ผลของขนาดใบกวนต่อการแขวนลอยของอนุภาค

นางสาววรินทร์ บุญแม้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF PROPELLER SIZE ON PARTICULATE SUSPENSION

Miss.Warin Boonman

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของขนาดใบกวนต่อการแขวนลอยของอนุภาค
โดย	นางสาววรินทร์ บุญแม้น
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรินทร์ บุญแม้น : ผลของขนาดใบกวนต่อการแขวนลอยของอนุภาค (EFFECT OF PROPELLER SIZE ON PARTICULATE SUSPENSION) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร.วิทย์ สุนทรนันท์, 51 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของขนาดใบกวนที่มีผลต่อการแขวนลอยของอนุภาคของแข็งในของเหลว โดยใช้ถังผสมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เมตร สูง 0.5 เมตร ซึ่งติดแผ่นกั้น 4 อัน และปรับเปลี่ยนใบกวน 3 ขนาด คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังเท่ากับ 0.33, 0.50 และ 0.67 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคที่แขวนลอยมีความสม่ำเสมอมากขึ้น แต่มิได้หมายความว่าสัดส่วนของอนุภาคที่แขวนลอยต่ออนุภาคทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้เป็นผลจากการเกิด dead zone บริเวณก้นถัง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ประกอบด้วย ความสูงของใบกวนจากก้นถัง (อัตราส่วนระหว่างความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังเท่ากับ 0.17, 0.25 และ 0.33) ความเร็วรอบ (100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที) ความเข้มข้นของอนุภาค (ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และขนาดของอนุภาค (75-150 และ 180-300 ไมครอน) ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของการสูญเสียพลังงานในของไหลจาก Secondary flow อัตราการจ่ายพลังงานของใบกวน โอกาสของอนุภาคที่จมอยู่ที่ก้นถังที่จะได้รับการถ่ายเทโมเมนตัมจากการไหลและเกิดการแขวนลอย และอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำจากของไหลต่อแรงโน้มถ่วง ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต วรินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

4770440721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: PROPELLER / SUSPENSION / AGITATED VESSELS / SOLID-LIQUID SYSTEM / MIXING.

WARIN BOONMAN : EFFECT OF PROPELLER SIZE ON PARTICULATE SUSPENSION. THESIS ADVISOR : DR.WIT SOONTARANUN, Ph.D., 51 pp.

The effect of propeller size on particulate suspension was investigated using a baffled mixing tank of 0.3 m diameter and 0.5 m height. Three propeller sizes corresponding to the ratios between propeller diameter and tank diameter of 0.33, 0.50, and 0.67 were used. It was found that an increase of propeller diameter enhanced the uniformity of suspension, but not the fraction of solid suspension due to an occurrence of dead zone at the bottom of the tank. In addition, the investigations were further conducted by varying the vertical position of propeller (corresponding to the ratios of propeller height to tank diameter of 0.17, 0.25, and 0.33), agitation speed (100, 150, 200, and 250 rpm), solid concentration (2.5%, 5%, and 7.5% w/v), and particle size (75-150 μm and 180-300 μm). The results indicated the importance of energy dissipated due to secondary flow, rate of energy supplied by propeller, potential for sediments in gaining momentum from fluid and being suspended, and relativity between drag force and gravity.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Engineering Student's signature

Concentration Chemical Engineering Advisor's signature

Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบคุณคุณปรัชญา นวลพลับ จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือและให้คำแนะนำในการสร้างชุดทดลอง

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ห้องปฏิบัติการวิจัยชีวเคมีที่ให้คำแนะนำจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย) ..... ง

บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 การผสม 4

2.1.1 การผสมของเหลวกับของแข็ง 4

2.1.2 การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่ถูกปั่นกวนในของเหลว 4

2.1.3 การเก็บตัวอย่างและหาความเข้มข้น 5

2.1.4 ตำแหน่งความสูงที่เหมาะสมของใบพัดจากก้นถัง 5

2.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสม 5

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

บทที่ 3 อุปกรณ์เครื่องมือและการดำเนินการวิจัย 15

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 15

3.2 การเก็บตัวอย่าง 16

3.3 วิธีทดลอง 17

3.3.1 ศึกษารูปแบบการไหลภายในระบบถังกวน 17

3.3.2 ศึกษาการกระจายอนุภาคภายในระบบถังกวน 17

3.3.2.1 ศึกษาผลของขนาดใบกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค 17

หน้า

3.3.2.2 ศึกษาผลของความสูงใบกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค 18
3.3.2.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค 18
3.3.2.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมในถังกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค 19
3.3.2.5 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค 20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 21
4.1 ศึกษารูปแบบการไหลภายในระบบถังกวน 21
4.1.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน 21
4.1.2 ผลของระยะความสูงของใบกวนจากก้นถัง 23
4.1.3 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวน 25
4.2 ศึกษาการกระจายอนุภาคภายในระบบถังกวน 28
4.2.1 ผลการทดลองในสภาวะที่ใบกวนมีขนาดต่างกัน 28
4.2.2 ผลการทดลองในสภาวะที่ความสูงของใบกวนแตกต่างกัน 31
4.2.3 ผลการทดลองในสภาวะที่ความเร็วรอบของใบกวนต่างกัน 33
4.2.4 ผลการทดลองในสภาวะที่ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมในถังกวนต่างกัน 35
4.2.5 ผลการทดลองในสภาวะที่ขนาดอนุภาคมีขนาดต่างกัน 37
บทที่ 5 สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ 40
5.1 สรุปการทดลอง 40
5.2 ข้อเสนอแนะ 41
รายการอ้างอิง 42
ภาคผนวก 44
ภาคผนวก ก 45
ภาคผนวก ข 47
ภาคผนวก ค 48
ภาคผนวก ง 50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1-1	ใบกวนที่ใช้ในการทดลอง	2
1-2	องค์ประกอบต่าง ๆ ของถังผสม	3
2-1	องค์ประกอบของถังกวน แผ่นกั้น และใบกวน	6
2-2	ลักษณะใบกวนแบบ Propeller	7
2-3	ลักษณะใบกวนแบบ Turbine	7
2-4	ลักษณะใบกวนแบบ Paddle	8
2-5	ลักษณะใบกวนแบบ Anchor	8
2-6	ลักษณะใบกวนแบบ Helical ribbon	9
2-7	ลักษณะใบกวนแบบ Helical screw	9
2-8	ลักษณะการไหลตามแนวแกนในถังกวน Downward	10
2-9	ลักษณะการไหลตามแนวรัศมีในถังกวน	10
2-10	องค์ประกอบต่างๆ ของถังผสม	12
2-11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบวิกฤต (N_c) กับความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถัง (C/T)	13
3-1	ลักษณะของหลอดเก็บตัวอย่าง	16
3-2	ทิศทางต่าง ๆ ในการเก็บตัวอย่าง	16
4-1	ภาพและลักษณะการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวน โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที C/T=0.17 :	22
4-2	แรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดใบกวนต่าง ๆ	23
4-3	ภาพและลักษณะการการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวนโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที	24
4-4	ลักษณะการไหลวนแบบ Secondary flow	25
4-5	ภาพและลักษณะการการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวนโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ใบกวนติดตั้งสูงจากก้นถัง C/T=0.17	26
4-6	แรงบิดของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ	27

ภาพ **หน้า**

4-7 ผลของขนาดใบกวนต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่างๆ ของถัง โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน และ C/T=0.17 29

4-8 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดใบกวนต่าง ๆ 29

4-9 Dead zone บริเวณใต้ใบกวน 30

4-10 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเมื่อปั่นกวนด้วยใบกวนขนาดต่าง ๆ 30

4-11 ผลของความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่างๆ ของถัง โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน และใบกวนขนาด D/T=0.67 31

4-12 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่สัดส่วนความสูงของใบกวนจากก้นถังก้นถัง 32

4-13 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเมื่อปั่นกวนด้วยสัดส่วนความสูงต่าง ๆ ของใบกวนจากก้นถัง 32

4-14 ผลของความเร็วรอบต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่างๆ ของถัง ซึ่งใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ความเข้มข้น 5%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 33

4-15 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อสัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ 34

4-16 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับความเร็วรอบในการปั่นกวน 34

4-17 ผลของความเข้มข้นโดยรวมต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่างๆ ของถัง ซึ่งใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน ใบกวนขนาดD/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 35

4-18 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์กับปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคในถังกวน 36

4-19 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคในถังกวน 36

4-20 ผลของขนาดอนุภาคต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่างๆ ของถัง

ภาพ **หน้า**

ซึ่งใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใบกวน ขนาด D/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 38
4-21 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ 39
4-22 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันของความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับขนาดอนุภาค 39
ผ-1 ถังกวน 45
ผ-2 ขอบเขตการหาปริมาตรในแต่ละส่วนของถังกวน 48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค
C	ระยะความสูงที่ติดตั้งใบกวนจากก้นถัง
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุ
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์ใบกวน
F_D	แรงลาก
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
h	ความสูงระดับน้ำที่เก็บตัวอย่าง
H	ระดับน้ำในถังเก็บตัวอย่าง
T	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง
v	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและอนุภาค
V	ปริมาตรของอนุภาค
W	น้ำหนักของอนุภาค
ρ_l	ความหนาแน่นของของไหล
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การผสมสารเป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง เครื่องสำอาง สบู่ ผงซักฟอก ปูนซีเมนต์ ยา อาหาร กระดาษ การหมัก การกำจัดน้ำเสีย และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เป็นต้น (Skelland, 1999) ซึ่งรูปแบบการผสมจะแตกต่างกันออกไปทั้งการผสมแบบเป็นเนื้อเดียวกัน และแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน กระบวนการผสมของแข็งกับของเหลว (solid-liquid system) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการผสมที่พบมากในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งปัญหาที่พบบ่อย คือ ใบกวนไม่สามารถทำให้อนุภาคของแข็งลอยขึ้นมาผสมกับของเหลวที่ส่วนบนของถังได้ดีพอ เนื่องจากอนุภาคของแข็งนั้นโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวทำให้อนุภาคของแข็งตกลงไปอยู่ที่ก้นถัง เช่น ในอุตสาหกรรมที่ทำเกี่ยวกับพอลิเมอร์จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่เข้าไปในถังเพื่อทำให้โมโนเมอร์จับตัวเป็นพอลิเมอร์ได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ไปจะตกไปอยู่ที่ก้นถังและเมื่อทำการปั่นกวนแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ไปไม่สามารถลอยขึ้นมาถึงส่วนบนของถังได้ ทำให้โมโนเมอร์ที่อยู่ส่วนบนของถังจับตัวเป็นพอลิเมอร์ได้น้อย ด้วยเหตุนี้จึงได้แนวคิดในการทำงานวิจัยนี้ซึ่งจะศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาคด้วยการปั่นกวน โดยพิจารณาขนาดใบกวน ระดับความสูงของใบกวนจากก้นถังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความเร็วรอบ ความเข้มข้นของอนุภาค และขนาดของอนุภาคของแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 จุดประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนที่มีผลต่อการแขวนลอยของอนุภาคในของเหลว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

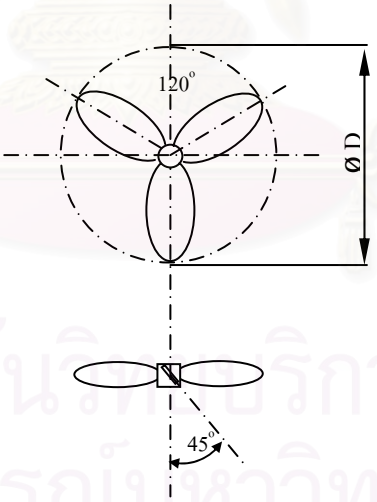
1. ใช้ใบกวนดังรูปที่ 1-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง (D/T) คือ 0.33, 0.50 และ 0.67 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายดังรูปที่ 1-2

2. ระดับความสูงของใบกวนจากก้นถัง 5, 7.5 และ 10 เซนติเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความสูงจากก้นถังต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถัง (C/T) คือ 0.17, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายดังรูปที่ 1-2

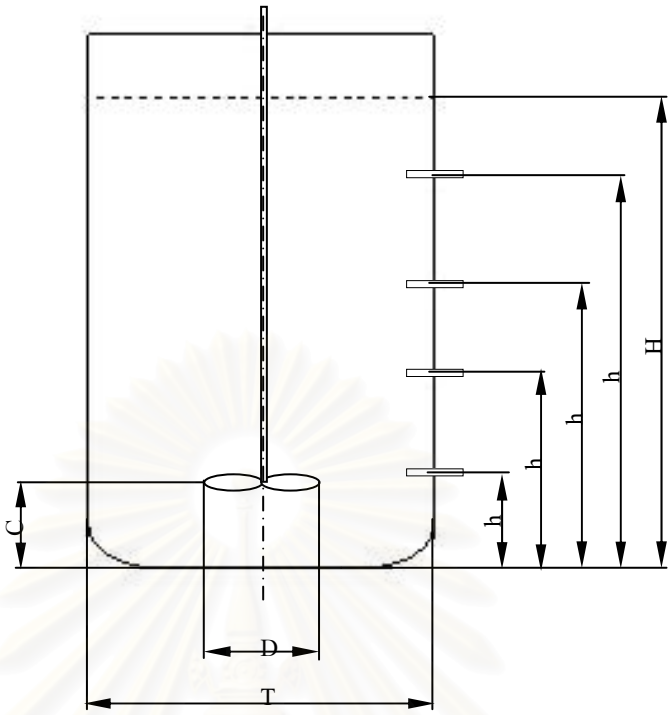
3. ความเร็วรอบของการปั่นกวนคือ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที

4. ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง 2.5, 5 และ 7.5 %โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

5. อนุภาคใช้ 2 ขนาด คือ ขนาด 75-150 และ 180-300 ไมครอน ซึ่งมีความหนาแน่น 2509 kg/m^3 และ 2574 kg/m^3 ตามลำดับ



รูปที่ 1-1 ใบกวนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1-2 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถังผสม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการผสมระหว่างของเหลวและอนุภาคของแข็ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาความสามารถและข้อจำกัดของเครื่องมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง และศึกษาถึงวิธีวัดค่าความเข้มข้น การเก็บบันทึกข้อมูล และการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง

3. จัดทำใบกวนขนาดต่าง ๆ เพิ่มจากที่มีอยู่เดิม

4. ทำการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ผล

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบการปั่นกวนผสมระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคของแข็งขนาดเล็กในของเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผสม (mixing)

การผสม คือ การรวมของมากกว่าสองสิ่งเข้าไว้ในระบบเดียวกันโดยไม่จำกัดส่วนผสม และมีเงื่อนไขว่าการกระจายตัวของแต่ละองค์ประกอบในของผสมที่ได้จะต้องมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ

2.1.1 การผสมของเหลวกับของแข็ง (Liquid-solid mixing)

การผสมประเภทนี้มีสองลักษณะใหญ่ ๆ (Harnby, 1985) คือ

- การปั่นกวนอนุภาคของแข็งให้กระจายตัวในของเหลวเพื่อให้ของแข็งได้สัมผัสกับของเหลวอย่างทั่วถึง โดยเมื่อยุติการกวนของแข็งจะแยกตัวออกจากของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของแข็งและของเหลวดังกล่าว
- การปั่นกวนอนุภาคของแข็งขนาดเล็กกระจายตัวในลักษณะที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ซึ่งพบได้สำหรับทั้งของเหลวที่มีความหนืดต่ำ เช่น นมผงที่แขวนลอยในน้ำและของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น ผงคาร์บอนแบล็กที่กระจายตัวอยู่ในยางรถยนต์

2.1.2 การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่ถูกปั่นกวนในของเหลว (Suspension of solid particles Agitated Liquid)

การพิจารณาการแขวนลอยและการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในของเหลว ส่วนใหญ่แล้วจะพิจารณาการแขวนลอยใน 2 หลักการ คือ (Nagata, 1975)

- พิจารณาความเร็วรอบที่จะทำให้อนุภาคทั้งหมดเกิดการแขวนลอย โดยจะพิจารณาความเร็วรอบต่ำสุดที่ทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอย (N_{js}) หรือใช้พลังงานที่น้อยที่สุดนั่นเอง
- พิจารณาความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ในถังของของผสม โดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างจากถังผสม

2.1.3 การเก็บตัวอย่างและหาความเข้มข้น

ในการวิจัยจะพิจารณาในเรื่องของความเข้มข้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของการผสม การวัดความเข้มข้นของอนุภาคของของผสมในถังที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ (Harnby, 1985)

- วัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยอาศัยคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของของเหลวที่ใช้ในการผสม ซึ่งเมื่อมีอนุภาคผสมอยู่ในของเหลวค่าการนำไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นในตำแหน่งนั้น ๆ อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวด้วย จึงต้องมีการ Calibration ก่อนที่จะทำการวัดความเข้มข้น
- เก็บตัวอย่างโดยดึงตัวอย่างออกจากถัง ซึ่งการเก็บตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งโดยปกติแล้วจะใช้หลอดเก็บตัวอย่าง (Sample tube หรือ Grab) (Oldshue, 1983) และในการวิจัยนี้ก็เลือกใช้การเก็บตัวอย่างโดยใช้หลอดเก็บตัวอย่างเช่นกัน แต่ทิศทางและรูปแบบการไหลของอนุภาคในถังจะไม่คงตัว (Unsteady) และไม่แน่นอน ทำให้ผลที่ได้นั้นไม่ชัดเจน ดังนั้นในการเก็บตัวอย่างจึงเลือกใช้หลอดเก็บตัวอย่างงอ 90 องศา และหันเก็บตัวอย่าง 4 ทิศทาง

2.1.4 ตำแหน่งความสูงที่เหมาะสมของใบกวนจากก้นถัง (Impeller location)

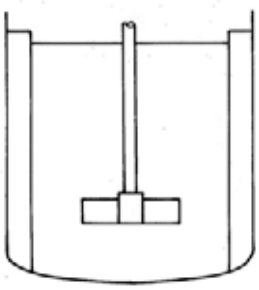
จากทฤษฎีการทำให้เกิดการแขวนลอยได้ดี ตำแหน่งของใบกวนควรจะอยู่สูงจากก้นถังเท่ากับ 1/3 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง แต่ในความเป็นจริงแล้วอัตราส่วนความสูงจากก้นถังจะสูงกว่า หรือต่ำกว่า 1/3 ก็ได้ ขึ้นอยู่กับกระบวนการของระบบว่าต้องการจัดให้ระบบเป็นเช่นไร (Oldshue, 1983)

2.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสม

อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการผสมของเหลวมีความแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบของการผสม เช่น Mechanically agitated vessel, Jet mixer, In-line static mixer, In-line dynamic mixer, Dispersion mill, Extruder Homogenizer (Oldshue, 1983) โดยในวิทยานิพนธ์จะใช้อุปกรณ์ผสมแบบ Mechanically agitated vessel

Mechanically agitated vessel

อุปกรณ์ผสมชนิดนี้รู้จักกันทั่วไปว่าถังกวนหรือถังผสม จะใช้ในการผสมของเหลวที่มีความหนืดต่ำเป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบหลัก ๆ ของอุปกรณ์ ได้แก่ ถังกวน (Vessel) แผ่นกั้น (Baffle) และใบกวน (Propeller) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2-1 องค์ประกอบของถังกวน แผ่นกั้น และใบกวน (Harnby, 1985)

ก. ถังกวน

รูปร่างของถังส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกระบอกและทำด้วยวัสดุโปร่งแสงเพื่อให้สามารถมองเห็นภายในได้ บางครั้งอาจพบถังรูปสี่เหลี่ยมบ้างสำหรับงานที่ต้องการความจุมากแต่ต้นทุนสร้างต่ำ ส่วนก้นของถังอาจแบนเรียบ หรือโค้งมนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในหลาย ๆ กรณีผิวด้านข้างอาจหุ้มเป็นสองชั้น (Jacket for heat transfer) เพื่อวัตถุประสงค์ของการรักษาระดับอุณหภูมิของของเหลวภายในถัง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ถังก้นแบนและลบมุมให้โค้งมนเพื่อป้องกันอนุภาคไปติดค้างอยู่ที่มุมก้นถัง

ข. แผ่นกั้น

เป็นส่วนประกอบภายในถัง จะถูกติดตั้งไว้ที่ผนังด้านในของถัง โดยมีลักษณะเป็นแถบตั้งตรงตามแนวดิ่งและยื่นออกสู่ศูนย์กลางถัง เป็นระยะประมาณหนึ่งในสิบถึงหนึ่งในสิบสองของเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นกั้นนี้จะช่วยป้องกันการเกิด Vortex ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในการกวนของไหลที่มีความหนืดต่ำและของเหลวที่มีพฤติกรรมแบบ Newtonian ในขณะที่ของไหลที่มีความหนืดสูงและประเภท Non–newtonian จะไม่พบปัญหาของ Vortex จึงไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นกั้น ผลเสียที่เกิดขึ้นจาก Vortex เช่น ในระบบที่เป็นของแข็งกับของไหล การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากอิทธิผลของแรงหนีศูนย์กลางทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีมาก ณ บริเวณผนังของถังกวน ในกรณีการผสมก๊าซกับของเหลว ช่องอากาศตรงกลางของถังกวนซึ่งเกิดจาก Vortex จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผสมของก๊าซลดลง

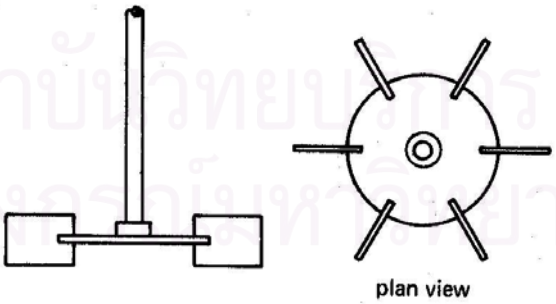
ค. ใบกวน

ใบกวนมีด้วยกันหลายแบบตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งหากแบ่งตามความหนืดของของไหลที่ใช้งานจากน้อยไปมากดังนี้ Propeller, Turbine, Paddle, Anchor, Helical ribbon และ Helical screw โดยความเร็วในการปั่นกวนจะลดลงตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับความหนืด

- Propeller เป็นใบกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในแนวแกน (Axial flow) มีประสิทธิภาพสูงเมื่อกวนที่ความเร็วสูง ใช้งานได้ดีในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ที่นิยมใช้คือใบกวนแบบสมอเรือ 3 ใบกวน ข้อดีของการใช้ใบกวนชนิดนี้ คือ ใช้งานง่าย อายุการใช้งานนาน ราคาค่อนข้างถูก ประหยัดพลังงาน บำรุงรักษาง่าย ส่วนข้อเสีย คือ ใช้ไม่ได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

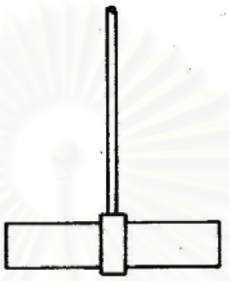
รูปที่ 2-2 ลักษณะใบกวนแบบ Propeller (Harnby, 1985)

- Turbine เป็นใบกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในแนวรัศมี ความเร็วในการกวนจะช้ากว่า Propeller สามารถใช้ได้กับของเหลวทุกชนิด ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด คือ Flat blade turbine และ Pitch blade turbine เนื่องจากออกแบบง่ายราคาไม่แพงนัก สามารถใช้ได้กับของเหลวเกือบทุกชนิด มีแรงเฉือนสูงจึงเหมาะใช้สำหรับกวนของเหลวในกระบวนการอิมัลชัน (emulsion) ข้อดีของการใช้ใบกวนชนิดนี้ คือ ใช้งานง่าย อายุการใช้งานนาน ราคาค่อนข้างถูก บำรุงรักษาง่าย ส่วนข้อเสีย คือ ใช้พลังงานสูงและใช้ได้เฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ



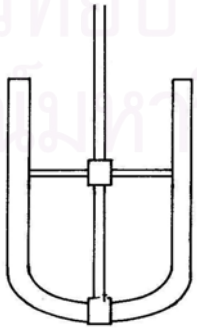
รูปที่ 2-3 ลักษณะใบกวนแบบ Turbine (Harnby, 1985)

- Paddle เป็นใบกวนที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลในแนวแกนและแนวรัศมี ซึ่งใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยปกติจะประกอบด้วยใบกวน 2 ใบ ใช้งานในช่วงการไหลแบบราบเรียบไปยังการไหลแบบปั่นป่วน โดยไม่ใช้แผ่นกั้น และใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง ข้อดีของการใช้ใบกวนชนิดนี้ คือ ใช้งานง่าย อายุการใช้งานนาน ราคาค่อนข้างถูก บำรุงรักษาง่าย ส่วนข้อเสีย คือ ที่ความหนืดสูง ๆ จะต้องใช้พลังงานสูง



รูปที่ 2-4 ลักษณะใบกวนแบบ Paddle (Harnby, 1985)

- Anchor เป็นใบกวนที่ปฏิบัติการที่ความเร็วต่ำ เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางถึงความหนืดสูง มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ใช้งานได้ดีสำหรับของเหลวแบบนิวโทเนียน ความหนืด 5000-50000 เซนติพอยท์ ที่มีความหนืดมากกว่านี้จะใช้พลังงานสูงมาก ข้อดีของการใช้ใบกวนชนิดนี้ คือ ใช้งานง่าย อายุการใช้งานนาน บำรุงรักษาง่าย สามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นขณะปฏิบัติการได้ดี ส่วนข้อเสีย คือ ที่ความหนืดสูง (>50000) จะใช้พลังงานสูงมาก และใช้งานได้ในขอบเขตที่จำกัดคือ ใช้ได้ดีเฉพาะของเหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันและเป็นของเหลวแบบนิวโทเนียนเท่านั้น

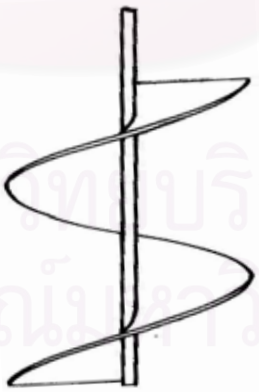


รูปที่ 2-5 ลักษณะใบกวนแบบ Anchor (Harnby, 1985)

- Helical ribbon เป็นใบกวนแบบพิเศษ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกวนของเหลวสูง ข้อดีของการใช้ใบกวนชนิดนี้ คือ ใช้งานได้ดีในของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก ๆ โดยใช้พลังงานที่ต่ำ และสามารถถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นขณะปฏิบัติการได้ดี ส่วนข้อเสีย คือ ราคาแพงมาก บำรุงรักษายาก และค่าใช้จ่ายสูง

รูปที่ 2-6 ลักษณะใบกวนแบบ Helical ribbon (Harnby, 1985)

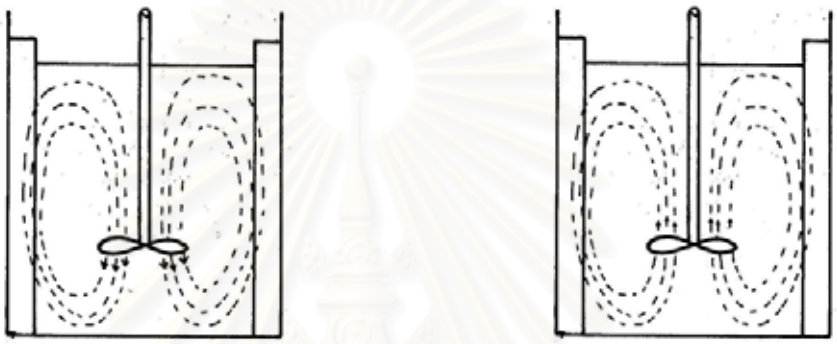
- Helical screw เป็นใบกวนกวนแบบพิเศษ ใช้ได้ทั้งถังที่มีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น เหมาะสำหรับของเหลวที่ความหนืดสูง และที่ความหนืดสูงมาก ๆ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใบกวนชนิดอื่น ๆ โดยใช้พลังงานที่ต่ำใกล้เคียงกับ Helical ribbon ส่วนข้อเสีย คือ ราคาแพง บำรุงรักษายาก และค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 2-7 ลักษณะใบกวนแบบ Helical screw (Harnby, 1985)

นอกจากนี้เรายังสามารถแบ่งชนิดของใบกวนตามลักษณะการไหลได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน (Axial-flow impeller) ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (Radial-flow impeller) (Nagata, 1975)

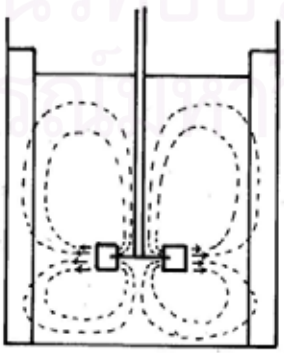
- ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน ทิศทางของของเหลวจะไหลวนไปยังก้นถังและไหลขึ้นไปยังผิวของของเหลว (Downward) ดังรูปที่ 2-8 (ก) หรือไหลวนไปยังผิวของของเหลวและไหลกลับลงไปยังก้นถัง (Upward) ดังรูปที่ 2-8 (ข) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Propeller



(ก) (ข)

รูปที่ 2-8 ลักษณะการไหลตามแนวแกนในถังกวน (ก) Downward (ข) Upward (Nagata, 1975)

- ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี โดยไหลไปตามแรงเหวี่ยงที่ออกจากขอบของใบกวนเมื่อไหลไปกระทบกับผนังถัง ของไหลจะเปลี่ยนทิศทางการไหลในสองทิศทางคือ ไหลหมุนวนขึ้นไปยังผิว และไหลหมุนวนไปยังก้นถัง ดังรูปที่ 2-9 ซึ่งส่วนใหญ่พบในใบกวนประเภท Turbine



รูปที่ 2-9 ลักษณะการไหลตามแนวรัศมีในถังกวน (Nagata, 1975)

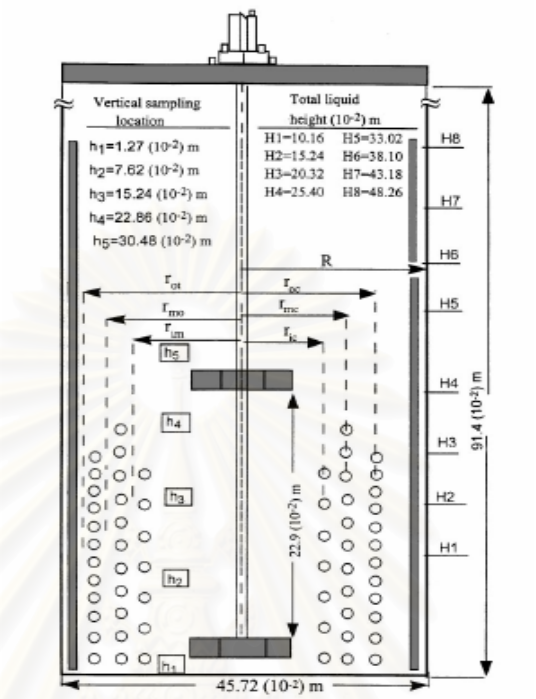
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาระบบการผสมอนุภาคของแข็งกับของเหลว (Solid-liquid system) เมื่ออนุภาคของแข็งมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลว อนุภาคของแข็งจะจมอยู่ที่ก้นภาชนะ (ซึ่งในการทดลองภาชนะที่ใช้มักจะเป็นถังทรงกระบอกและใสเพื่อให้สามารถมองเห็นภายในได้) และการที่จะทำให้อนุภาคของแข็งลอยขึ้นมาผสมกับของเหลวที่ส่วนบนของภาชนะในลักษณะแขวนลอยได้ต้องอาศัยปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ความเร็วรอบวิกฤต ระดับความสูงของใบกวนจากก้นถัง ขนาดของใบกวน ตำแหน่งของใบกวน โดยปกติการแขวนลอยจะขึ้นกับความเร็วรอบของการปั่นกวน จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อความเร็วรอบต่ำ ๆ อนุภาคมีเพียงส่วนน้อยที่ลอยขึ้นมา และเมื่อความเร็วรอบในการปั่นกวนสูงขึ้นอนุภาคของของแข็งจะลอยขึ้นมามากขึ้นซึ่งก็มีผู้ศึกษาในเรื่องนี้ด้วยเช่นกัน และ นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแขวนลอยของอนุภาค ทั้งในเรื่องของระดับความสูงของใบกวนจากก้นถัง ขนาดของใบกวน ตำแหน่งของใบกวน ดังนี้

ในปี 1986 **Buurman และคณะ** ได้ศึกษาผลของการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ของอนุภาคของแข็งในของเหลวที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง โดยศึกษาถึงความเร็วรอบวิกฤตที่ทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ ในการทดลองใช้ถังขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.48 เมตร และขยายขนาดถังใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เมตร (ใช้หลักการ scale up) ใบกวนที่ใช้คือ Axial turbine impeller ซึ่งทำการทดลองภายใต้สภาวะเดียวกัน แต่ใช้วิธีวัดผลดูความเข้มข้นของตัวอย่างต่างกันต่างกัน ถังใหญ่ใช้วิธีเก็บตัวอย่างโดยวิธี gravity คือ เก็บตัวอย่างโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งพฤติกรรมของของเหลวจะไหลจากที่สูงลงมาสู่ที่ต่ำกว่าเสมอ และหาความเข้มข้นโดยการทำตัวอย่างให้แห้งและชั่งน้ำหนักหาความเข้มข้น ส่วนถังเล็กใช้วิธีตรวจวัดด้วย Ultrasonic doppler velocity meter และสรุปได้ว่าผลของความเร็วรอบวิกฤตในการทำให้เกิดการแขวนลอยสมบูรณ์นั้น ถ้าทำการขยายขนาดในช่วง 0.48 เมตร ถึง 4.26 เมตร จะแปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยกกำลังลบสองส่วนสาม ($n_c \propto D^{-2/3}$)

จากนั้นในปี 1998 **Armenante และ Nagamine** ได้ทำการศึกษาผลของความเร็วรอบวิกฤตเมื่อตำแหน่งความสูงของใบกวนจากก้นถังและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งใบกวนที่ใช้ในการทดลองคือ six-blade disc turbines, six-blade flat-blade turbines, six-blade (45°) pitch-blade turbines และ Chemineer HE-3 impellers ผลปรากฏว่าเมื่อระยะห่างระหว่างใบกวนกับก้นถังมากขึ้น ความเร็วรอบวิกฤตที่ใช้จะมากขึ้นและพลังงานที่ใช้ก็มีแนวโน้มเดียวกันคือมากขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนที่ระดับความสูงเดียวกันพบว่า เมื่อใบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้นความเร็วรอบวิกฤตจะลดลง

ในปี 1999 **Skelland และ Hassan** ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวของอนุภาคที่ตำแหน่งรัศมีและความสูงต่าง ๆ ดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถังผสม

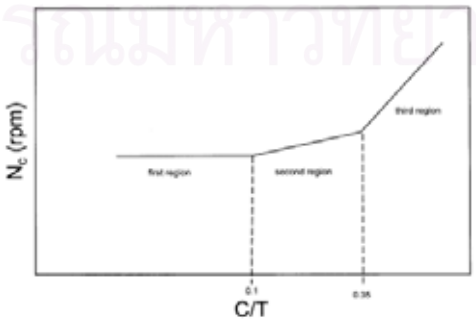
โดยมีระดับความสูงของน้ำที่ระดับ H3-H8 (ที่ระดับความสูง H1-H2 มีผลของ vortex เข้ามาเกี่ยวข้องมาก ทำให้เกิดการกระจายตัวไม่ดี) ชนิดใบกวนที่ใช้ทดลอง คือ paddle ซึ่งใช้ 2 ใบกวนบนก้านกวนเดียวกัน โดยระยะห่างระหว่างใบกวนทั้ง 2 คือ 22.86 cm และจากก้นถังกับใบกวนอันล่างห่าง 2.54 cm อนุภาคที่ใช้คือ ทราย (commercial grade sea sand) มีความหนาแน่น 2.65×10^3 kg/m^3 โดยติดตั้ง baffled 6 อัน กับ concentric cooling coils 3 อัน (inner, middle, และ outer coils) รอบถัง ผลที่ได้จากการทดลองที่ได้มีดังนี้

- ระดับของเหลวที่ใช้ทดลองมีความสูงอยู่ระหว่างระดับ H3-H8 และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการแขวนลอยอย่างสมบูรณ์ คือ 370 รอบ/นาที โดยขณะทำการทดลองติดตั้ง baffled 6 อัน กับ concentric cooling coils รอบถัง
- วัดความเข้มข้นของอนุภาคที่ความสูงต่าง ๆ ซึ่งคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยในแนวรัศมี ผลที่ได้คือ ที่ก้นถังมีความเข้มข้นของอนุภาคมากที่สุด และผิวน้ำมีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำที่สุด
- การกระจายตัวของอนุภาคที่ดีที่สุดอยู่ระหว่างใบกวน 2 ใบ (ที่ h2 ถึง h3) และมีรัศมีอยู่ไกลจากจุดศูนย์กลาง (outer regions) ของถัง

และในปีเดียวกัน **Biswas และคณะ** ได้ทำการศึกษาชนิดของใบกวน จำนวนใบของใบกวน (3 ใบ กับ 4 ใบ) มุมเอียงของใบกวน ระยะทางจากก้นถังถึงใบกวน แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของถัง โดยความหนาแน่นของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ 2.65 g/cm^3 ความเข้มข้นของอนุภาคอยู่ระหว่าง 1-30 wt% ขนาดถังที่ใช้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 10 cm และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 30 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนมีขนาด $D_i / D_T = 0.5$ (D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน และ D_T คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง) ทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25°) ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ชนิดใบกวนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ propeller (ทดลองระหว่าง propeller และ hollow pipe) เมื่อใช้ทดลองในสภาวะเดียวกัน
- ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบจำนวนใบกวน (propeller) 3 ใบ กับ 4 ใบ ปรากฏว่าใบกวนที่ทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดี คือ 3 ใบ ซึ่งทำมุม 120° ระหว่างกัน และมุมเอียงของใบกวน คือ 30° (มุมที่ทำการทดลอง คือ 15°, 30° และ 45°)
- เปรียบเทียบพลังงานเมื่อใช้ใบกวน 1 ชั้น (single stage stirrer) และ 2 ชั้น (double stage stirrer) พบว่าใบกวน 2 ชั้นจะใช้พลังงานน้อย เพราะมีกำลังในการยกอนุภาคมากกว่า แต่ไม่แนะนำให้ใช้ใบกวน 2 ชั้น ถ้าระดับของเหลวไม่สูง
- เปรียบเทียบความสูงของใบกวนจากก้นถังที่ระดับต่าง ๆ และความเร็วรอบ เมื่อความเร็วรอบมีค่าน้อย แต่ความสูงของใบกวนจากก้นถังสูง จะทำให้อนุภาคไม่กระจายตัวไปยังด้านบน และทำให้อากาศไหลเข้าไปผสมได้ด้วย

ต่อมาในปี 2003 **Sharma และ Shaikh** ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบวิกฤต (N_c) กับความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง (C/T) โดยปรับตำแหน่งความสูงของใบกวนจากก้นถัง และศึกษาความเร็วรอบวิกฤตที่ทำให้ไม่มีอนุภาคคงเหลืออยู่ที่ก้นถัง ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_c กับ C/T ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบวิกฤต (N_c) กับความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถัง (C/T)

ซึ่งผลการทดลองจากกราฟจะแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง N_c คงที่ แม้ว่า C/T จะเพิ่มขึ้นก็ตาม ส่วนที่สอง N_c เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ C/T เพิ่ม และส่วนที่สาม N_c เพิ่มขึ้นมากเมื่อ C/T เพิ่มขึ้น และในส่วนนี้รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนจาก axial flow เป็น radial flow ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ใบกวน Pitch blade turbine (PBT) เส้นผ่านศูนย์กลางถัง 15-121 cm และ D/T ตั้งแต่ 0.083 ถึง 0.625 ก้นถังทำโค้งมนเพื่อป้องกันอนุภาคไปติดที่มุม อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ glass bead จากนั้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง N_c กับเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังคงที่ พบว่า N_c ลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนเพิ่มขึ้น และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง N_c กับเส้นผ่านศูนย์กลางถัง เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนคงที่ พบว่า N_c ลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

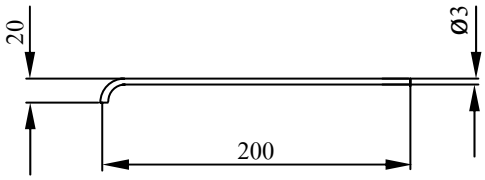
บทที่ 3

อุปกรณ์เครื่องมือและการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการเพื่อหาความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งที่ระดับความสูงต่างๆ ของถัง โดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการแขวนลอยของอนุภาคของแข็งดังนี้ เปลี่ยนขนาดใบกวน ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค ระดับความสูงของใบกวนจากก้นถัง และความเร็วรอบของการปั่นกวน ซึ่งใช้ถังกวนในระดับห้องปฏิบัติการและทำการทดลองที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ถัง : ทำจาก acrylic เป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 30 เซนติเมตร (T) และ สูง 50 เซนติเมตร เป็นถังก้นแบนและลบมุมออกให้โค้งมน
- แผ่นกั้น : เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.9 เซนติเมตร หนา 0.25 เซนติเมตร มี 4 แผ่น ติดตั้งบนผนังด้านข้างของถัง โดยมีระยะห่างตามแนวเส้นรอบวงเท่ากัน
- ใบกวน : ใช้ใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 10, 15 และ 20 เซนติเมตร (D/T=0.33, D/T=0.50 และ D/T=0.67 ตามลำดับ) ซึ่งเอียง 45° แกนของใบกวนมีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1-1
- มอเตอร์ : มีความสามารถในการสร้าง torque สูงสุด คือ 80 N.cm และความเร็วรอบต่ำสุด - สูงสุด คือ 50 - 2000 รอบต่อนาที
- อนุภาค : ใช้ glass bead 2 ขนาด คือ ขนาด 75-150 μm และ 180-300 μm ซึ่งมีความหนาแน่น คือ 2509 kg/m^3 และ 2574 kg/m^3 ตามลำดับ เป็นผลิตภัณฑ์ของจากบริษัท เอ.ไอ.เอ็ม.สยาม จำกัด
- หลอดเก็บตัวอย่าง : ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 45 มิลิเมตร ทำให้งอ 90° เพื่อเก็บตัวอย่างได้หลายทิศทางดังรูปที่ 3-1

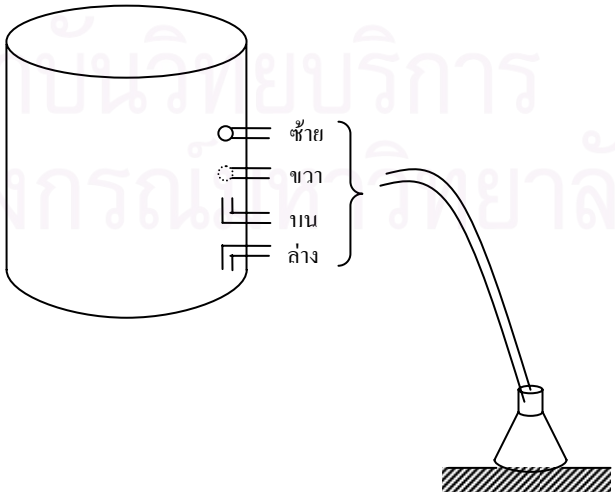


รูปที่ 3-1 ลักษณะของหลอดเก็บตัวอย่าง

- ขวดรูปชมพู่ : ขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง : ขนาด 100 มิลลิลิตร
- กล้องถ่าย VDO : เพื่อสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของเหลว
- เม็ดพลาสติก : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.79-5.89 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ (ความหนาแน่น 1032 kg/m^3)
- เครื่องชั่ง : เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแน่ง

3.2 การเก็บตัวอย่าง

ใช้หลอดเก็บตัวอย่างมีลักษณะเป็นข้องอ 90 องศา ซึ่งแต่ละตำแหน่งความสูงจะหันเก็บตัวอย่างทั้ง 4 ทิศ คือ หันซ้าย ขวา บน และล่าง วิธีเก็บตัวอย่างจะใช้เทคนิควิธี Gravitation flow คือ เก็บตัวอย่างโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งพฤติกรรมของของเหลวจะไหลจากที่สูงลงมาสู่ที่ต่ำกว่าเสมอ ในขณะเก็บตัวอย่างจะต่อสายยางกับหลอดเก็บตัวอย่างและจะวางขวดรูปชมพู่อยู่ในระดับความสูงเดียวกันไม่ว่าจะเก็บตัวอย่างที่ความสูงใด แสดงดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ทิศทางต่าง ๆ ในการเก็บตัวอย่าง

3.3 วิธีทดลอง

3.3.1 ศึกษารูปแบบการไหลภายในระบบถังกวน

1. ติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง โดยติดตั้งใบกวน สูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน D/T=0.33 ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

2. เติมน้ำให้มีความสูงของระดับน้ำเท่ากับ 40.6 เซนติเมตร

3. ใส่เม็ดพลาสติกขนาด 5.79-5.89 มิลลิเมตร สำหรับสังเกตรูปแบบการไหลในถังกวน

4. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนขนาดของใบกวนเป็น D/T=0.50 และ D/T=0.67 ตามลำดับ

5. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ โดยปรับระยะความสูงของใบกวนจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.25 และ C/T = 0.33 ตามลำดับ

6. ทำการทดลองข้อ 1-3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ตามลำดับ

3.3.2 ศึกษาการกระจายอนุภาคภายในระบบถังกวน

3.3.2.1 ศึกษาผลของขนาดใบกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค

1. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาค 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้ glass bead ขนาด 180-300 ไมครอน

2. เติมน้ำลงในถังกวนสูง 40.6 เซนติเมตร

3. นำ glass bead ที่คำนวณได้ใส่ลงในถังกวนและปั่นกวนซึ่งทำการทดลองที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17

4. ทำความสะอาดและอบขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 mLให้แห้ง

5. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

6. ทำการเก็บตัวอย่างในขณะปั่นกวน (วิธีเก็บตัวอย่างอธิบายใน 3.2) ที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถัง 4 ตำแหน่ง ดังนี้ จุดที่ 1 สูง 8.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 2 สูง 17 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 3 สูง 25.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 4 สูง 34 เซนติเมตร (h/H=0.2) โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL

7. หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว วัดปริมาตรน้ำในขวดรูปชมพู่โดยเทน้ำใส่กระบอกตวงจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

8. นำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปอบจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่และบันทึกผล

9. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

10. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนขนาดใบกวนเป็น D/T=0.50 และ D/T=0.67 ตามลำดับ

3.3.2.2 ศึกษาผลของความสูงใบกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค

1. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาค 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้ glass bead ขนาด 180-300 ไมครอน

2. เติมน้ำลงในถังกวนสูง 40.6 เซนติเมตร

3. นำ glass bead ที่คำนวณได้ใส่ลงในถังกวนและปั่นกวนซึ่งทำการทดลองที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17

4. ทำความสะอาดและอบขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 mLให้แห้ง

5. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

6. ทำการเก็บตัวอย่างในขณะปั่นกวน (วิธีเก็บตัวอย่างอธิบายใน 3.2) ที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถัง 4 ตำแหน่ง ดังนี้ จุดที่ 1 สูง 8.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 2 สูง 17 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 3 สูง 25.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 4 สูง 34 เซนติเมตร (h/H=0.2) โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL

7. หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว วัดปริมาตรน้ำในขวดรูปชมพู่โดยเทน้ำใส่กระบอกตวงจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

8. นำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปอบจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่และบันทึกผล

9. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

10. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนระยะความสูงใบกวนจากก้นถังเป็น C/T=0.25 และ C/T=0.33 ตามลำดับ

3.3.2.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค

1. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาค 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้ glass bead ขนาด 180-300 ไมครอน

2. เติมน้ำลงในถังกวนสูง 40.6 เซนติเมตร

3. นำ glass bead ที่คำนวณได้ใส่ลงในถังกวนและปั่นกวนซึ่งทำการทดลองที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17

4. ทำความสะอาดและอบขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 mLให้แห้ง

5. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

6. ทำการเก็บตัวอย่างในขณะปั่นกวน (วิธีเก็บตัวอย่างอธิบายใน 3.2) ที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถัง 4 ตำแหน่ง ดังนี้ จุดที่ 1 สูง 8.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 2 สูง 17 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 3 สูง 25.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 4 สูง 34 เซนติเมตร (h/H=0.2) โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL

7. หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว วัดปริมาตรน้ำในขวดรูปชมพู่โดยเทน้ำใส่กระบอกตวงจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

8. นำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปอบจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่และบันทึกผล

9. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

10. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ตามลำดับ

3.3.2.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมในถังกวนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค

1. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาค 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้ glass bead ขนาด 180-300 ไมครอน

2. เติมน้ำลงในถังกวนสูง 40.6 เซนติเมตร

3. นำ glass bead ที่คำนวณได้ใส่ลงในถังกวนและปั่นกวนซึ่งทำการทดลองที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17

4. ทำความสะอาดและอบขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 mLให้แห้ง

5. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

6. ทำการเก็บตัวอย่างในขณะปั่นกวน (วิธีเก็บตัวอย่างอธิบายใน 3.2) ที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถัง 4 ตำแหน่ง ดังนี้ จุดที่ 1 สูง 8.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 2 สูง 17 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 3 สูง 25.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 4 สูง 34 เซนติเมตร (h/H=0.2) โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL

7. หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว วัดปริมาตรน้ำในขวดรูปชมพู่โดยเทน้ำใส่กระบอกตวงจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

8. นำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปอบจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่และบันทึกผล

9. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

10. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นโดยรวมเป็น 2.5% และ7.5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ

3.3.2.5 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าความเข้มข้นของอนุภาค

1. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาค 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้ glass bead ขนาด 180-300 ไมครอน

2. เติมน้ำลงในถังกวนสูง 40.6 เซนติเมตร

3. นำ glass bead ที่คำนวณได้ใส่ลงในถังกวนและปั่นกวนซึ่งทำการทดลองที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ใช้ใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17

4. ทำความสะอาดและอบขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 mLให้แห้ง

5. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

6. ทำการเก็บตัวอย่างในขณะปั่นกวน (วิธีเก็บตัวอย่างอธิบายใน 3.2) ที่ตำแหน่งความสูงจากก้นถัง 4 ตำแหน่ง ดังนี้ จุดที่ 1 สูง 8.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 2 สูง 17 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 3 สูง 25.5 เซนติเมตร (h/H=0.2) จุดที่ 4 สูง 34 เซนติเมตร (h/H=0.2) โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL

7. หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว วัดปริมาตรน้ำในขวดรูปชมพู่โดยเทน้ำใส่กระบอกตวงจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

8. นำขวดรูปชมพู่ที่มีอนุภาคอยู่ด้วยไปอบจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในขวดรูปชมพู่และบันทึกผล

9. คำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

10. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคเป็น 75-150 ไมครอน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

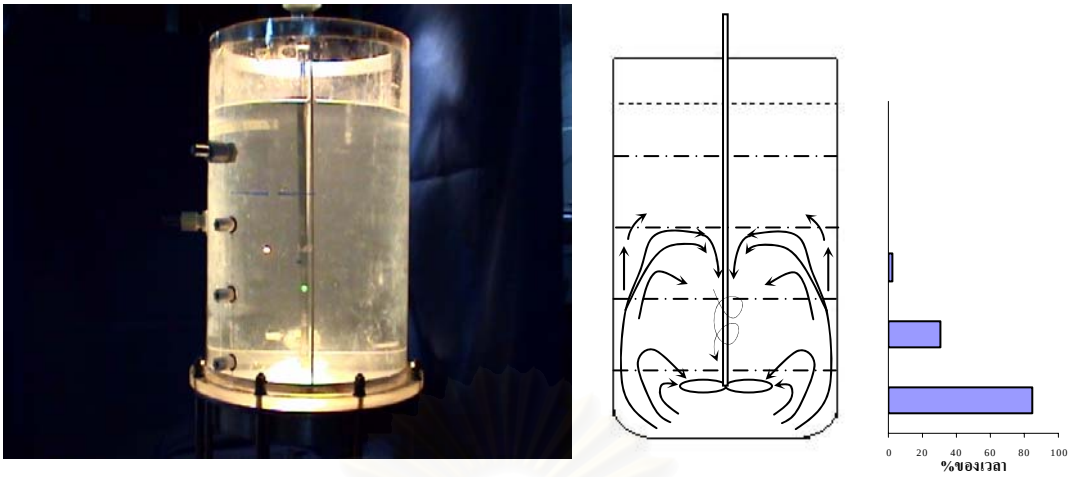
งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังกวน และการศึกษาการแขวนลอยของอนุภาคภายในถังกวน โดยมีปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ขนาดของใบกวน ความสูงของใบกวนจากก้นถัง ความเร็วรอบของใบกวน ความเข้มข้นของอนุภาค และขนาดของอนุภาค

4.1 ศึกษารูปแบบการไหลภายในระบบถังกวน

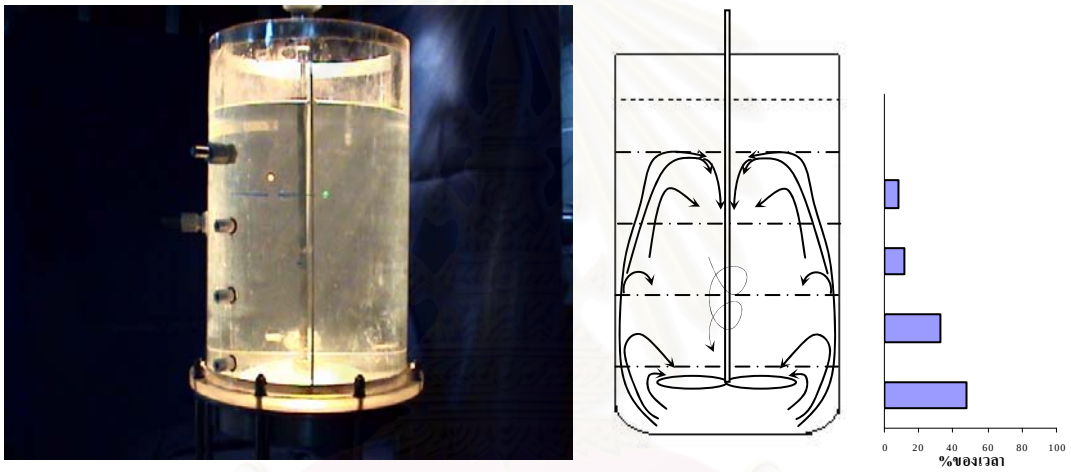
การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังกวน ได้ใช้น้ำประปาเป็นของเหลว และใช้เม็ดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.79 - 5.89 มิลลิเมตร ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ (ความหนาแน่น 1,032 kg/m^3) เป็นตัวบ่งชี้กระแสการไหล โดยบันทึกผลในรูปแบบของภาพเคลื่อนไหว (VDO) และทำการพิจารณาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน ระยะความสูงของใบกวนจากก้นถัง และความเร็วรอบในการปั่นกวนที่มีต่อรูปแบบการไหล

4.1.1 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน

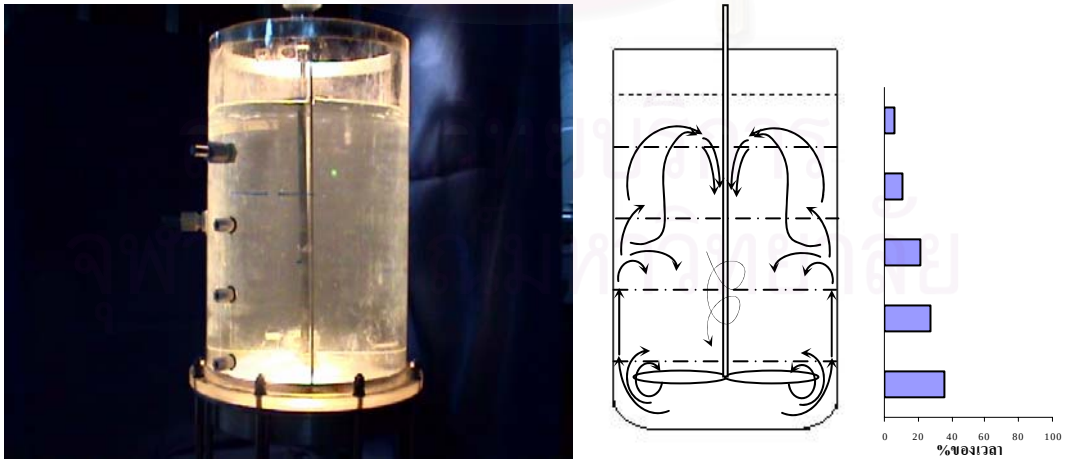
ในที่นี้เราได้ใช้ใบกวน 3 ขนาด ซึ่งมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (D/T) เท่ากับ 0.33, 0.50 และ 0.67 ตามลำดับ จากผลการศึกษาภาพ VDO รูปที่ 4-1 พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนมากขึ้น จะทำให้รูปแบบการไหลภายในถังกวนเปลี่ยนแปลงไป โดยทำให้ของไหลมีการไหลจากส่วนล่างของถังขึ้นไปยังส่วนบนหรือผิวน้ำมากขึ้น ดังเห็นได้จากผลการศึกษาในรูปที่ 4-1(ก) ซึ่งใช้ใบกวนขนาดเล็กสุด เม็ดพลาสติกจะเคลื่อนที่วนอยู่ส่วนล่างของถังเป็นส่วนมากและลอยขึ้นมาถึงส่วนกลางของถังบ้าง โดยไม่พบที่บริเวณผิวน้ำเลย แต่เมื่อเปลี่ยนใบกวนขนาดใหญ่ขึ้นจะเห็นว่าเม็ดพลาสติกจะเคลื่อนที่ขึ้นมาถึงส่วนบนของถังได้สูงและบ่อยครั้งกว่าดังรูปที่ 4-1(ข) และ 4-1(ค) ตามลำดับ เนื่องจากการปั่นกวนที่ความเร็วรอบหนึ่ง ๆ ใบกวนขนาดใหญ่จะมีความเร็วที่ปลายใบกวนสูงกว่า อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการขับน้ำที่มากกว่าใบกวนขนาดเล็ก ทำให้อัตราการจ่ายพลังงานให้กับของไหลในระบบมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย (พิจารณาจากค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2) เมื่อของไหลมีพลังงานสูงขึ้นย่อมทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยระยะทางที่มากขึ้น ซึ่งสำหรับระบบที่เป็นถังกวนแล้ว ของไหลย่อมไหลเวียนได้ทั่วถึงมากขึ้น



(ก)

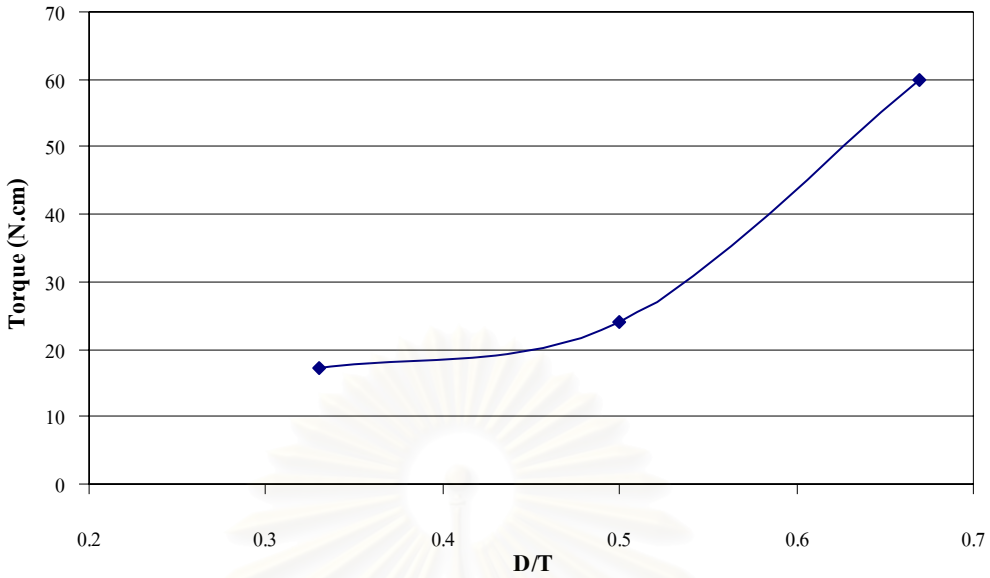


(ข)



(ค)

รูปที่ 4-1 ภาพและลักษณะการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวน โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที C/T=0.17 : (ก) D/T=0.33 (ข) D/T=0.50 (ค) D/T=0.67

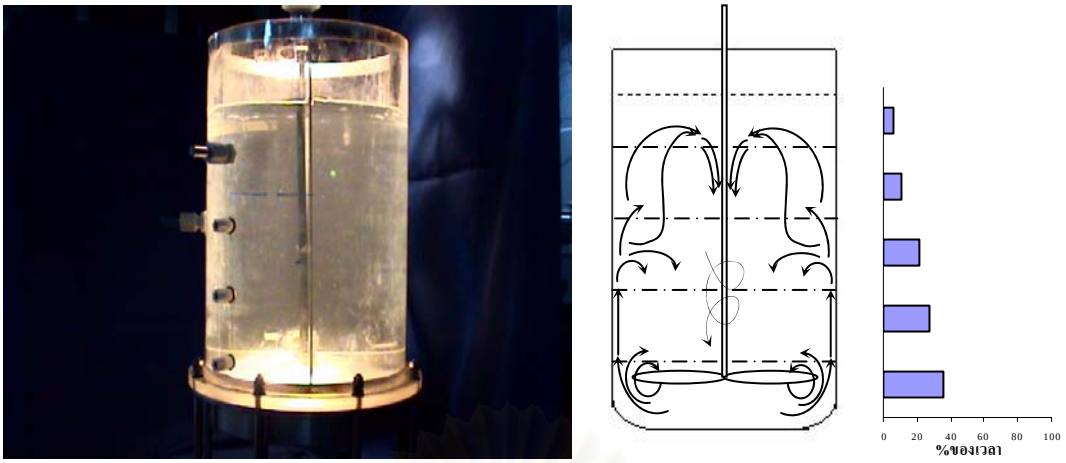


รูปที่ 4-2 แรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดใบกวนต่าง ๆ

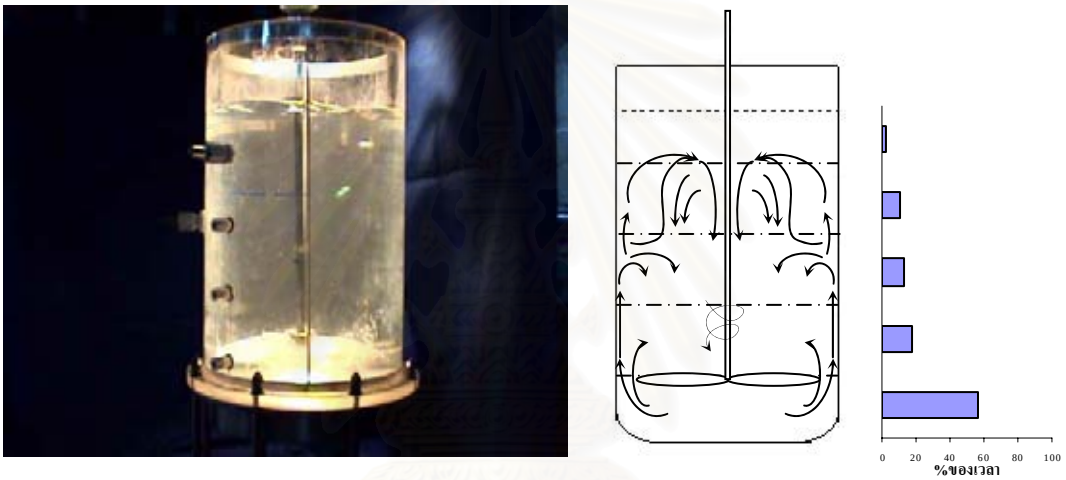
4.1.2 ผลของระยะความสูงของใบกวนจากก้นถัง

ส่วนผลของระดับความสูงของใบกวนจากก้นถังดังแสดงในรูปที่ 4-3 เมื่อใช้ใบกวนขนาดเดียวกันและใช้ความเร็วรอบเดียวกัน จะพบว่าการติดตั้งใบกวนยิ่งระยะทางสูงจากก้นถังมากขึ้นจะส่งผลทำให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนบนของถังได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาตรหรือช่องว่างใต้ใบกวนที่มากขึ้น ความเป็นไปได้ในการเกิดการไหลวนในลักษณะที่เป็น secondary flow จะมีมากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4-4) ทำให้ของไหลเกิดการสูญเสียพลังงานในบริเวณดังกล่าวไปส่วนหนึ่ง พลังงานที่เหลือในการไหลไปสู่ส่วนบนของถังจึงน้อยลง

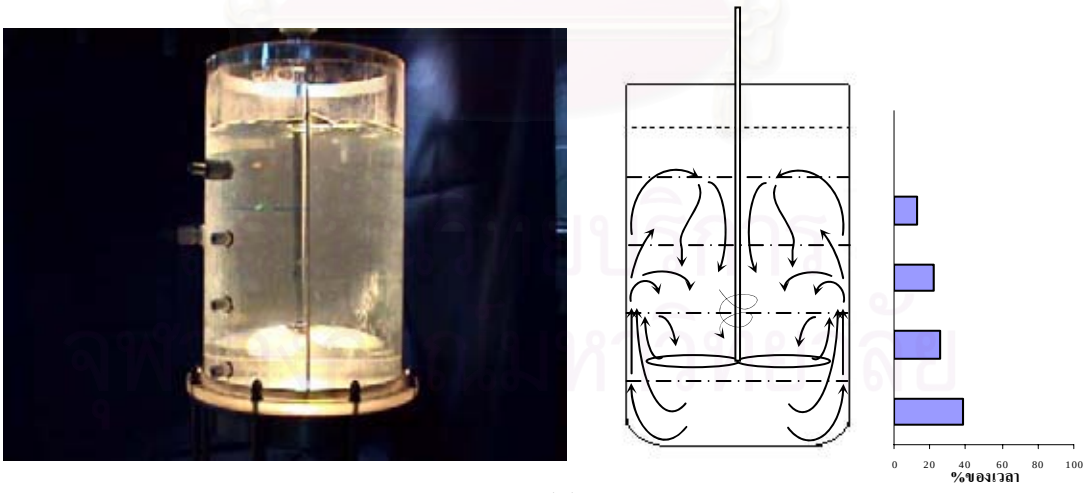
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

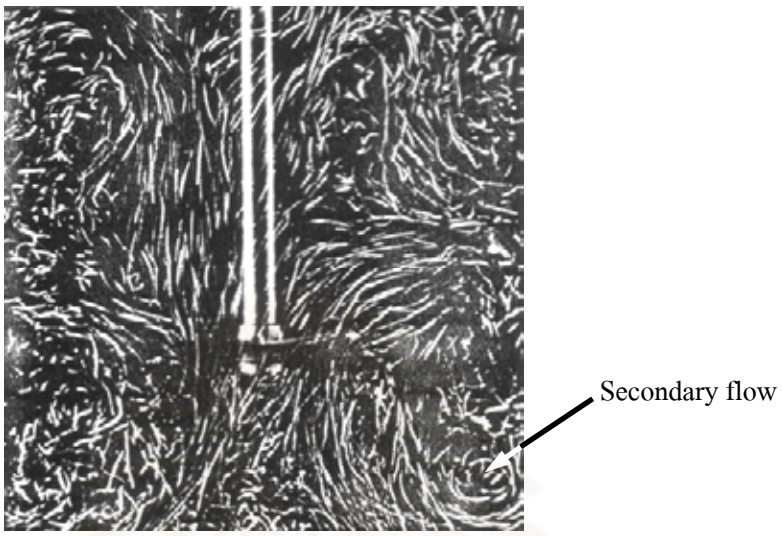


(ข)



(ค)

รูปที่ 4-3 ภาพและลักษณะการการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวนโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ใบกวนติดตั้งสูงจากก้นถัง :
(ก) C/T=0.17 (ข) C/T=0.25 (ค) C/T=0.33

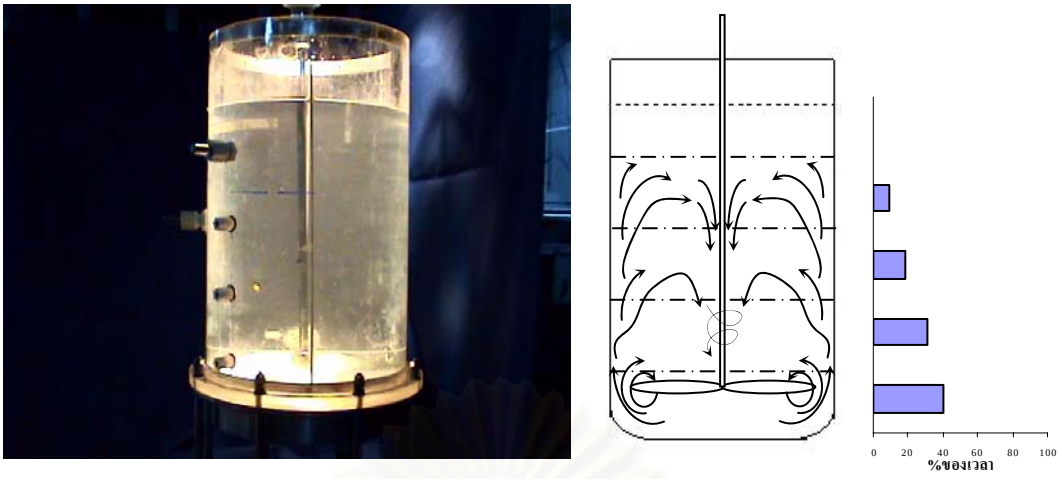


รูปที่ 4-4 ลักษณะการไหลวนแบบ Secondary flow (Alvin, 2000)

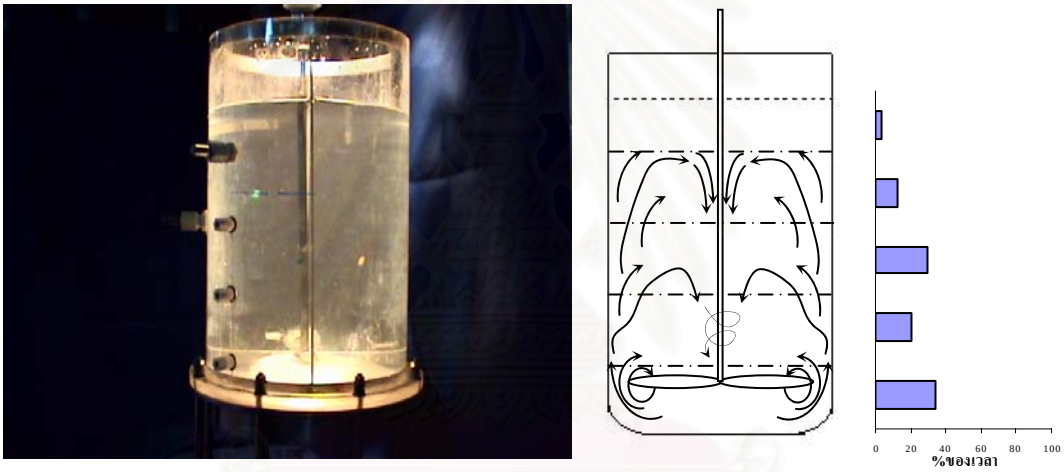
4.1.3 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวน

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วรอบ โดยใช้ใบกวนขนาดเดียวกันและติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เม็ดพลาสติกจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนบนของถังสูงได้มากขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับการเพิ่มขนาดของใบกวน เป็นเพราะอัตราการขับน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของการปั่นกวน ดังพิจารณาจากแรงบิดของมอเตอร์ตามรูปที่ 4-6 ดังนั้นของไหลในระบบย่อมได้รับพลังงานจากการปั่นกวนที่สูงขึ้น เมื่อความเร็วรอบของการปั่นกวนมากขึ้น

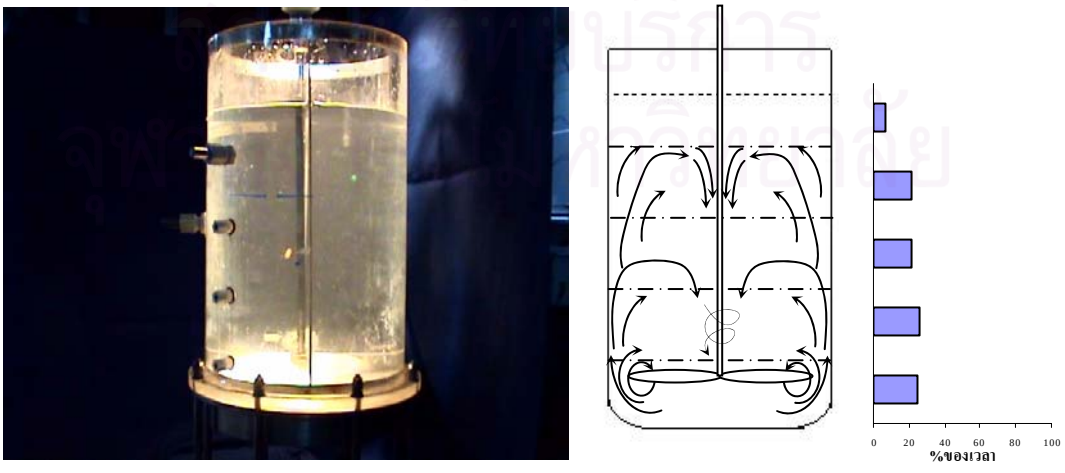
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


0
20
40
60
80
100
%ของเวลา

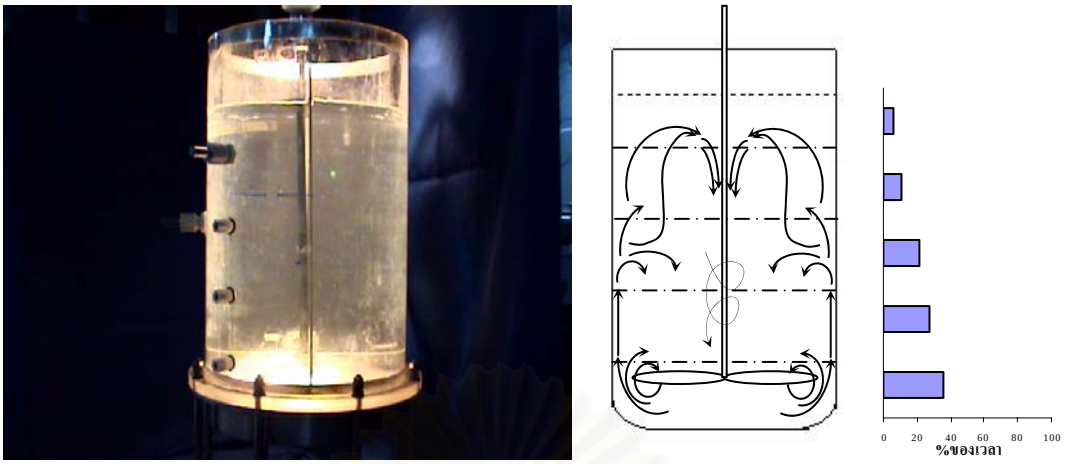
(ก)


0
20
40
60
80
100
%ของเวลา

(ข)

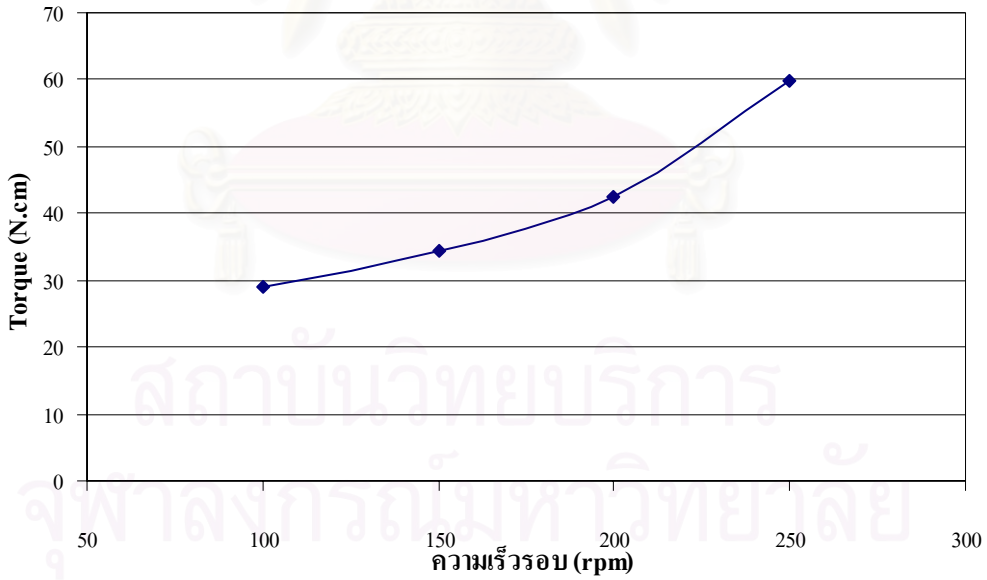

0
20
40
60
80
100
%ของเวลา

(ค)



(ง)

รูปที่ 4-5 ภาพและลักษณะการการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกในถังกวนโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ใบกวนติดตั้งสูงจากก้นถัง C/T=0.17 และความเร็วรอบ : (ก) 100 รอบต่อนาที (ข) 150 รอบต่อนาที (ค) 200 รอบต่อนาที (ง) 250 รอบต่อนาที



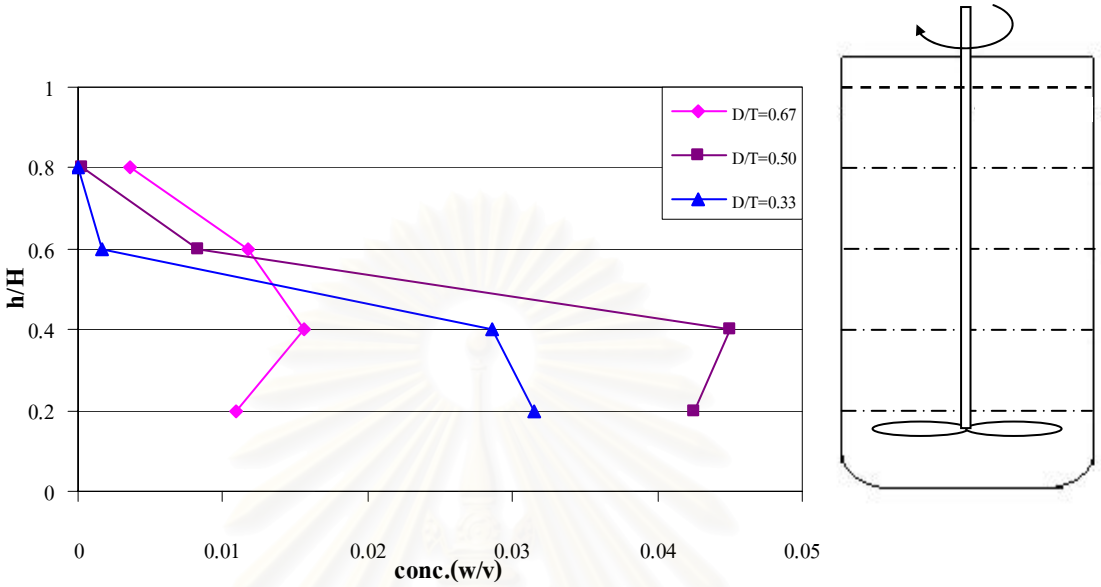
รูปที่ 4-6 แรงบิดของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

4.2 ศึกษาการกระจายอนุภาคภายในระบบถังกวน

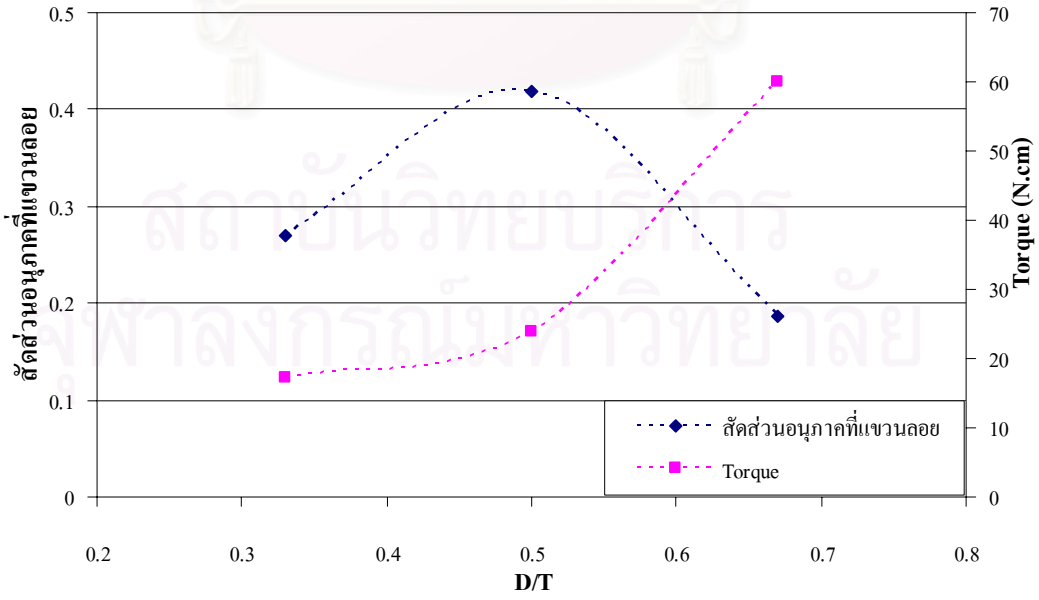
4.2.1 ผลการทดลองในสภาวะที่ใบกวนมีขนาดต่างกัน

การทดลองในส่วนนี้ได้กำหนดความสูงของใบกวนเป็น C/T=0.17 โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้นและขนาดของอนุภาคเท่ากับ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ 180-300 ไมครอน ตามลำดับ แต่เปลี่ยนขนาดใบกวนซึ่งมีอัตราส่วน D/T=0.33, D/T=0.50 และ D/T=0.67 จากกราฟรูปที่ 4-7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของขนาดใบกวนต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง และรูปที่ 4-8 ซึ่งแสดงสัดส่วนของปริมาณอนุภาคที่แขวนลอยต่อปริมาณอนุภาคทั้งหมดที่อยู่ในถังกวน พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบกวนมิได้ส่งผลให้ความสามารถในการทำให้อนุภาคแขวนลอยในระบบปั่นกวนมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าในถังกวนใด ๆ น่าจะมีอัตราส่วนของขนาดใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังค่าใดค่าหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการแขวนลอยสูงที่สุด ซึ่งในที่นี้คือ D/T=0.50 ในกรณีที่ใบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพของการทำให้อนุภาคแขวนลอยจะกลับลดลง เนื่องจากมี dead zone อยู่ใต้ใบกวนมากซึ่งทำให้อนุภาคตกค้างอยู่บริเวณก้นถังมากกว่าใบกวนขนาดอื่นดังแสดงในรูปที่ 4-9 ในขณะที่ขนาดใบกวนที่เล็กก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการแขวนลอยของอนุภาคต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากใบกวนขนาดเล็กนั้นถึงแม้จะมี dead zone บริเวณใต้ใบกวนอยู่น้อยแต่ความสามารถในการทำให้อนุภาคแขวนลอยในถังกวนก็มีน้อยด้วย เนื่องจากพลังงานที่ใบกวนจ่ายให้แก่ของไหลในระบบจะลดลงตามขนาดใบกวนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า สำหรับถังกวนใด ๆ ขนาดใบกวนที่ทำให้ประสิทธิภาพของการทำให้อนุภาคแขวนลอยสูงสุดจะมีค่าหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการออกแบบถังกวนมาตรฐานที่มักกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังเท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 (Geankoplis, 1983) อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาในเรื่องของการกระจายตัวของอนุภาคที่ระดับความสูงต่าง ๆ ในถังกวน โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variation : CV) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ถ้า CV มากจะมีการกระจายตัวมาก (สุชาดา บวรกิติวงศ์, 2548) จากกราฟรูปที่ 4-10 พบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคมีค่าลดลง ซึ่งหมายความว่าเมื่อใบกวนมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นของอนุภาคในแต่ละระดับความสูงของถังมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากการไหลที่ทั่วถึงมากขึ้นในถังกวนนั่นเอง จากผลการศึกษาในตอนนี้ จึงสรุปได้ว่า การเพิ่มขนาดของใบกวนส่งผลให้ของไหลได้รับพลังงานสูงขึ้น และไหลในระบบอย่างทั่วถึงตลอดความสูงของถัง ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคที่แขวนลอยในถังมีความสม่ำเสมอ แต่สัดส่วนอนุภาคที่ถูกทำให้แขวนลอยจะลดลง เป็นผล

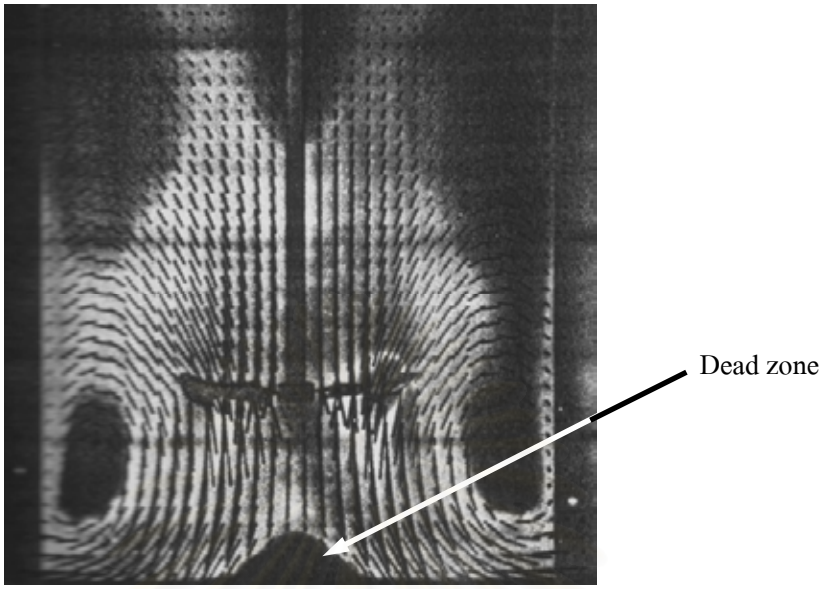
จากการเกิด dead zone บริเวณใต้ใบกวนที่มากขึ้น การกำหนดขนาดใบกวนจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสองประกอบกัน เพื่อประสิทธิภาพของการแขวนลอยอนุภาคในระบบปั่นกวน



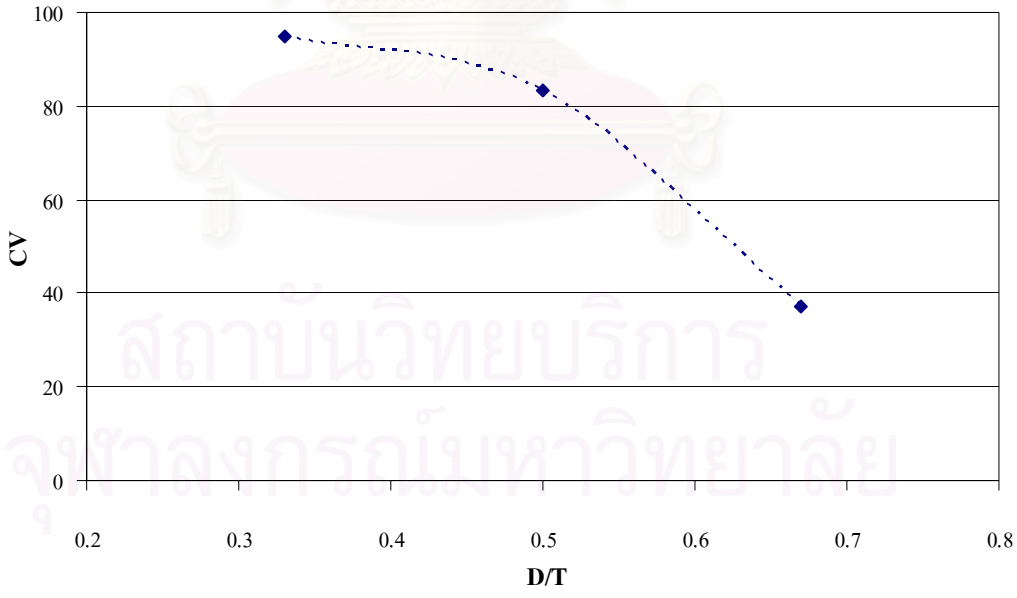
รูปที่ 4-7 ผลของขนาดใบกวนต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน และติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17



รูปที่ 4-8 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดใบกวนต่าง ๆ



รูปที่ 4-9 Dead zone บริเวณใต้ใบกวน (Alvin, 2000)

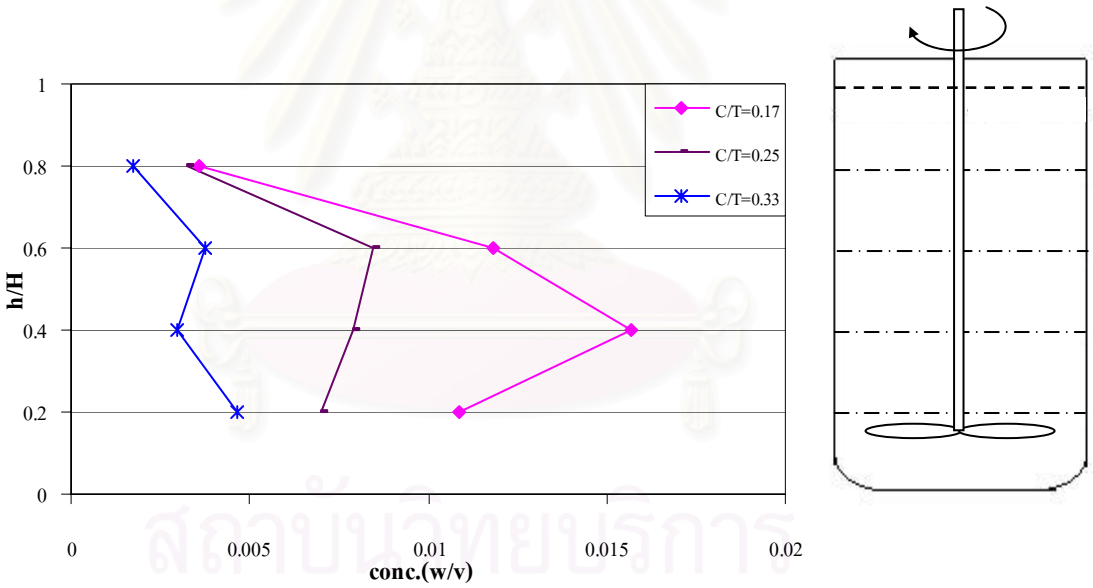


รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเมื่อปั่นกวนด้วยใบกวนขนาดต่าง ๆ

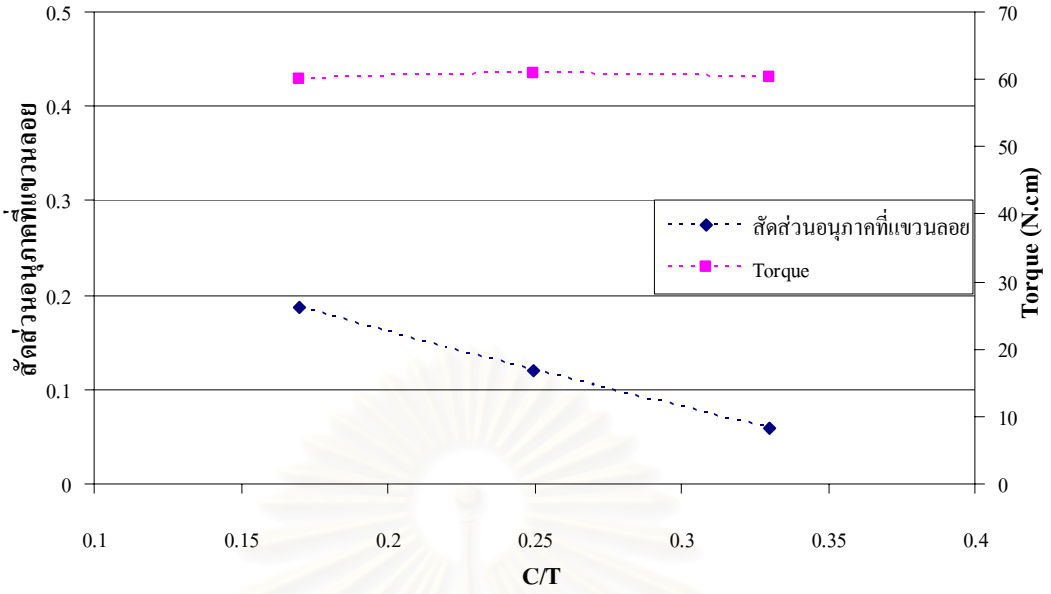
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 ผลการทดลองในสภาวะที่ความสูงของใบกวนแตกต่างกัน

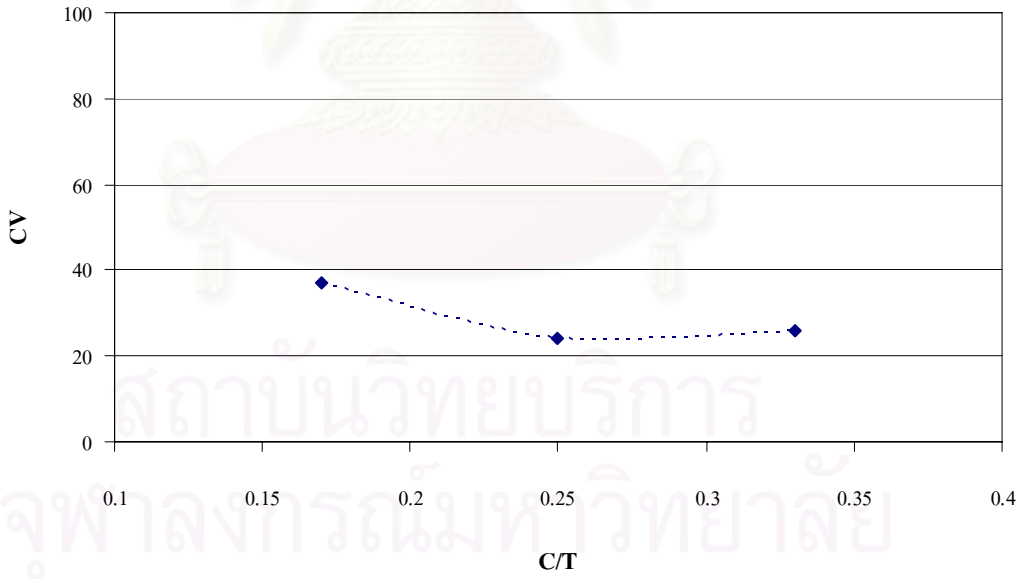
จากการทดลองโดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวน 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้นและขนาดของอนุภาคเท่ากับ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ 180-300 ไมครอน ตามลำดับ ใบกวนขนาด D/T=0.67 และเปลี่ยนแปลงความสูงของใบกวนจากก้นถัง 3 ระยะ คือ C/T=0.17, C/T=0.25 และ C/T=0.33 จากกราฟรูปที่ 4-11 และ 4-12 พบว่าการเพิ่มระยะความสูงของใบกวนจากก้นถังส่งผลให้ความสามารถในการทำให้แขวนลอยของระบบปั่นกวนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งยืนยันการเกิด secondary flow ดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1.2 และเมื่อพิจารณาในเรื่องของการกระจายตัวของความเข้มข้นอนุภาคในแต่ละระดับความสูงตามรูปที่ 4-13 จะเห็นว่าการกระจายของความเข้มข้นอนุภาคไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีแนวโน้มว่าระยะการติดตั้งที่สูงขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละระดับความสูงมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อาจเนื่องมาจาก secondary flow ที่บริเวณส่วนล่างของถัง ทำให้อนุภาคในส่วนนี้เกิดการฟุ้งกระจายที่ทั่วถึงกว่ากรณีที่ติดตั้งใบกวนในระดับต่ำ



รูปที่ 4-11 ผลของความสูงของใบกวนจากก้นถังต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง โดยใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน และใบกวนขนาด D/T=0.67



รูปที่ 4-12 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่สัดส่วนความสูงของใบกวนจากก้นถัง

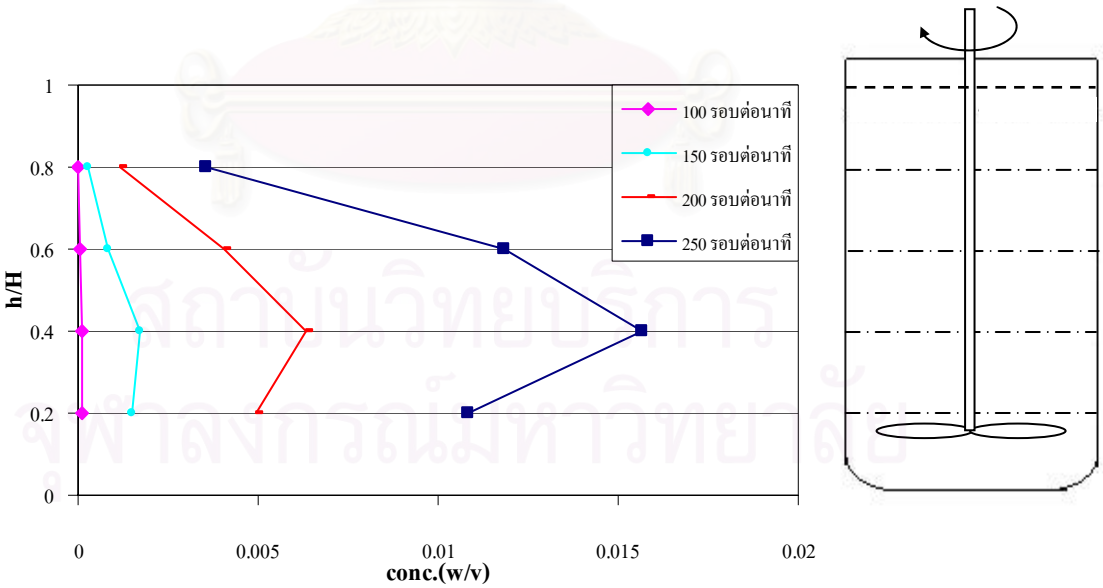


รูปที่ 4-13 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเมื่อปั่นกวนด้วยสัดส่วนความสูงต่าง ๆ ของใบกวนจากก้นถัง

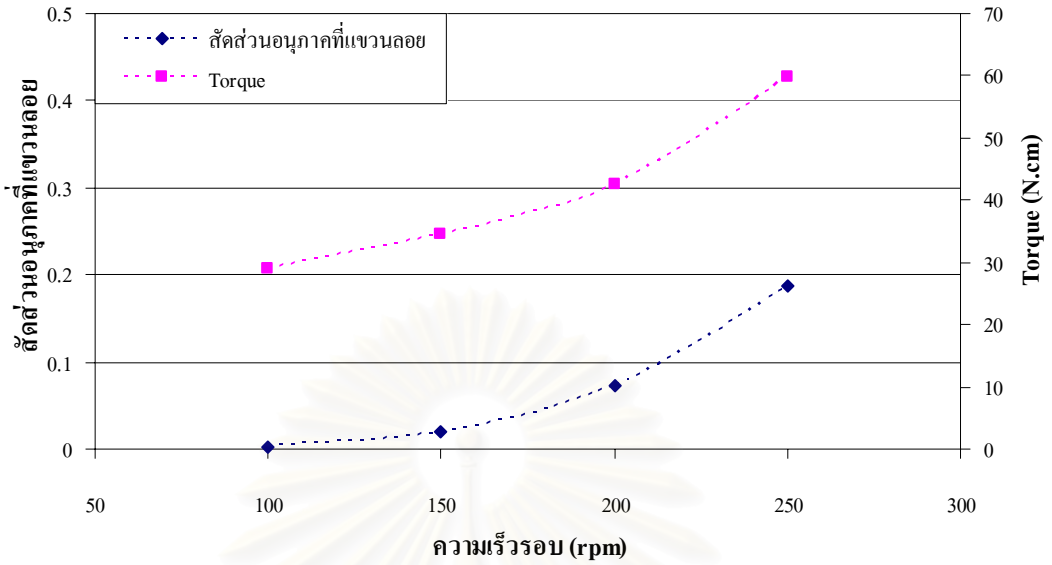
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.3 ผลการทดลองในสภาวะที่ความเร็วรอบของใบกวนต่างกัน

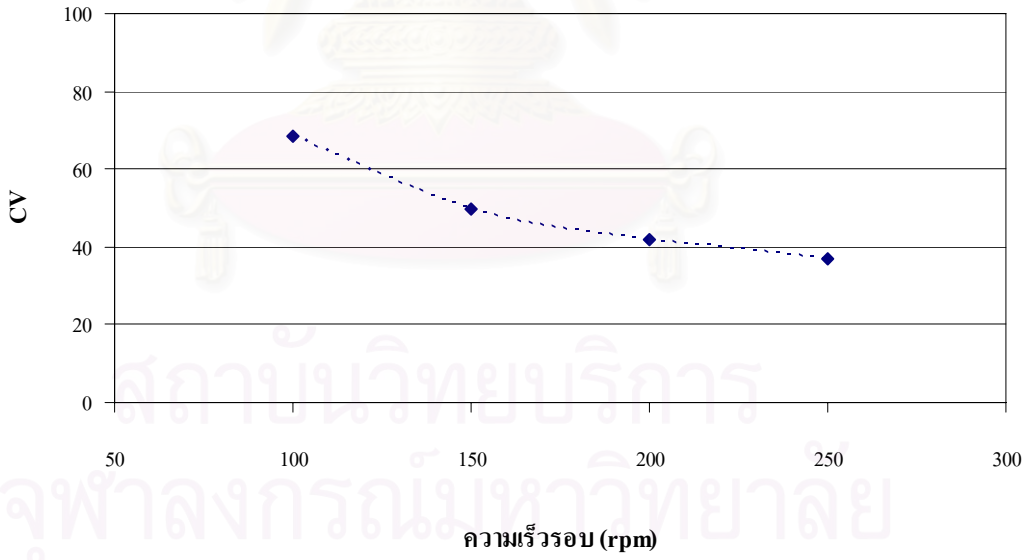
การทดลองในหัวข้อนี้ได้กำหนดสภาวะการทดลองโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 ความเข้มข้นและขนาดของอนุภาคเท่ากับ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ 180-300 ไมครอน ตามลำดับ แต่เปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที จากผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 4-14 และ 4-15 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นกวนสูงขึ้น จะสามารถทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากพลังงานที่ใบกวนจ่ายให้กับของไหลที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การส่งถ่ายโมเมนตัมจากของไหลไปยังอนุภาคและพาอนุภาคให้เคลื่อนที่ไปกับของไหลย่อมมีมากขึ้นเช่นกัน เราจึงสังเกตได้ถึงการแปรผันตามในลักษณะที่สอดคล้องกันของสัดส่วนอนุภาคที่แขวนลอย และแรงบิดของมอเตอร์เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไป (รูปที่ 4-15) อย่างไรก็ดี ในการทดลองนี้เราใช้ปริมาณอนุภาคค่อนข้างมาก ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นความเร็วรอบวิกฤต (Critical Speed) ที่ทำให้อนุภาคทั้งหมดเกิดการแขวนลอยได้เหมือนงานวิจัยอื่น ๆ ในอดีต อาทิเช่น Armenante และ Nagamine, 1998, Skelland และ Hassan, 1999, Sharma และ Shaikh, 2003 จากรูปที่ 4-16 เมื่อพิจารณาในเรื่องของการกระจายตัวของความเข้มข้นอนุภาคในแต่ละระดับความสูงของถัง พบว่าเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นอนุภาคจะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกันมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ของไหลได้รับพลังงานจากการปั่นกวนมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4-14 ผลของความเร็วรอบต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง ซึ่งใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน ติดตั้งใบกวนสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17



รูปที่ 4-15 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อสัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์

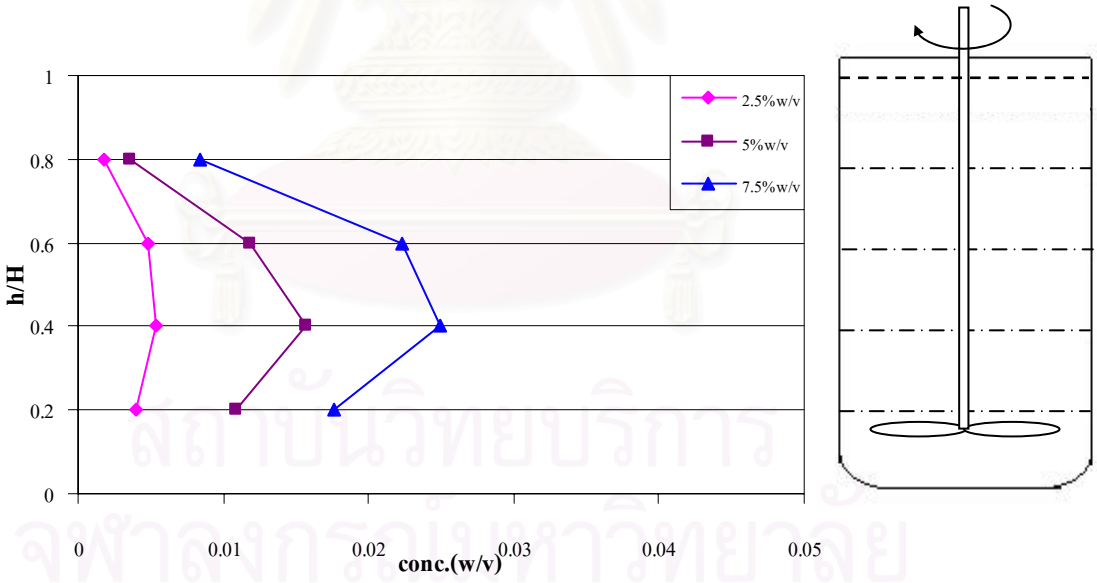


รูปที่ 4-16 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับความเร็วรอบในการปั่นกวน

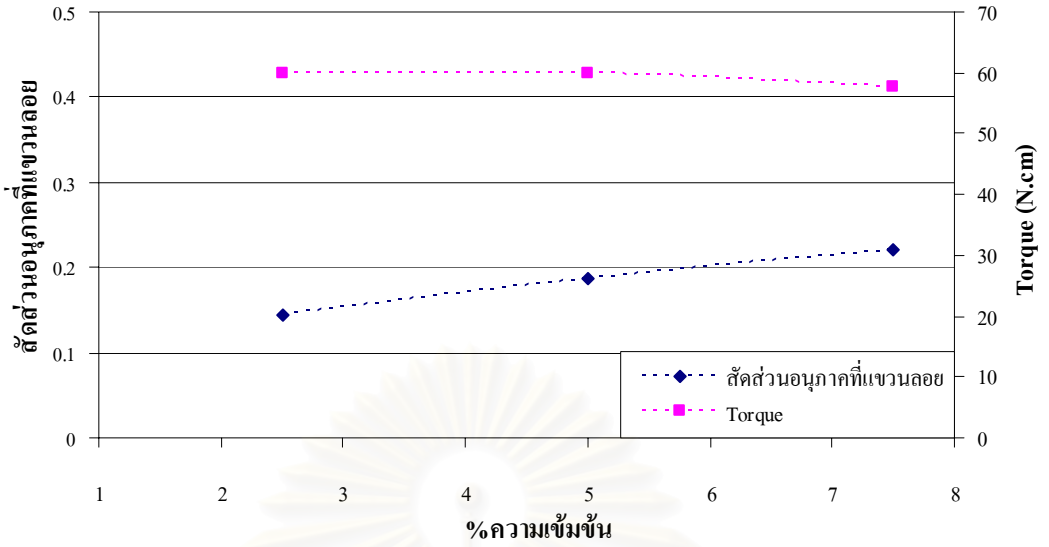
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 ผลการทดลองในสภาวะที่ความเข้มข้นของอนุภาคโดยรวมในถังกวนต่างกัน

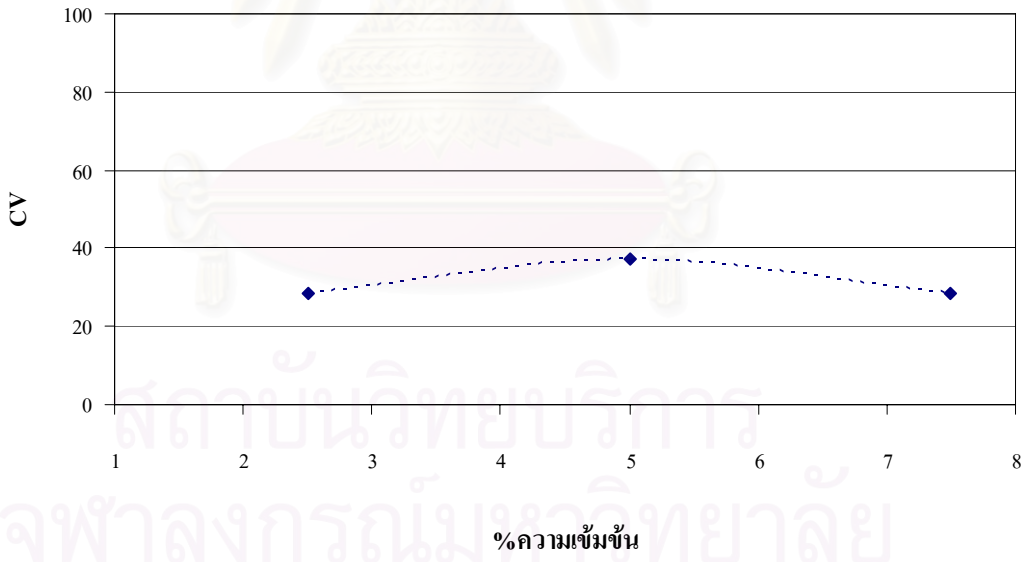
เมื่อใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 ความเร็วรอบที่ใช้คือ 250 รอบต่อนาที ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน แต่เปลี่ยนปริมาณอนุภาคในระบบเป็น 2.5%, 5% และ 7.5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากผลการทดลองที่แสดงดังกราฟรูปที่ 4-17 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคในถังกวนมากขึ้น ความเข้มข้นที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ในถังกวนก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยสัดส่วนของอนุภาคที่แขวนลอยต่ออนุภาคทั้งหมดก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน (ดูรูปที่ 4-18) ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่อนุภาคจะได้รับการถ่ายโอนโมเมนตัมจากของไหลและเกิดการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับขอบถัง ซึ่งของไหลถูกขับออกจากปลายใบกวนด้วยความเร็วที่สูงกว่าบริเวณอื่น (Guiraud และคณะ, 1997) แต่เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นตามรูปที่ 4-19 จะไม่เห็นว่าได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน เพราะสภาวะที่ใช้ในการทดลองเหมือนกันอนุภาคจึงกระจายตัวขึ้นไปส่วนบนของถังในลักษณะเช่นเดียวกันต่างกันเพียงปริมาณอนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นไปไม่เท่ากันตามปริมาณอนุภาคที่มีอยู่ในระบบ การกระจายตัวของความเข้มข้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน



รูปที่ 4-17 ผลของความเข้มข้นโดยรวมต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง ซึ่งใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ขนาดอนุภาค 180-300 ไมครอน ใบกวนขนาด D/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17



รูปที่ 4-18 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์กับปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคในถังกวน



รูปที่ 4-19 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคในถังกวน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.5 ผลการทดลองในสภาวะที่ขนาดอนุภาคมีขนาดต่างกัน

เมื่อทำการทดลองโดยใช้ใบกวนขนาด D/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17 ความเร็วรอบที่ใช้คือ 250 รอบต่อนาที แต่เปรียบเทียบระหว่างอนุภาคขนาด 75-150 และ 180-300 ไมครอน ที่ความเข้มข้นอนุภาคเท่ากัน คือ 5%โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าอนุภาคขนาดเล็กถูกทำให้แขวนลอยได้ง่ายกว่า (ดังรูปที่ 4-20 และ 4-21) ซึ่งไม่น่าประหลาดใจแต่อย่างใด เมื่อพิจารณาว่าอัตราส่วนระหว่างแรงที่ของไหลกระทำต่ออนุภาค และทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปกับของไหลนั้น หรือ Drag force (F_D) กับแรงที่กระทำต่ออนุภาคให้ตกลงสู่ก้นถัง (W) จะมีค่ามากขึ้น หากขนาดของอนุภาคเล็กลง ดงแสดงตามสมการที่ 4-1 ถึง 4-2

$$\frac{F_D}{W} = \frac{C_D \rho_l v^2 / 2 A}{\left(\rho_p - \rho_l\right) V g} \qquad (4\text{-}1)$$

F_D = แรงลาก (Drag force)

C_D = สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุ (C_D = ค่าคงที่ กรณีมีค่า Re สูง (Warren L., 2005))

v = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและอนุภาค

A = พื้นที่หน้าตัดของอนุภาค

W = น้ำหนักของอนุภาค

V = ปริมาตรของอนุภาค

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ρ_l= ความหนาแน่นของของไหล

ρ_p= ความหนาแน่นของอนุภาค

ทำการแทนค่า

$$V = \frac{4}{3}\pi\frac{d^3}{8}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

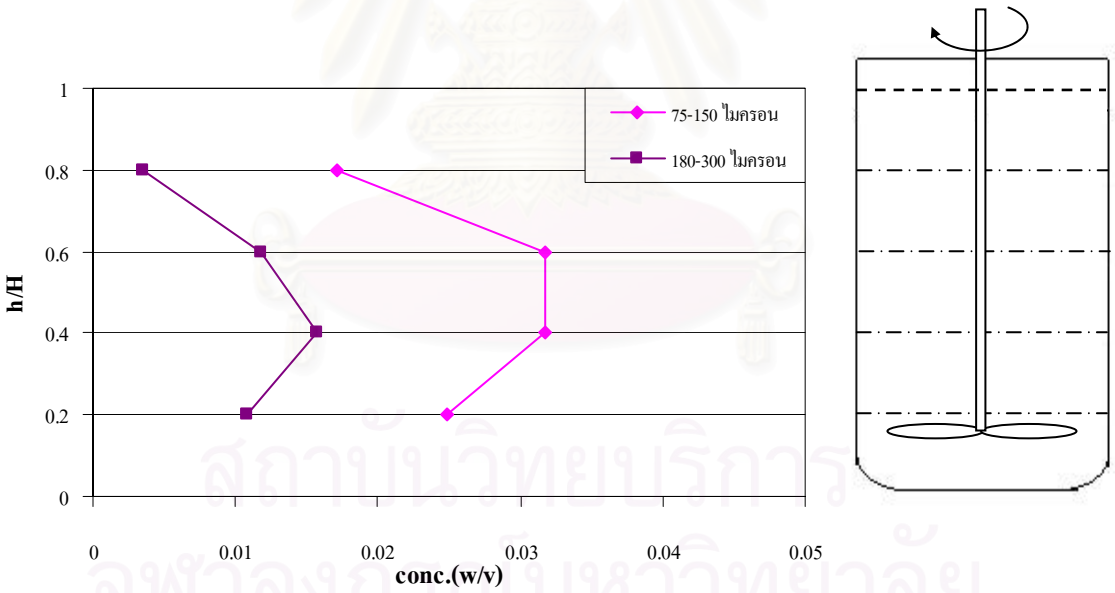
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลงในสมการ 4-1 จะได้ว่า

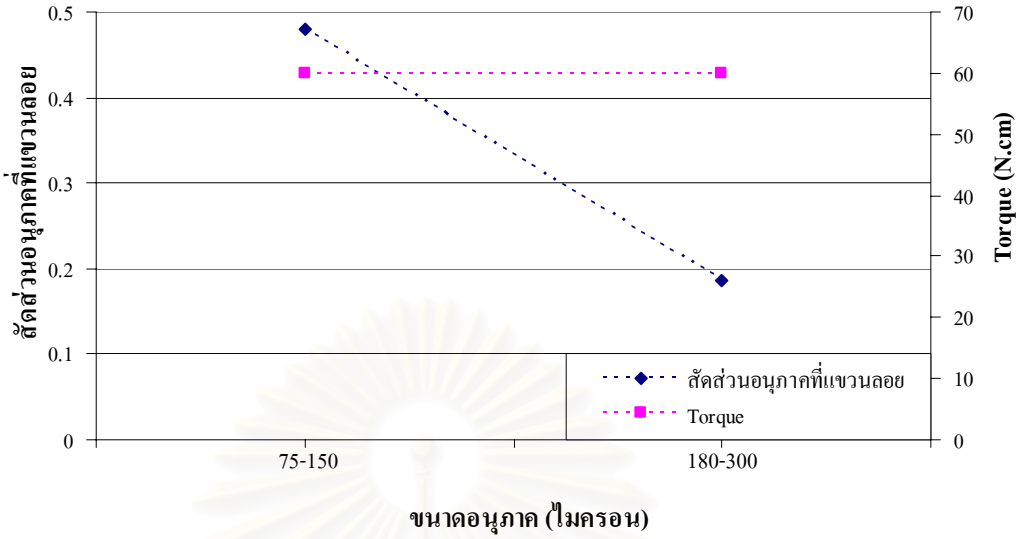
$$\frac{F_D}{W}=\frac{C_D\rho_l\left(\frac{v^2}{2}\right)\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}{(\rho_p-\rho_l)\left(\frac{4}{3}\pi\frac{d^3}{8}\right)g}=\left(\frac{3C_D\rho_l v^2}{4(\rho_p-\rho_l)g}\right)\left(\frac{1}{d}\right) \quad (4\text{-}2)$$

ซึ่งเห็นได้ว่าถ้า d มากขึ้นแล้ว $\frac{F_D}{W}$ จะลดลง

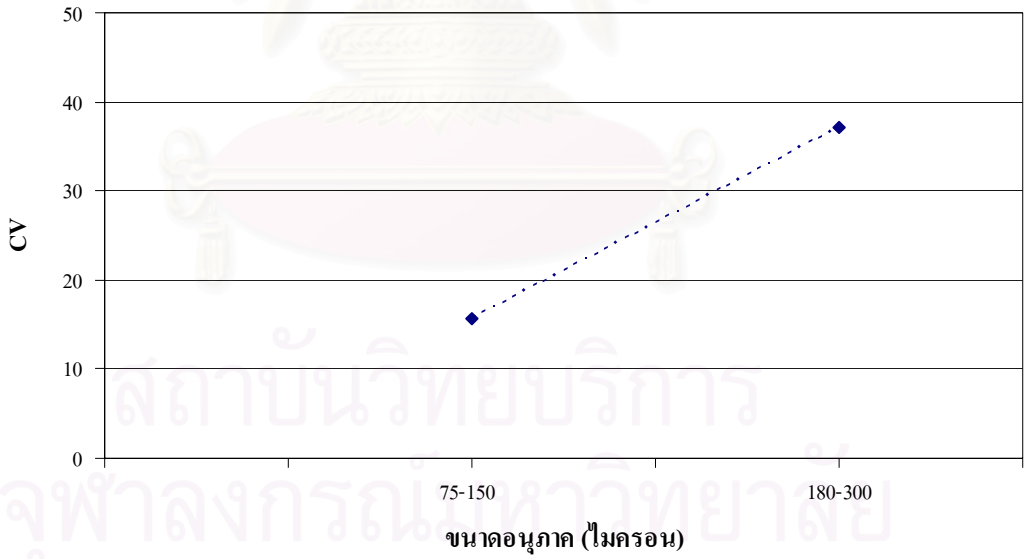
เมื่อพิจารณาในเรื่องของการกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละระดับความสูง ดังกราฟรูปที่ 4-22 พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีการกระจายตัวของความเข้มข้นในแต่ละระดับความสูงของถังมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก นั่นหมายความว่าอนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งถังมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากการที่อนุภาคขนาดเล็กสามารถถูกพาให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหลได้ง่ายกว่าดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น



รูปที่ 4-20 ผลของขนาดอนุภาคต่อความเข้มข้นของอนุภาคที่ได้จากตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง ซึ่งใช้ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใบกวนขนาด D/T=0.67 ติดตั้งสูงจากก้นถังเป็นระยะ C/T=0.17



รูปที่ 4-21 สัดส่วนการแขวนลอยของอนุภาคในถังกวนและแรงบิดของมอเตอร์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ



รูปที่ 4-22 ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันของความเข้มข้นของอนุภาคเทียบกับขนาดอนุภาค

บทที่ 5

สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทดลอง

ก. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนที่มากขึ้นเป็นการเพิ่มกำลังในการขับน้ำ ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอในแต่ละระดับความสูงของถังกวนมากขึ้น

ข. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนที่มากขึ้น ทำให้ dead zone บริเวณก้นถังใต้ใบกวนกินพื้นที่กว้างขึ้น เป็นผลให้สัดส่วนของอนุภาคที่เกิดการแขวนลอยลดต่ำลง ในขณะเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนที่ลดลงทำให้กำลังในการขับน้ำต่ำลง เป็นผลให้สัดส่วนของอนุภาคที่เกิดการแขวนลอยลดต่ำลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.5

ค. การติดตั้งใบกวนอยู่สูงจากก้นถังมากขึ้น ทำให้ประสิทธิผลในการทำให้อนุภาคแขวนลอยต่ำลง เนื่องจากการเกิด Secondary flow ในส่วนล่างของถังใต้ใบกวน แต่จะมีส่วนช่วยให้อนุภาคที่แขวนลอยกระจายตัวได้ทั่วถึงตลอดทั้งถังมากขึ้น

ง. สัดส่วนของอนุภาคที่แขวนลอย และการกระจายตัวของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ (หรือ อัตราการจ่ายพลังงานเพื่อขับเคลื่อนของเหลว)

จ. การเพิ่มปริมาณของอนุภาค จะช่วยให้สัดส่วนอนุภาคที่แขวนลอยเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการที่อนุภาคที่จมอยู่บริเวณก้นถังมีโอกาสสัมผัสกับของไหล และถูกทำให้เคลื่อนไปกับของไหลมากขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อการกระจายตัวภายในถังกวน

ฉ. ขนาดของอนุภาคที่เล็กลง ทำให้ทั้งสัดส่วนของอนุภาคที่แขวนลอยและการกระจายตัวของอนุภาคภายในถังกวนสูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของ Drag force ที่เพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กับแรงโน้มถ่วง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความเร็วรอบวิกฤตของระบบ ซึ่งเป็นผลให้อนุภาคทั้งหมดเกิดการแขวนลอย โดยการเพิ่มความเร็วรอบ หรือเปลี่ยนคุณลักษณะของอนุภาคของแข็ง

2. ศึกษาผลของระดับของเหลวภายในถังที่มีต่อประสิทธิภาพในการแขวนลอยของอนุภาค

3. ศึกษาเปรียบเทียบใบกวนรูปแบบอื่น ๆ ทั้งที่เป็น axial flow เช่นกัน หรือเปรียบเทียบระหว่างชนิดที่เป็น axial flow และ radial flow

4. ทำ Simulation เพิ่มเติมเพื่อจำลองการไหลของไหลภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ

5. ประยุกต์ใช้เทคนิคอื่น ๆ ในการตรวจวัดความเข้มข้น เช่น laser dropper เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เจษฎา เกิดบ้านชัน. คอมพิวเตอร์ช่วยในการเลือกและกำหนดขนาดใบพัดกวน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

สุชาดา บวรกิติวงศ์. สถิติประยุกต์ทางพฤติกรรมศาสตร์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548

ภาษาอังกฤษ

Alvin, W. Nienow. Handbook of Mixing Technology. Germany: EKATO, 2000.

Armenante, P.M. and Nagamine, E.U. Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks. Chemical Engineering Science 53 (1998): 1757-1775.

Buurman C., Resoort G., and Plaschkes A. Scaling-up rules for solids suspension in stirred vessels. Chemical Engineering Science 41 (1986): 2865-2871.

Biswas, P.K., Dev, S.C., Godiwalla, K.M. and Sivaramakrishnan, C.S. Effect of some design parameters on the suspension characteristics of a mechanically agitated sand-water slurry system. Materials and Design (1999): 253-265.

Geankoplis, Christie J. Transport processes and unit operations. 2nd ed. Boston : Allyn and Bacon, 1983.

Guiraud, P., Costes, J. and Bertrand, J. Local measurements of fluid and particle velocities in a stirred suspension. Chemical Engineering Journal 68 (1997): 75-86.

Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W. Mixing in the Process Industries. London: Butterworth&Co (Publishers), 1985.

Mactaggart, R.S., Nasr-El-Din, H.A. and Masliyah, J.H. Sample withdrawal from a slurry mixing tank. Chemical Engineering Science 48 (1993): 921-931.

Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H. Fundamentals of Fluid Mechanics. New York: John Wiley & Son, 1998.

Nagata, S. Mixing Principles and Applications. Tokyo: Kodansha, 1975.

Oldshue, J.Y. Fluid Mixing Technology. New York: McGraw-Hill Publications, 1983.

Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A., Kresta, S.M. Handbook of industrial mixing : science and practice. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004.

Sharma, R.N. and Shaikh, A.A. Solids suspension in stirred tanks with pitched blade turbines. Chemical Engineering Science 58 (2003): 2123-2140.

Skelland, A.H.P. and Hassan, N.M. Suspension solids distribution in agitated, baffled vessels containing three concentric cooling coils. Chemical Engineering Science 54 (1999): 4273-4284.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

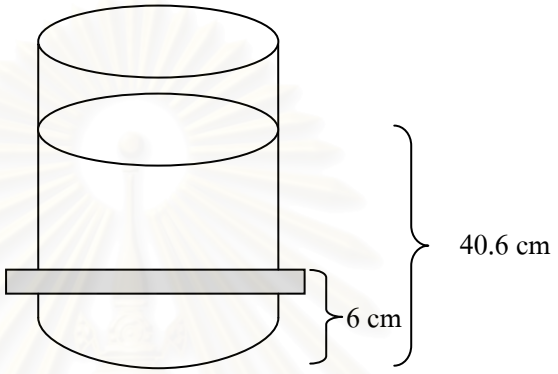
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคที่ใส่ในถังซึ่งใช้ระดับความสูงน้ำเท่ากับ 40.6 เซนติเมตร

- กรณีที่ 1 ปริมาณของอนุภาค glass bead 0.025 g/mL (2.5%w/v)



รูปที่ ผ-1 ถังกวน

ปริมาตรน้ำที่สูง 6 เซนติเมตรจากก้นถัง คือ 2.9×10^3 mL ซึ่งวัดโดยการตวงจากบีกเกอร์

ปริมาตรน้ำ $= (2.9 \times 10^3) + [\pi(0.145)^2 \times (0.406-0.06) \times 10^6]$

$= 25{,}754$ mL

ปริมาณอนุภาค $= 25{,}754 \times 0.025$

$= 643.85$ g

$\therefore$ ชั่งอนุภาคหนัก 644 g ใส่ในน้ำ 25,754 mL

- กรณีที่ 2 ปริมาณของอนุภาค glass bead 0.050 g/mL (5%w/v)

ปริมาตรน้ำ $= (2.9 \times 10^3) + [\pi(0.145)^2 \times (0.406-0.06) \times 10^6]$

$= 25{,}754$ mL

ปริมาณอนุภาค $= 25{,}754 \times 0.05$

$= 1287.70$ g

$\therefore$ ชั่งอนุภาคหนัก 1,288 g ใส่ในน้ำ 25,754 mL

- กรณีที่ 3 ปริมาณของอนุภาค glass bead 0.075 g/mL (7.5%w/v)

ปริมาตรน้ำ $= (2.9 \times 10^3) + [\pi(0.145)^2 \times (0.406-0.06) \times 10^6]$

$= 25{,}754$ mL

ปริมาณอนุภาค $= 25{,}754 \times 0.075$

$= 1931.55$ g

∴ ชั่งอนุภาคหนัก 1932 g ใส่ในน้ำ 25,754 mL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณความเข้มข้นของอนุภาคในตัวอย่างที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของถัง

ขั้นที่ 1 หลังจากเก็บตัวอย่างรินน้ำออกจากขวดรูปชมพู่วัดปริมาตรให้เป็น V_1

ขั้นที่ 2 นำอนุภาคที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ไปชั่งน้ำหนักให้เป็น m_1

ขั้นที่ 3 หลังจากอบแล้วนำอนุภาคที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ไปชั่งน้ำหนักให้เป็น m_2

ขั้นที่ 4 นำ $m_1 - m_2 = M$ และคำนวณหาปริมาตร V_2 ดังนี้

$$\rho = \frac{M}{V_2}$$

ρ = ความหนาแน่นน้ำเท่ากับ 1000 kg/m^3

ขั้นที่ 5 นำ $V_1 + V_2 = V_t$

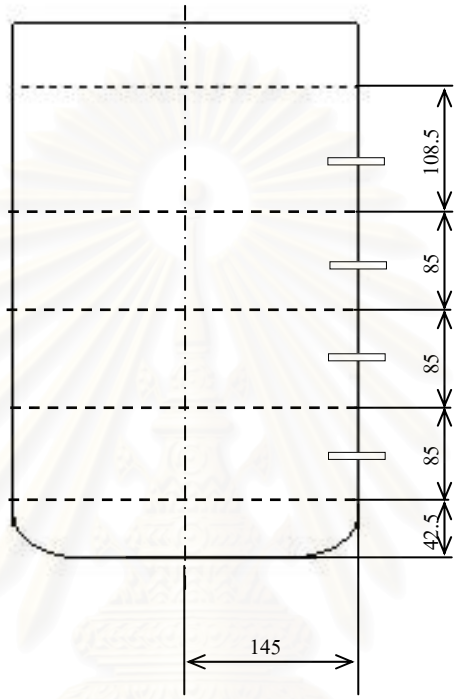
ขั้นที่ 6 หาความเข้มข้นของอนุภาคโดย $\frac{m_2}{V_t}$ หน่วยคือ w/v

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การหาปริมาณสัดส่วนของอนุภาคที่ลอยต่อปริมาณอนุภาคทั้งหมดที่ใส่ในถังกวน

1. แบ่งขอบเขตหาปริมาตรในแต่ละโซนดังรูปที่ ผ-2



รูปที่ ผ-2 ขอบเขตการหาปริมาตรในแต่ละส่วนของถังกวน

โดยปริมาตรแต่ละส่วนหาได้ดังต่อไปนี้ คือในแต่ละตำแหน่งเก็บตัวอย่างจะห่างกัน 85 มิลลิเมตร และจะให้จุดเก็บตัวอย่างเป็นจุดกึ่งกลางโซน ดังนั้นระยะห่างเหนือและใต้จุดเก็บตัวอย่างจะห่างเป็นระยะทาง 42.5 มิลลิเมตร ดังนั้นจะเหลือความสูงจากก้นถังสูงขึ้นมาเป็นระยะ 42.5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นโซนก้นถัง และรัศมีของถังกวนมีขนาด 145 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณปริมาตรในแต่ละส่วนของถังกวนจากสูตร

$$V = \pi r^2 h$$

V = ปริมาตรทรงกระบอกในแต่ละส่วนของถังกวน

r = รัศมีของถังกวน

h = ความสูงในแต่ละส่วนของถังกวน

2. เอาความเข้มข้นที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งคูณปริมาตรจากข้อ 1 จะได้น้ำหนักแต่ละตำแหน่งที่วัด

3. นำน้ำหนักที่คำนวณได้ในแต่ละส่วนมารวมกันจะได้น้ำหนักอนุภาคทั้งหมดที่ลอยอยู่ในถังกวน และสามารถคำนวณน้ำหนักอนุภาคที่อยู่ก้นถังได้ โดยเอาน้ำหนักอนุภาคที่ใส่ลงไปลบด้วยผลบวกของอนุภาคที่ลอย

4. หาปริมาณสัดส่วนของอนุภาคที่ลอยต่อปริมาณอนุภาคทั้งหมดที่ใส่ในถังกวนโดยเอาน้ำหนักของอนุภาคที่ลอยเหนือก้นถังทั้งหมดหารด้วยปริมาณอนุภาคทั้งหมดที่ใส่ลงไปในถังกวน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูล

ในการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป เราสามารถเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลเหล่านั้นได้โดยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variation : CV) โดยการแปลงให้เป็นอัตราส่วนหรือร้อยละของสัดส่วนของค่าการกระจายกับค่ากลาง

$$CV = \left(\frac{SD}{\overline{X}} \right) \times 100$$

ซึ่งข้อมูลที่มีค่าค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันมากจะมีการกระจายตัวมาก (สุชาดา บวรกิติวงศ์, 2548)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรินทร์ บุญแม้น เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย