เป็นหนึ่งระนาบิตมาวิเคราะห์ค่ามิติแฟรคทัลด้วยโปรแกรม Fractal (ดูรายละเอียดในบทที่ 3)
4. เปรียบเทียบค่ามิติแฟรคทัลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ภาพ กับค่าที่มิติแฟรคทัลได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดา (manual)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2 ผลการทดสอบ

1. ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดา = 1.035

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ

ลำดับที่	ความคมชัด			
	72	120	240	360
1	1.042	1.097	1.020	1.037
2	1.048	1.070	1.056	1.059
3	1.074	1.113	1.107	1.072
4	1.152	1.074	1.020	1.054
5	0.988	1.072	1.054	1.054
6	1.111	1.038	1.053	1.042
7	1.102	1.044	1.035	1.028
8	0.957	1.050	1.013	1.061
9	1.053	1.012	1.010	1.044
10	1.089	1.060	1.045	1.041
11	1.071	1.050	1.053	1.054
12	1.075	1.032	1.038	1.016
13	1.091	1.042	1.045	1.070
14	1.040	1.028	1.015	1.081
15	1.140	1.047	1.022	1.095
16	1.059	1.038	1.050	1.037
17	1.135	1.055	1.037	1.037
18	1.059	1.066	1.050	1.028
19	1.095	1.059	1.031	1.034
20	1.111	1.064	1.036	1.050
เฉลี่ย	1.075	1.056	1.040	1.050
ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา (%)	3.865	2.029	0.483	1.449

2. ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดา = 1.050

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ

ลำดับที่	ความคมชัด			
	72	120	240	360
1	1.086	1.012	1.015	1.061
2	1.097	1.058	1.047	1.046
3	1.055	1.059	1.047	1.026
4	1.117	1.031	1.019	1.067
5	1.180	1.060	1.030	1.020
6	1.091	1.077	1.064	1.060
7	1.011	1.089	1.061	1.054
8	1.065	1.076	1.052	1.043
9	1.087	1.057	1.046	1.036
10	0.953	1.088	1.081	1.135
11	1.140	1.014	1.016	1.037
12	1.152	1.061	1.046	1.015
13	1.085	1.074	1.049	1.050
14	1.061	1.118	1.086	1.085
15	1.148	1.080	1.031	1.066
16	1.181	1.029	1.050	1.085
17	1.007	1.050	1.060	1.056
18	1.044	1.075	1.054	1.064
19	1.098	1.021	1.002	1.060
20	1.036	1.052	1.051	1.042
เฉลี่ย	1.085	1.059	1.045	1.055
ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา (%)	3.305	0.862	0.476	0.476

3. ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีธรรมดา = 1.076

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพ

ลำดับที่	ความคมชัด			
	72	120	240	360
1	1.048	1.042	1.052	1.068
2	1.100	1.030	1.020	1.032
3	1.066	1.011	1.069	1.074
4	1.041	1.057	1.023	1.052
5	1.122	1.080	1.037	1.053
6	1.063	1.033	1.076	1.100
7	1.082	1.048	1.053	1.058
8	1.063	1.018	1.073	1.083
9	1.032	1.080	1.068	1.030
10	1.048	1.046	1.033	1.106
11	1.078	1.130	1.069	1.065
12	1.132	1.006	1.025	1.056
13	1.051	1.059	1.039	1.029
14	1.113	1.127	1.097	1.095
15	1.154	1.035	1.078	1.078
16	1.074	1.016	1.051	1.039
17	1.097	1.072	1.067	1.043
18	1.069	1.046	1.069	1.120
19	1.079	1.083	1.059	1.079
20	1.077	1.042	1.070	1.073
เฉลี่ย	1.079	1.053	1.056	1.067
ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา (%)	0.279	2.138	1.859	0.836

จากการใช้อนุภาคที่มีค่ามิติแฟรคทัลเฉลี่ยแตกต่างกัน 3 กลุ่มดังแสดงในตารางข้างต้นพบว่าที่ความคมชัด 240 จุดต่อนิ้วจะให้ค่ามิติแฟรคทัลเฉลี่ยที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ดังนั้นในการประเมินรูปทรงอนุภาคด้วยโปรแกรม Fractal จึงควรใช้ความละเอียดในการกราดภาพ 240 จุดต่อนิ้ว ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความคมชัดที่เหมาะสมสำหรับการส่องกราดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคคือมีค่าเท่ากับ 240 จุดต่อนิ้วเช่นกัน (รายละเอียดดูในภาคผนวก ข.)



ภาคผนวก ง
ข้อมูลจากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 การกระจายขนาดของอนุภาค

1. แร่ที่มีขนาดช่องเปิด 0.3 มิลลิเมตร

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	49.21	49.08
45 - 75	60	30.32	30.24
75 - 106	90.5	14.95	14.91
106 - 180	143	4.65	4.63
180 - 250	215	0.67	0.67
250 - 335	292.5	0.36	0.36
335 - 850	592.5	0.10	0.10
รวม		100.26	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 41.72 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 1.92

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	42.02	41.94
45 - 75	60	23.88	23.83
75 - 106	90.5	19.56	19.52
106 - 180	143	11.55	11.53
180 - 250	215	1.92	1.92
250 - 335	292.5	0.90	0.89
335 - 850	592.5	0.37	0.37
รวม		100.19	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 49.92 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.12

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	43.00	42.95
45 - 75	60	24.52	24.49
75 - 106	90.5	19.74	19.72
106 - 180	143	10.07	10.05
180 - 250	215	1.59	1.59
250 - 335	292.5	0.81	0.81
335 - 850	592.5	0.39	0.39
รวม		100.12	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 48.59 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.09

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	38.99	38.95
45 - 75	60	26.44	26.42
75 - 106	90.5	21.12	21.10
106 - 180	143	13.11	13.09
180 - 250	215	0.41	0.41
250 - 335	292.5	0.02	0.02
335 - 850	592.5	0.01	0.01
รวม		100.09	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 50.32 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.01

2. แร่งที่มีขนาดช่องเปิด 0.5 มิลลิเมตร

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	43.59	43.54
45 - 75	60	30.02	29.99
75 - 106	90.5	15.97	15.95
106 - 180	143	7.96	7.95
180 - 250	215	1.98	1.97
250 - 335	292.5	0.54	0.54
335 - 850	592.5	0.05	0.05
รวม		100.11	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 46.38 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.01

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	36.84	36.71
45 - 75	60	24.79	24.70
75 - 106	90.5	19.86	19.79
106 - 180	143	15.46	15.40
180 - 250	215	2.84	2.84
250 - 335	292.5	0.56	0.55
335 - 850	592.5	0.02	0.01
รวม		100.35	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 54.30 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.10

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	33.00	32.89
45 - 75	60	20.83	20.76
75 - 106	90.5	19.09	19.03
106 - 180	143	17.58	17.52
180 - 250	215	6.54	6.52
250 - 335	292.5	1.98	1.97
335 - 850	592.5	1.32	1.31
รวม		100.32	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 48.59 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.09

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	38.99	38.95
45 - 75	60	26.44	26.42
75 - 106	90.5	21.12	21.10
106 - 180	143	13.11	13.09
180 - 250	215	0.41	0.41
250 - 335	292.5	0.02	0.02
335 - 850	592.5	0.01	0.01
รวม		100.09	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 68.79 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.21

3. แร่งที่มีขนาดช่องเปิด 0.7 มิลลิเมตร

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	38.24	38.19
45 - 75	60	27.84	27.81
75 - 106	90.5	16.76	16.73
106 - 180	143	10.89	10.87
180 - 250	215	4.07	4.07
250 - 335	292.5	1.71	1.71
335 - 850	592.5	0.62	0.62
รวม		100.12	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 53.31 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.18

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	31.74	31.71
45 - 75	60	21.79	21.77
75 - 106	90.5	19.77	19.75
106 - 180	143	17.90	17.88
180 - 250	215	6.30	6.30
250 - 335	292.5	2.13	2.13
335 - 850	592.5	0.47	0.47
รวม		100.11	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 63.09 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.24

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	28.84	28.81
45 - 75	60	19.83	19.81
75 - 106	90.5	19.42	19.40
106 - 180	143	20.06	20.03
180 - 250	215	8.85	8.84
250 - 335	292.5	2.59	2.59
335 - 850	592.5	0.51	0.51
รวม		100.11	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 68.80 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.28

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	24.60	24.49
45 - 75	60	19.52	19.43
75 - 106	90.5	17.97	17.89
106 - 180	143	20.88	20.79
180 - 250	215	11.60	11.54
250 - 335	292.5	4.84	4.81
335 - 850	592.5	1.05	1.05
รวม		100.44	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 77.93 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.33

4. แร่งที่มีขนาดช่องเปิด 1.0 มิลลิเมตร

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	30.12	30.10
45 - 75	60	24.93	24.92
75 - 106	90.5	18.42	18.41
106 - 180	143	14.85	14.84
180 - 250	215	5.84	5.84
250 - 335	292.5	3.48	3.48
335 - 850	592.5	2.42	2.41
รวม		100.04	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 65.93 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.35

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	30.41	30.36
45 - 75	60	21.98	21.94
75 - 106	90.5	18.83	18.79
106 - 180	143	17.37	17.33
180 - 250	215	6.21	6.19
250 - 335	292.5	3.00	2.99
335 - 850	592.5	2.40	2.40
รวม		100.18	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 67.07 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.37

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	28.40	28.34
45 - 75	60	19.46	19.42
75 - 106	90.5	18.54	18.50
106 - 180	143	20.06	20.02
180 - 250	215	8.37	8.35
250 - 335	292.5	3.44	3.43
335 - 850	592.5	1.95	1.95
รวม		100.22	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 71.65 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.37

อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ขนาด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (%)
0 - 45	22.5	22.34	22.32
45 - 75	60	18.26	18.25
75 - 106	90.5	18.24	18.23
106 - 180	143	21.71	21.70
180 - 250	215	10.94	10.93
250 - 335	292.5	5.52	5.51
335 - 850	592.5	3.06	3.05
รวม		100.06	100.00

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = 84.40 ไมโครเมตร

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 2.40

ง.2 ผลของสภาวะการอบที่มีต่อลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์

1. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.3 มิลลิเมตร

1.1 อัตราการป้อน 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	42.4	43.5	46.1	44.0
มุมบนพายตัก	องศา	62.1	65.4	63.7	63.7
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.149	1.150	1.147	1.149
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.635	1.628	1.631	1.631
ค่าความอัดตัว	%				29.6
ค่าความเกาะกัน	%	44.4	44.0	44.2	44.2
มุมหลังตก	องศา	30.2	27.9	28.4	28.8
มุมผลต่าง	องศา				15.2
ค่าการแผ่กระจาย	%	29.4	32.0	20.0	27.1

ดัชนีการไหล = 47.00 : ไม่ดี

ดัชนีการไหลทะลัก = 68.00 : ค่อนข้างสูง

1.2 อัตราการป้อน 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	42.4	45.6	46.4	44.8
มุมบนพายตัก	องศา	76.0	68.2	71.6	71.9
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.151	1.156	1.153	1.153
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.684	1.679	1.678	1.680
ค่าความอัดตัว	%				31.4
ค่าความเกาะกัน	%	53.0	53.8	49.1	52.0
มุมหลังตก	องศา	30.9	36.0	34.2	33.7
มุมผลต่าง	องศา				11.1
ค่าการแผ่กระจาย	%	18.3	20.1	21.1	19.8

ดัชนีการไหล = 44.00 : ไม่ดี

ดัชนีการไหลทะลัก = 60.50 : ค่อนข้างสูง

1.3 อัตราการป้อน 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	39.7	40.1	40.6	40.1
มุมบนพายตัก	องศา	72.6	69.9	67.7	70.1
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.144	1.139	1.138	1.140
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.689	1.681	1.690	1.687
ค่าความอัดตัว	%				32.4
ค่าความเกาะกัน	%	36.6	39.4	36.9	37.6
มุมหลังตก	องศา	32.5	34.0	33.4	33.3
มุมผลต่าง	องศา				6.8
ค่าการแผ่กระจาย	%	32.3	29.4	29.5	30.4

ดัชนีการไหล = 46.00 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะลัก = 64.00 : ค่อนข้างสูง

1.4 อัตราการป้อน 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	43.5	44.0	42.7	43.4
มุมบนพายตัก	องศา	68.4	67.1	67.1	67.5
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.149	1.150	1.151	1.150
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.651	1.647	1.656	1.651
ค่าความอัดตัว	%				30.4
ค่าความเกาะกัน	%	38.4	36.3	41.1	38.6
มุมหลังตก	องศา	29.9	31.1	32.4	31.1
มุมผลต่าง	องศา				12.3
ค่าการแผ่กระจาย	%	22.0	23.6	27.4	24.3

ดัชนีการไหล = 47.00 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะลัก = 63.00 : ค่อนข้างสูง

2. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.5 มิลลิเมตร

2.1 อัตราการบ่อน 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	41.8	43.0	44.4	43.1
มุมบนพายดัก	องศา	74.0	70.7	72.8	72.5
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.226	1.218	1.218	1.221
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.691	1.698	1.701	1.697
ค่าความอัดตัว	%				28.1
ค่าความเกาะกัน	%	58.5	56.0	60.0	58.2
มุมหลังตก	องศา	30.3	31.1	34.9	32.1
มุมผลต่าง	องศา				11.0
ค่าการแผ่กระจาย	%	20.0	15.2	18.6	17.9

ดัชนีการไหล = 42.00 : ไม่ดี
 ดัชนีการไหลทะเล็ก = 56.00 : มีแนวโน้มที่จะไหลทะเล็ก

2.2 อัตราการบ่อน 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	40.2	43.0	42.7	42.0
มุมบนพายดัก	องศา	65.7	65.4	62.3	64.5
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.252	1.252	1.256	1.253
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.684	1.686	1.688	1.686
ค่าความอัดตัว	%				25.7
ค่าความเกาะกัน	%	61.3	54.6	51.1	55.7
มุมหลังตก	องศา	25.3	31.1	31.6	29.3
มุมผลต่าง	องศา				12.6
ค่าการแผ่กระจาย	%	17.7	12.3	16.7	15.6

ดัชนีการไหล = 47.00 : ไม่ดี
 ดัชนีการไหลทะเล็ก = 60.00 : ค่อนข้างสูง

3. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.7 มิลลิเมตร

3.1 อัตราการป้อน 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	42.3	44.3	41.8	42.8
มุมบนพายตัก	องศา	65.8	67.0	66.6	66.5
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.181	1.179	1.176	1.179
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.638	1.645	1.647	1.643
ค่าความอัดตัว	%				28.3
ค่าความเกาะกัน	%	46.7	40.2	39.9	42.3
มุมหลังตก	องศา	28.3	31.1	30.1	29.8
มุมผลต่าง	องศา				13.0
ค่าการแผ่กระจาย	%	18.9	20.2	25.6	21.6

ดัชนีการไหล = 47.00 : ไม่ดี

ดัชนีการไหลทะลัก = 63.50 : ค่อนข้างสูง

3.2 อัตราการป้อน 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	42.3	44.4	43.2	43.3
มุมบนพายตัก	องศา	64.5	67.5	66.8	66.3
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.206	1.206	1.193	1.202
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.665	1.666	1.669	1.667
ค่าความอัดตัว	%				27.9
ค่าความเกาะกัน	%	44.3	46.2	44.2	44.9
มุมหลังตก	องศา	30.7	30.8	31.7	31.1
มุมผลต่าง	องศา				12.2
ค่าการแผ่กระจาย	%	18.5	21.6	19.8	20.0

ดัชนีการไหล = 47.00 : ไม่ดี

ดัชนีการไหลทะลัก = 61.00 : ค่อนข้างสูง

3.3 อัตราการป้อน 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	43.0	43.3	42.3	42.9
มุมบนพายตัก	องศา	66.3	66.0	66.9	66.4
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.227	1.247	1.234	1.236
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.693	1.689	1.696	1.693
ค่าความอัดตัว	%				27.0
ค่าความเกาะกัน	%	52.5	55.2	56.0	54.6
มุมหลังตก	องศา	31.7	30.6	33.6	32.0
มุมผลต่าง	องศา				10.9
ค่าการแผ่กระจาย	%	12.9	20.7	16.0	16.5

ดัชนีการไหล = 45.00 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะเล็ก = 58.00 : มีแนวโน้มที่จะไหลทะเล็ก

3.4 อัตราการป้อน 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	39.4	41.9	38.1	39.8
มุมบนพายตัก	องศา	57.9	59.8	59.4	59.0
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.285	1.272	1.265	1.274
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.700	1.706	1.702	1.703
ค่าความอัดตัว	%				25.2
ค่าความเกาะกัน	%	60.0	58.6	58.1	58.9
มุมหลังตก	องศา	31.0	25.4	25.6	27.3
มุมผลต่าง	องศา				12.5
ค่าการแผ่กระจาย	%	16.4	13.6	14.0	14.7

ดัชนีการไหล = 50.50 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะเล็ก = 63.00 : ค่อนข้างสูง

4. ขนาดช่องเปิดของแร่ 1.0 มิลลิเมตร

4.1 อัตราการบ่อน 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	43.5	43.4	41.8	42.9
มุมบนพายดัก	องศา	65.4	65.6	65.0	65.3
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.241	1.252	1.253	1.249
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.696	1.699	1.698	1.698
ค่าความอัดตัว	%				26.4
ค่าความเกาะกัน	%	64.2	63.9	60.3	62.8
มุมหลังตก	องศา	33.6	30.9	30.8	31.8
มุมผลต่าง	องศา				11.1
ค่าการแผ่กระจาย	%	10.0	15.2	19.6	14.9

ดัชนีการไหล = 44.50 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะเล็ก = 57.50 : มีแนวโน้มที่จะไหลทะเล็ก

4.2 อัตราการบ่อน 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	1	2	3	เฉลี่ย
มุมขณะสงบ	องศา	40.1	41.2	43.5	41.6
มุมบนพายดัก	องศา	65.7	64.4	64.9	65.0
ความหนาแน่นปรากฏขณะหลวม	กรัม/ลบ.ซม.	1.245	1.258	1.264	1.256
ความหนาแน่นปรากฏขณะอัด	กรัม/ลบ.ซม.	1.671	1.667	1.673	1.670
ค่าความอัดตัว	%				24.8
ค่าความเกาะกัน	%	57.4	59.5	55.4	57.4
มุมหลังตก	องศา	30.5	33.9	33.6	32.7
มุมผลต่าง	องศา				8.9
ค่าการแผ่กระจาย	%	13.7	19.3	21.0	18.0

ดัชนีการไหล = 45.00 : ไม่ดี
ดัชนีการไหลทะเล็ก = 55.50 : มีแนวโน้มที่จะไหลทะเล็ก

ง.3 ผลของสภาวะการบดที่มีต่อรูปทรงอนุภาค

1. ขนาดช่องเปิดของร่ง 0.3 มิลลิเมตร

1.1 อัตราการบดอนุวัตฤติบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.060	1.056	1.086	1.085	1.057
2	1.005	1.068	1.043	1.074	1.056
3	1.021	1.035	1.122	1.026	1.070
4	1.083	1.019	1.056	1.050	1.053
5	1.062	1.064	1.062	1.068	1.081
6	1.077	1.045	1.055	1.045	1.072
7	1.046	1.026	1.060	1.088	1.064
8	1.075	1.055	1.073	1.048	1.067
9	1.046	1.049	1.021	1.026	1.085
10	1.076	1.036	1.049	1.074	1.073
11	1.035	1.069	1.089	1.059	1.041
12	1.070	1.063	1.045	1.053	1.055
13	1.048	1.056	1.068	1.023	1.082
14	1.046	1.070	1.054	1.077	1.031
15	1.062	1.099	1.053	1.053	1.076
16	1.075	1.025	1.020	1.080	1.069
17	1.045	1.072	1.081	1.074	1.054
18	1.073	1.059	1.083	1.074	1.070
19	1.050	1.067	1.047	1.053	1.082
20	1.056	1.057	1.080	1.045	1.064
เฉลี่ย	1.056	1.055	1.062	1.059	1.065

1.2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.071	1.071	1.131	1.052	1.051
2	1.074	1.037	1.075	1.102	1.080
3	1.069	1.039	1.071	1.102	1.057
4	1.068	1.091	1.084	1.078	1.021
5	1.110	1.105	1.116	1.064	1.065
6	1.053	1.081	1.159	1.069	1.077
7	1.103	1.087	1.075	1.129	1.070
8	1.041	1.053	1.069	1.088	1.088
9	1.100	1.052	1.100	1.106	1.041
10	1.059	1.018	1.087	1.136	1.082
11	1.027	1.056	1.066	1.096	1.123
12	1.119	1.055	1.061	1.141	1.035
13	1.059	1.056	1.083	1.027	1.141
14	1.120	1.046	1.027	1.084	1.061
15	1.123	1.087	1.060	1.071	1.045
16	1.029	1.075	1.082	1.049	1.097
17	1.080	1.061	1.064	1.082	1.044
18	1.058	1.067	1.088	1.119	1.065
19	1.111	1.085	1.131	1.104	1.044
20	1.070	1.096	1.069	1.073	1.075
21	1.092	1.134	1.061	1.067	1.017
22	1.065	1.117	1.110	1.136	1.067
23	1.067	1.044	1.052	1.100	1.094
24	1.084	1.061	1.079	1.046	1.130
25	1.085	1.095	1.074	1.093	1.098
26	1.095	1.066	1.037	1.128	1.036
27	1.117	1.048	1.081	1.141	1.046
28	1.075	1.058	1.065	1.127	1.072
29	1.057	1.016	1.079	1.086	1.079
30	1.076	1.103	1.050	1.062	1.070
เฉลี่ย	1.079	1.069	1.080	1.092	1.069

1.3 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.101	1.047	1.085	1.031	1.084
2	1.079	1.079	1.076	1.046	1.105
3	1.082	1.108	1.070	1.053	1.062
4	1.069	1.075	1.039	1.059	1.072
5	1.049	1.070	1.085	1.070	1.089
6	1.119	1.072	1.043	1.052	1.073
7	1.083	1.038	1.021	1.049	1.104
8	1.084	1.058	1.066	1.017	1.070
9	1.071	1.082	1.064	1.071	1.072
10	1.086	1.055	1.046	1.100	1.050
11	1.104	1.044	1.051	1.044	1.044
12	1.087	1.037	1.054	1.061	1.062
13	1.043	1.060	1.063	1.064	1.034
14	1.106	1.112	1.115	1.074	1.062
15	1.067	1.078	1.050	1.038	1.130
16	1.117	1.083	1.129	1.039	1.098
17	1.067	1.037	1.050	1.052	1.074
18	1.039	1.050	1.092	1.052	1.079
19	1.105	1.071	1.100	1.045	1.057
20	1.064	1.032	1.079	1.033	1.052
21	1.089	1.067	1.040	1.070	1.096
22	1.045	1.048	1.096	1.038	1.042
23	1.061	1.064	1.077	1.017	1.109
24	1.093	1.065	1.100	1.068	1.055
25	1.107	1.057	1.125	1.045	1.083
26	1.068	1.069	1.156	1.048	1.072
27	1.073	1.069	1.070	1.041	1.060
28	1.102	1.065	1.100	1.076	1.068
29	1.069	1.030	1.114	1.015	1.060
30	1.096	1.059	1.093	1.033	1.055
เฉลี่ย	1.081	1.063	1.078	1.050	1.072

1.4 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.065	1.061	1.059	1.085	1.076
2	1.057	1.059	1.021	1.057	1.056
3	1.053	1.076	1.074	1.031	1.056
4	1.100	1.022	1.045	1.046	1.067
5	1.061	1.055	1.050	1.063	1.068
6	1.017	1.028	1.068	1.057	1.043
7	1.085	1.028	1.056	1.073	1.022
8	1.064	1.029	1.076	1.086	1.066
9	1.072	1.007	1.033	1.069	1.073
10	1.040	1.061	1.055	1.074	1.043
11	1.034	1.057	1.053	1.029	1.063
12	1.075	1.056	1.077	1.058	1.070
13	1.054	1.046	1.091	1.044	1.058
14	1.071	1.016	1.066	1.072	1.089
15	1.042	1.070	1.069	1.070	1.026
16	1.079	1.077	1.063	1.060	1.036
17	1.039	1.068	1.076	1.058	1.076
18	1.051	1.069	1.058	1.072	1.046
19	1.091	1.048	1.044	1.088	1.037
20	1.042	1.021	1.066	1.071	1.170
เฉลี่ย	1.060	1.048	1.060	1.063	1.062

2. ขนาดช่องเปิดของแร่ 0.5 มิลลิเมตร

2.1 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.075	1.053	1.079	1.077	1.071
2	1.071	1.063	1.054	1.085	1.078
3	1.078	1.072	1.072	1.142	1.045
4	1.050	1.055	1.065	1.052	1.061
5	1.099	1.044	1.103	1.094	1.065
6	1.053	1.071	1.042	1.072	1.053
7	1.047	1.049	1.081	1.082	1.092
8	1.081	1.033	1.060	1.094	1.055
9	1.108	1.094	1.058	1.104	1.067
10	1.038	1.112	1.106	1.176	1.124
11	1.064	1.107	1.067	1.062	1.045
12	1.043	1.030	1.073	1.104	1.074
13	1.068	1.071	1.057	1.050	1.046
14	1.073	1.064	1.083	1.075	1.075
15	1.073	1.115	1.061	1.038	1.041
16	1.075	1.091	1.076	1.064	1.112
17	1.066	1.063	1.030	1.154	1.073
18	1.083	1.063	1.093	1.065	1.085
19	1.087	1.085	1.080	1.064	1.082
20	1.054	1.072	1.074	1.096	1.046
เฉลี่ย	1.069	1.070	1.071	1.088	1.070

2.2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.018	1.089	1.047	1.110	1.026
2	1.025	1.081	1.076	1.064	1.116
3	1.014	1.014	1.062	1.086	1.043
4	1.032	1.083	1.033	1.041	1.081
5	1.081	1.030	1.012	1.044	1.018
6	1.021	1.074	1.044	1.043	1.057
7	1.021	1.093	1.075	1.074	1.026
8	1.023	1.059	1.066	1.056	1.078
9	1.072	1.020	1.075	1.035	1.062
10	1.093	1.067	1.052	1.055	1.041
11	1.044	1.066	1.030	1.057	1.077
12	1.065	1.061	1.071	1.022	1.085
13	1.049	1.013	1.081	1.078	1.104
14	1.040	1.109	1.055	1.052	1.096
15	1.030	1.056	1.051	1.068	1.052
16	1.092	1.054	1.051	1.062	1.087
17	1.050	1.103	1.059	1.038	1.088
18	1.068	1.054	1.116	1.043	1.052
19	1.079	1.049	1.059	1.059	1.098
20	1.082	1.027	1.037	1.060	1.123
เฉลี่ย	1.050	1.060	1.058	1.057	1.071

3. ขนาดช่องเปิดของแรง 0.7 มิลลิเมตร

3.1 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.051	1.025	1.048	1.051	1.044
2	1.077	1.062	1.053	1.075	1.084
3	1.037	1.047	1.060	1.035	1.090
4	1.066	1.039	1.080	1.047	1.113
5	1.041	1.023	1.069	1.092	1.054
6	1.085	1.069	1.052	1.054	1.104
7	1.096	1.065	1.072	1.046	1.068
8	1.089	1.061	1.084	1.057	1.069
9	1.070	1.028	1.099	1.024	1.074
10	1.038	1.051	1.072	1.071	1.053
11	1.011	1.054	1.056	1.061	1.090
12	1.048	1.063	1.102	1.061	1.085
13	1.086	1.054	1.072	1.080	1.054
14	1.007	1.076	1.073	1.053	1.001
15	1.053	1.044	1.035	1.109	1.033
16	1.095	1.080	1.085	1.085	1.034
17	1.045	1.051	1.004	1.077	1.036
18	1.037	1.085	1.067	1.102	1.087
19	1.031	1.031	1.053	1.054	1.091
20	1.014	1.056	1.034	1.068	1.074
เฉลี่ย	1.054	1.053	1.064	1.065	1.067

3.2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.066	1.064	1.082	1.031	1.055
2	1.073	1.014	1.055	1.079	1.061
3	1.060	1.032	1.032	1.041	1.082
4	1.040	1.067	1.065	1.070	1.103
5	1.082	1.093	1.045	1.039	1.061
6	1.043	1.042	1.071	1.112	1.102
7	1.030	1.122	1.060	1.069	1.095
8	1.077	1.054	1.052	1.048	1.141
9	1.065	1.029	1.045	1.084	1.037
10	1.057	1.056	1.080	1.053	1.065
11	1.087	1.025	1.060	1.039	1.074
12	1.078	1.055	1.096	1.081	1.084
13	1.098	1.040	1.074	1.076	1.012
14	1.071	1.043	1.037	1.101	1.043
15	1.041	1.017	1.073	1.049	1.086
16	1.055	1.058	1.065	1.042	1.093
17	1.046	1.027	1.081	1.056	1.090
18	1.097	1.060	1.053	1.052	1.062
19	1.067	1.087	1.090	1.082	1.047
20	1.047	1.069	1.086	1.086	1.062
เฉลี่ย	1.064	1.053	1.065	1.065	1.073

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.110	1.075	1.034	1.086	1.082
2	1.053	1.063	1.062	1.092	1.095
3	1.038	1.052	1.081	1.087	1.052
4	1.100	1.047	1.065	1.097	1.143
5	1.070	1.077	1.075	1.073	1.057
6	1.059	1.081	1.073	1.070	1.020
7	1.059	1.104	1.064	1.075	1.037
8	1.062	1.065	1.076	1.056	1.049
9	1.050	1.102	1.065	1.070	1.098
10	1.069	1.057	1.067	1.064	1.085
11	1.070	1.086	1.065	1.112	1.082
12	1.080	1.092	1.063	1.088	1.114
13	1.048	1.062	1.088	1.079	1.042
14	1.099	1.082	1.068	1.095	1.100
15	1.067	1.083	1.068	1.080	1.060
16	1.077	1.049	1.052	1.099	1.055
17	1.077	1.102	1.076	1.040	1.115
18	1.061	1.048	1.075	1.068	1.075
19	1.078	1.084	1.049	1.062	1.080
20	1.106	1.043	1.139	1.129	1.114
เฉลี่ย	1.072	1.073	1.070	1.081	1.078

3.4 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.037	1.094	1.055	1.079	1.080
2	1.075	1.049	1.057	1.055	1.089
3	1.051	1.039	1.070	1.043	1.014
4	1.063	1.079	1.040	1.045	1.089
5	1.075	1.031	1.053	1.088	1.078
6	1.053	1.044	1.079	1.075	1.046
7	1.061	1.071	1.073	1.043	1.118
8	1.076	1.050	1.084	1.089	1.083
9	1.030	1.037	1.041	1.048	1.059
10	1.036	1.032	1.059	1.100	1.091
11	1.069	1.038	1.055	1.044	1.065
12	1.053	1.076	1.039	1.044	1.041
13	1.038	1.056	1.076	1.117	1.052
14	1.108	1.037	1.030	1.053	1.036
15	1.055	1.013	1.083	1.029	1.086
16	1.110	1.088	1.057	1.077	1.042
17	1.035	1.059	1.023	1.053	1.053
18	1.049	1.061	1.097	1.036	1.083
19	1.070	1.060	1.049	1.015	1.051
20	1.060	1.038	1.003	1.028	1.091
เฉลี่ย	1.060	1.053	1.056	1.058	1.067

4. ขนาดช่องเปิดของแรง 1.0 มิลลิเมตร

4.1 อัตราการบ่อนวัตถุติบ 114 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.061	1.070	1.091	1.070	1.113
2	1.054	1.075	1.072	1.097	1.044
3	1.084	1.057	1.069	1.058	1.051
4	1.074	1.065	1.079	1.100	1.078
5	1.070	1.095	1.072	1.088	1.110
6	1.093	1.035	1.054	1.092	1.043
7	1.136	1.085	1.011	1.085	1.075
8	1.073	1.051	1.074	1.079	1.080
9	1.071	1.052	1.101	1.068	1.081
10	1.053	1.108	1.063	1.059	1.048
11	1.064	1.120	1.073	1.049	1.092
12	1.045	1.089	1.053	1.066	1.020
13	1.080	1.110	1.059	1.080	1.065
14	1.083	1.089	1.064	1.071	1.101
15	1.056	1.050	1.071	1.078	1.091
16	1.033	1.077	1.075	1.069	1.057
17	1.086	1.053	1.110	1.055	1.057
18	1.076	1.054	1.085	1.082	1.116
19	1.057	1.069	1.024	1.052	1.066
20	1.060	1.053	1.055	1.078	1.073
เฉลี่ย	1.070	1.073	1.068	1.074	1.073

4.2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 164 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)				
	180-250	106-180	75-106	45-75	0-45
1	1.036	1.054	1.061	1.058	1.074
2	1.048	1.070	1.115	1.040	1.057
3	1.075	1.053	1.069	1.057	1.108
4	1.057	1.080	1.048	1.065	1.083
5	1.037	1.061	1.122	1.113	1.108
6	1.050	1.056	1.122	1.067	1.057
7	1.070	1.057	1.068	1.087	1.091
8	1.037	1.059	1.059	1.041	1.127
9	1.047	1.071	1.064	1.104	1.070
10	1.069	1.050	1.019	1.087	1.072
11	1.059	1.157	1.036	1.055	1.058
12	1.052	1.051	1.067	1.090	1.112
13	1.050	1.042	1.117	1.041	1.054
14	1.118	1.059	1.072	1.061	1.065
15	1.083	1.061	1.039	1.077	1.068
16	1.107	1.064	1.060	1.066	1.068
17	1.058	1.058	1.057	1.071	1.051
18	1.072	1.076	1.067	1.060	1.076
19	1.100	1.058	1.076	1.067	1.067
20	1.080	1.114	1.074	1.144	1.048
เฉลี่ย	1.065	1.068	1.071	1.073	1.076

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เครื่องบดแบบฟันขบใช้เพิ่มขึ้นจากขณะที่เครื่องบดทำงานโดยไม่
ได้มีการป้อนวัตถุดิบ

ขนาดช่องเปิด (mm.)	0.3	0.5	0.7	1
อัตราการป้อน (kg./hr.)				
12	0.1	0.05	0.05	0.01
63	0.55	0.45	0.3	0.25
114	1.2	0.6	0.60	0.6
164	1.3	1	0.8	0.60

ง. 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสภาวะการบดต่างๆ

ขนาดช่องเปิด (mm.)	0.3	0.5	0.7	1
อัตราการป้อน (kg./hr.)				
12	1.95	2.01	2.18	2.35
63	2.12	2.10	2.24	2.37
114	2.09	2.31	2.28	2.37
164	2.01	2.21	2.33	2.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. 6 ข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาค JIS POWDER จากวิธีการวิเคราะห์ภาพ

1) JIS POWDER I No.5

Equivalent circle diameter

ขนาด	จำนวน	% จำนวน
0-1	26	3.25
1-2	69	8.63
2-3	117	14.63
3-4	142	17.75
4-5	113	14.13
5-6	99	12.38
6-7	64	8.00
7-8	42	5.25
8-9	37	4.63
9-10	23	2.88
10-11	12	1.50
11-12	18	2.25
12-14	13	1.63
14-18	13	1.63
18-22	4	0.50
22-30	4	0.50
30-40	3	0.38
40-50	1	0.13
รวม	800	100.00

Feret diameter

ขนาด	จำนวน	% จำนวน
0-1	21	2.63
1-2	68	8.50
2-3	104	13.00
3-4	133	16.63
4-5	147	18.38
5-6	97	12.13
6-7	71	8.88
7-8	44	5.50
8-9	35	4.38
9-10	16	2.00
10-11	10	1.25
11-12	15	1.88
12-14	14	1.75
14-18	12	1.50
18-22	5	0.63
22-30	4	0.50
30-40	3	0.38
40-50	1	0.13
รวม	800	100.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) JIS POWDER II No.4

Equivalent circle diameter

	n	% number
0-1	0	0.00
1-2	1	0.15
2-3	1	0.15
3-4	8	1.16
4-5	8	1.16
5-6	10	1.46
6-7	14	2.04
7-8	5	0.73
8-9	5	0.73
9-10	3	0.44
10-11	4	0.58
11-12	5	0.73
12-14	6	0.87
14-18	89	12.95
18-22	266	38.72
22-30	240	34.93
30-40	19	2.77
40-50	3	0.44
รวม	687	100.00

Ferret diameter

	n	% number
0-1	0	0.00
1-2	1	0.15
2-3	2	0.29
3-4	8	1.16
4-5	12	1.75
5-6	9	1.31
6-7	8	1.16
7-8	6	0.87
8-9	2	0.29
9-10	4	0.58
10-11	4	0.58
11-12	4	0.58
12-14	11	1.60
14-18	93	13.54
18-22	176	25.62
22-30	264	38.43
30-40	72	10.48
40-50	9	1.31
50-60	2	0.29
รวม	687	100.00



ภาคผนวก จ

การเปลี่ยนค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบบจำนวนเป็นฐานให้เป็น
ขนาดของอนุภาคแบบมวลเป็นฐาน และการหาค่าคงที่การปรับแก้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ.1 การเปลี่ยนค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบบจำนวนเป็นฐานให้เป็นขนาดของอนุภาคแบบมวลเป็นฐาน

การเปลี่ยนค่าการกระจายขนาดอนุภาคจากแบบที่มีจำนวนเป็นฐานให้เป็นค่าการกระจายขนาดของอนุภาคแบบที่มีมวลเป็นฐาน ที่ขนาดของอนุภาคหนึ่งๆ สามารถทำได้โดยอาศัยสมการที่ จ.1 ดังนี้

$$g_i = \frac{n_i d_{pi}^3 \rho_p}{\sum_{i=1}^n n_i d_{pi}^3 \rho_p} \quad (จ.1)$$

โดย g_i คือ สัดส่วนมวลของอนุภาค (%) n_i คือ จำนวนของอนุภาค
 d_{pi} คือ ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร) ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าการกระจายขนาดของอนุภาค JIS TEST POWDER II No.4 จากการวัดขนาดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางแบบเฟอเรท

ขนาด	d_{pi}	n_i	$n_i d_{pi}^3$	g_i
0-1	0.5	0	0	0.00
1-2	1.5	1	3.38	0.00
2-3	2.5	2	31.25	0.00
3-4	3.5	8	343.00	0.00
4-5	4.5	12	1093.50	0.01
5-6	5.5	9	1497.38	0.01
6-7	6.5	8	2197.00	0.02
7-8	7.5	6	2531.25	0.02
8-9	8.5	2	1228.25	0.01
9-10	9.5	4	3429.50	0.03
10-11	10.5	4	4630.50	0.04
11-12	11.5	4	6083.50	0.06
12-14	13	11	24167.00	0.23
14-18	16	93	380928.00	3.55
18-22	20	176	1408000.00	13.14
22-30	26	264	4640064.00	43.30
30-40	35	72	3087000.00	28.81
40-50	45	9	820125.00	7.65
50-60	55	2	332750.00	3.11
รวม		687	10716102.50	100.00

๑.2 วิธีการหาค่าคงที่การปรับแก้ในการปรับแก้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยวิธีการลองผิดลองถูก

1. กำหนดค่าคงที่การปรับแก้ขึ้นมาหนึ่งค่า
2. นำค่าที่กำหนดขึ้นมาคูณกับปริมาตรของอนุภาคที่อาศัยสมมติฐานว่าเป็นทรงกลมจะได้ปริมาตรของอนุภาคหลังจากการปรับแก้ ดังนี้

$$\text{ปริมาตรของอนุภาคหลังจากการปรับแก้} = \text{ค่าคงที่การปรับแก้} \times \pi d_{pi}^3 / 6$$

3. นำปริมาตรของอนุภาคภายหลังจากการปรับแก้มาหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหม่ (d_{pni}) โดยอาศัยสมมติฐานว่าอนุภาคที่ได้ภายหลังจากการปรับแก้เป็นทรงกลมเช่นกัน ดังนี้

$$d_{pni} = (\text{ปริมาตรของอนุภาคหลังจากการปรับแก้} \times 6/\pi)^{1/3}$$

4. นำค่า d_{pni} ที่ได้มาแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง d_{pni} กับ g_i (ดูวิธีในหัวข้อ ๑.1) และเปรียบเทียบลักษณะของกราฟที่ได้กับลักษณะของกราฟที่ได้จากเอกสารอ้างอิง
5. ถ้าลักษณะของกราฟที่ได้ในข้อ 4 ยังไม่ใกล้เคียงกับลักษณะของกราฟที่ได้จากเอกสารอ้างอิงให้ทำการปรับเพิ่มหรือลดค่าคงที่การปรับแก้ แล้วทำซ้ำข้อ 2 ถึง 4 จนกระทั่งได้กราฟที่มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะของกราฟที่ได้จากเอกสารอ้างอิง

ประวัติผู้เขียน

นายเกษม สัตยวภูฒิพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2517 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดสุทธิวราราม สำเร็จการศึกษาในระดับอุดมศึกษาจาก คณะอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีพ.ศ. 2538 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพ.ศ. 2540 และสำเร็จการศึกษาในปีพ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย