

การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของ
แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์



นาย ไชยนันต์ แท่งทอง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

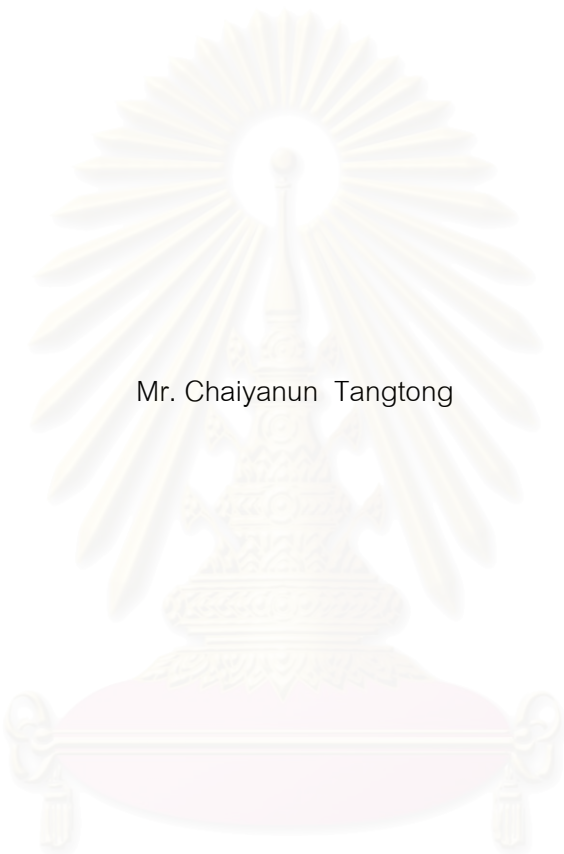
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1054-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF COPRECIPITATION OF CALCIUM AND MAGNESIUM ION IN THE FORM OF
CALCIUM CARBONATE AND MAGNESIUM HYDROXIDE



Mr. Chaiyanun Tangtong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1054-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของ
แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
โดย นาย ไชยรัตน์ แห่งทอง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.วิทย์ สุนทรนันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไชยรินทร์ แห่งทอง : การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน
ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์. (STUDY OF
COPRECIPITATION OF CALCIUM AND MAGNESIUM ION IN THE FORM
OF CALCIUM CARBONATE AND MAGNESIUM HYDROXIDE) อ.ที่ปรึกษา :
อาจารย์ ดร. วิทย์ สุทรนันท์, 171 หน้า. ISBN 974-17-1054-2

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะการเกิดตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างไปจากการเกิดตะกอนของสารเพียงชนิดเดียวและผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อการเกิดตะกอนร่วม ผลจากการศึกษานี้พบว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ต่ำกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะมีผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าต่ำลง แต่มีปริมาณของแมกนีเซียมไอออนมากขึ้น อย่างไรก็ตามการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าเท่ากันจะทำให้ผลดังกล่าวหมดไป จากการสังเกตโครงสร้างของตะกอนที่เกิดขึ้นชี้ให้เห็นว่าตะกอนร่วมมีลักษณะของการรวมตัวกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดและความหนาแน่นมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แต่น้อยกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนร่วมตกตะกอนได้เร็วกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แต่ช้ากว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นและความเร็วรอบของการกวนจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมและปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย อันเป็นผลมาจากการกำหนดค่าไอออนิกสเตรนจ์ในระบบให้มีค่าคงที่ แต่จะส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดเล็กลงเมื่อลดอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นและเพิ่มความเร็วยรอบของการกวน ซึ่งจะมีผลให้ความเร็วของการตกตะกอนลดลงด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วยรอบของการกวนจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากความหนาแน่นของตะกอนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ดีขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อผู้ผลิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....

4270301721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : COPRECIPITATION / CALCIUM CARBONATE / MAGNESIUM HYDROXIDE
RATE OF SEDIMENTATION

CHAIYANUN TANGTONG : STUDY OF COPRECIPITATION OF CALCIUM AND
MAGNESIUM ION IN THE FORM OF CALCIUM CARBONATE AND MAGNESIUM
HYDROXIDE. THESIS ADVISOR : WIT SOONTARANUN, Ph.D., 171 pp. ISBN :
974-17-1054-2

Coprecipitation of calcium and magnesium ions as calcium carbonate and magnesium hydroxide in comparison to sole precipitation of each substance was studied. The results showed that the pH of coprecipitation was higher than that of calcium carbonate precipitation but lower than that of magnesium hydroxide precipitation, resulting in the decrease of calcium ions and the increase of magnesium ion. However, such effect vanished upon equalizing pH. From the observation of the structure of the precipitate, it was found that calcium carbonate and magnesium hydroxide crystal could be combined and yielded the coprecipitate having size and density in between those of magnesium hydroxide and calcium carbonate. Therefore, the rate of sedimentation of the coprecipitate was faster than magnesium hydroxide but slower than that of calcium carbonate. The alteration of ratio between calcium to magnesium ion in coprecipitation and/or the speed of agitation had small influence on the pH of precipitation, and the remaining calcium and magnesium ions in the solution. This was due to the control of ionic strength. However, the decrease of ratio between calcium and magnesium ions and/or the increase of agitation speed resulted in the coprecipitate of a smaller size and hence, the reduction of the rate of sedimentation. Nevertheless, as high agitation speed, the rate of sedimentation became increasing again. This was believed to be due to the formation of calcium carbonate and magnesium hydroxide agglomerate of high density.

Department....Chemical Engineering.....Student's signature.....

Field of study..Chemical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.....2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และ อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และห้องปฏิบัติการเคมี และห้องปฏิบัติการวิจัยชีวเคมี ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยและห้องปฏิบัติการวิจัยชีวเคมีที่ได้ให้กำลังใจและคำแนะนำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน.....	4
2.1.1 สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต	5
2.1.2 สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	8
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	10
2.2 กระบวนการเกิดผลึก.....	14
2.2.1 ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด.....	14
2.2.2 การเกิดนิวเคลียส.....	14
2.2.3 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเพิ่มขนาดของผลึก.....	15
2.2.4 กระบวนการรวมตัวกันของผลึก.....	16
2.3 กระบวนการตกตะกอน.....	19
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค.....	19
2.3.2 การทดลองการตกตะกอนแบบกะ.....	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	23
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	27

	หน้า
2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	29
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 วิธีการทดลอง.....	33
3.2.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียม คาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	33
3.2.2 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอน ของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	36
3.2.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	37
3.2.4 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอน ของตะกอนร่วม.....	38
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	39
4.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	39
4.2 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์	51
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น.....	51
4.2.2 ผลของความเร็วยวของการกวน.....	68
4.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยเปรียบ เทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว.....	84
4.4 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอน ร่วม.....	94
4.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียม ในสารตั้งต้น.....	94
4.4.2 ผลของความเร็วยวของการกวน.....	108
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	121
รายการอ้างอิง.....	122

	หน้า
ภาคผนวก.....	124
ก. การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	125
ข. วิธีการวิเคราะห์.....	132
ค. วิธีการคำนวณความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียม คาร์บอเนต.....	135
ง. ตารางผลการทดลอง	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	171



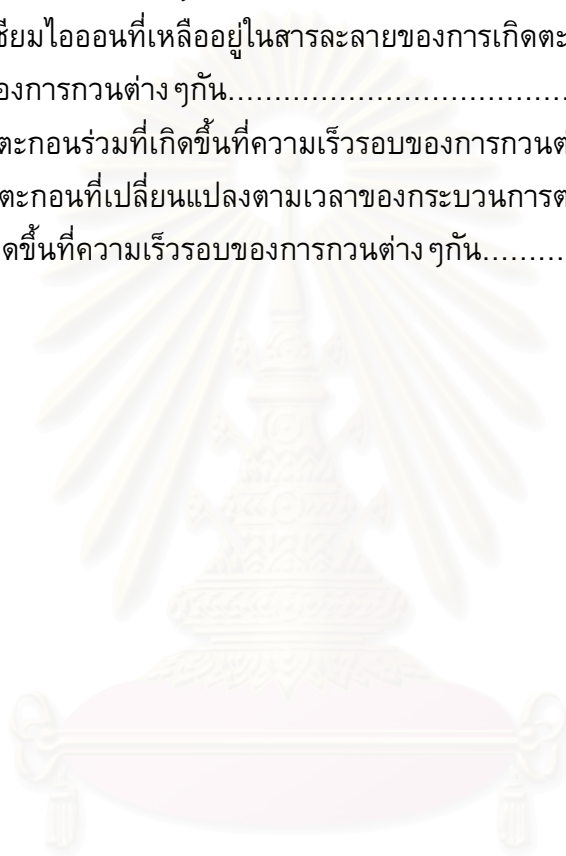
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน.....	4
3.1 ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่าง ๆ กัน.....	38
4.1 ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่าง ๆ กัน.....	94
ง.1 ค่า pH ของเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	136
ง.2 ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	137
ง.3 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	138
ง.4 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	139
ง.5 ค่า pH ของเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	140
ง.6 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	141
ง.7 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	142
ง.8 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	143
ง.9 ค่า pH ของเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	144
ง.10 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	145
ง.11 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	146
ง.12 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	147
ง.13 ค่า pH ของเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	148

ตารางที่	หน้า
ง.14 ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน.....	149
ง.15 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวน ต่างๆกัน.....	150
ง.16 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน.....	151
ง.17 ค่า pH ของเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวน ต่างๆกัน.....	152
ง.18 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน.....	153
ง.19 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการ กวนต่างๆกัน.....	154
ง.20 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน.....	155
ง.21 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอก ไซด์และตะกอนรวม.....	156
ง.22 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียม คาร์บอเนตและการเกิดตะกอนรวม.....	157
ง.23 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และการเกิดตะกอนรวม.....	158
ง.24 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนรวม.....	159
ง.25 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนรวม.....	160
ง.26 ค่า pH ของการเกิดตะกอนรวมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อ แมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน.....	161
ง.27 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนรวมที่อัตรา ส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน.....	162
ง.28 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนรวมที่ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆกัน.....	163
ง.29 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนรวมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของ แคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน.....	164

ตารางที่	หน้า
ง.30 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ ตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อ แมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	165
ง.31 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	166
ง.32 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	167
ง.33 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	168
ง.34 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	169
ง.35 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ ตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	170



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH.....	7
2.2 ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH.....	8
2.3 ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH	10
2.4 ผลกระทบของค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก.....	15
2.5 รูปแบบการรวมตัวกันของผลึก.....	16
2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามค่า sphericity และ Reynold Number.....	20
2.7 correction (R) สำหรับกรณีการตกตะกอนแบบ hindered settling ที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาตรของของเหลวในสเลอรี.....	21
2.8 การทดลองการตกตะกอนแบบกะ.....	22
2.9 รูปแบบของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต.....	24
2.10 รูปแบบของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	27
3.1 ถึงปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2 หลอดตกตะกอนที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 รูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอน.....	33
3.4 รูปแบบการทดลองกระบวนการตกตะกอน.....	35
4.1 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	40
4.2 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	42
4.3 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	43
4.4 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	44
4.5 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนและหลังปรับค่า pH	45
4.6 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ กัน.....	46
4.7 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	47

รูปที่	หน้า
4.8 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากล่อง จูลทรทัศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	48
4.9 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	50
4.10 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	52
4.11 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของ กระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	55
4.12 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้ง ต้นต่าง ๆ กัน.....	57
4.13 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของ สารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	59
4.14 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ต่าง ๆ กัน.....	60
4.15 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสาร ตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	62
4.16 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้น ของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน	63
4.17 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้ง ต้นต่าง ๆ กัน.....	64
4.18 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	67
4.19 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	69
4.20 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิด ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของ การกวนต่าง ๆ กัน.....	71
4.21 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวน ต่าง ๆ กัน.....	73
4.22 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของ การกวนต่าง ๆ กัน.....	75

รูปที่	หน้า
4.23 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวน ต่าง ๆ กัน.....	76
4.24 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการ กวนต่าง ๆ กัน.....	78
4.25 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ ของการกวนต่าง ๆ กัน.....	79
4.26 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการ กวน ต่าง ๆ กัน.....	80
4.27 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน...	83
4.28 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอก ไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	85
4.29 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิด ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม...	87
4.30 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนร่วม.....	89
4.31 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	90
4.32 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอก ไซด์และตะกอนร่วม.....	91
4.33 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมจากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	92
4.34 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม.....	93
4.35 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียม ต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	95
4.36 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิด ตะกอนร่วมที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมใน สารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	98
4.37 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียม ต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	100
4.38 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของ แคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	102

รูปที่	หน้า
4.39 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	103
4.40 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	107
4.41 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	109
4.42 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	111
4.43 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	113
4.44 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน..	115
4.45 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	116
4.46 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน.....	119

คำอธิบายสัญลักษณ์

η	=	ค่าความหนืดของสารละลาย
ψ	=	sphericity
ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว
μ	=	ค่าความหนืดของของเหลว
χ	=	ปริมาตรของของเหลวในสเลอรี
ε_0	=	แฟกเตอร์ที่บอกถึงประสิทธิภาพในการรวมตัวกันแบบ orthokinetic
ε_p	=	แฟกเตอร์ที่บอกถึงประสิทธิภาพในการรวมตัวแบบ perikinetic
ρ_p	=	ความหนาแน่นของอนุภาค
c	=	ความเข้มข้น
C_T	=	ผลรวมความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก
$D(t)$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เวลา t
D_{max}	=	ขนาดสุดท้ายของอนุภาค
D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
f_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์แอคติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ ± 2
f_M	=	ค่าสัมประสิทธิ์แอคติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ ± 1
G	=	อัตราแรงเฉือนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
I	=	ไอออนิกสเตรนจ์
k	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann
K_{a1}	=	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1
K_{a2}	=	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 2
K_{sp}	=	ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอน
k_v	=	แฟกเตอร์รูปร่างของปริมาตร
K_w	=	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของน้ำ
$N(t)$	=	จำนวนอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายที่เวลา t
N_0	=	จำนวนอนุภาคในตอนเริ่มต้นในหน่วยปริมาตรของสารละลาย
R	=	correction factor สำหรับการตกตะกอนในกรณี hindered settling
r	=	ความเร็วรอบของการกวน
T	=	อุณหภูมิ
t	=	เวลา
$V(t)$	=	ปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายที่เวลา t

- v_H = ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในกรณี hindered settling
 v_t = ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค
 Z = ประจุไฟฟ้าของไอออน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำอ่อนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange water softening) จะก่อให้เกิดน้ำเสียจำพวกเกลือของโซเดียม แคลเซียมและแมกนีเซียมคลอไรด์ละลายอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งน้ำเสียนี้เกิดจากกระบวนการคืนสภาพ (regeneration) ของเรซินด้วยน้ำเกลือ (brine solution) การทิ้งน้ำเสียนี้จัดว่าเป็นปัญหาที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรมในหลายประเด็น ประการแรกคือเนื่องจากในน้ำเสียดังกล่าวจะมีเกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นปริมาณมาก ดังนั้นการทิ้งน้ำเสียนี้จึงเป็นการสูญเสียเกลือโซเดียมคลอไรด์โดยเปล่าประโยชน์ ประการที่สองคือผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมคือ หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำธรรมชาติ เกลือโซเดียมคลอไรด์จะทำให้คุณภาพของน้ำต่ำลงโดยจะส่งผลให้คุณภาพของดินเสื่อมจนไม่สามารถใช้ในการเพาะปลูกได้และยังเป็นพิษต่อพืชบางชนิด นอกจากนี้เกลือของแคลเซียมและแมกนีเซียมคลอไรด์จะเป็นตัวการสำคัญในการเพิ่มความกระด้างให้กับแหล่งน้ำอันจะก่อให้เกิดปัญหาตามมาเมื่อนำน้ำนั้นไปใช้ในอุตสาหกรรมหรือในครัวเรือน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้จึงควรทำการกำจัดไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมออกจากน้ำเสียดังกล่าวแล้วนำน้ำเกลือนั้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีการที่เหมาะสมคือ การทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนโดยใช้สารเคมีคือสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ โดยจะเกิดเป็นตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดการตกตะกอนแยกออกมา อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการดังกล่าวจะประสบปัญหาเนื่องจากตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเจลซึ่งต้องใช้เวลานานมากในการตกตะกอนให้สมบูรณ์ (Karsten ,1976 และ Popper และคณะ, 1970) Karsten (1976) ทำการแก้ปัญหาี้โดยทำการควบคุมปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำเกลือที่ผ่านการคืนสภาพเรซินแล้วให้ต่ำกว่า 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้ ส่วน Popper และคณะ (1970) ทำการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการกรองแบบพิเศษ เนื่องจากการกรองแบบปกติจะทำให้เกิดการอุดตันของเจลบนผ้ากรอง ดังนั้น Popper จึงใช้หลักการให้แรงที่ทำให้สลูรี (slurry) เคลื่อนที่เป็นตัวที่ทำให้ตะกอนที่อุดตันอยู่หลุดออกมา โดยหลักการนี้จะสามารถทำแยกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการกำจัดน้ำเสียดังกล่าวเป็นกระบวนการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของ

กระบวนการนี้จึงควรจะมีผลเกี่ยวข้องเกี่ยวกับกระบวนการเกิดตะกอนและการตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการศึกษานิววิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวยังคงมีน้อย ทำให้ความเข้าใจในกระบวนการนี้ยังคงไม่ชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำความเข้าใจในกระบวนการที่เกิดขึ้นและสามารถนำหลักการที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจถึงกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยในกระบวนการเกิดตะกอนจะพิจารณาถึงค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และในกระบวนการตกตะกอนจะพิจารณาถึงความเร็วของการตกตะกอน

2. ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆอันได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความเร็วรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยในกระบวนการเกิดตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และในกระบวนการตกตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

3. ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว โดยในกระบวนการเกิดตะกอนจะพิจารณาถึงผลของการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และในกระบวนการตกตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

4. ศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆอันได้แก่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นและความเร็วรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตก

ตะกอนของตะกอนร่วม โดยในกระบวนการเกิดตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และในกระบวนการตกตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

5. การทดลองนี้จะศึกษาที่ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นอยู่ในช่วง 6,000 – 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการคั้นสภาพเรซินและทำการทดลองที่สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

จากการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะยังผลให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการดังกล่าวและสามารถนำหลักการที่ได้ไปใช้ในการหาแนวทางในการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนออกจากน้ำเกลือที่ผ่านกระบวนการคั้นสภาพเรซินเพื่อนำน้ำเกลือนั้นกลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมทั่วไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน

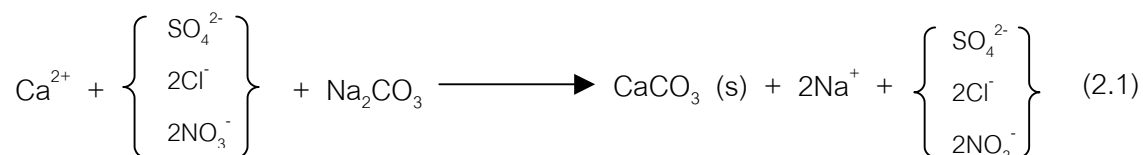
เนื่องจากสารประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน (Peavy และคณะ, 1985)

สารประกอบ	สูตรทางเคมี	ค่าการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ 0 °C)
Calcium chloride	CaCl ₂	336,000
Calcium hydroxide	Ca(OH) ₂	2,390
Calcium bicarbonate	Ca(HCO ₃) ₂	1,620
Calcium sulfate	CaSO ₄	1,290
Calcium carbonate	CaCO ₃	15
Magnesium chloride	MgCl ₂	362,000
Magnesium sulfate	MgSO ₄	170,000
Magnesium bicarbonate	Mg(HCO ₃) ₂	37,100
Magnesium carbonate	MgCO ₃	101
Magnesium hydroxide	Mg(OH) ₂	17

ซึ่งรูปแบบที่มีค่าความสามารถในการละลายน้อยที่สุดสำหรับสารประกอบของแคลเซียมคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และสำหรับสารประกอบของแมกนีเซียมคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) ดังนั้นในการกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนออกจากสารละลายมักใช้หลักการเปลี่ยนรูปไอออนเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีค่าความสามารถในการละลายต่ำแล้วเกิดการตกตะกอนแยกออกมา ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการเกิดตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

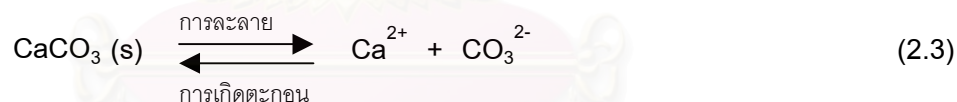
โดยปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถแสดงได้ดังนี้



เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสมดุลการละลายของตะกอน ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

2.1.1 สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อนำสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงกว่าค่าการละลายมาละลายน้ำพบว่าเกิดสภาวะสมดุลกันระหว่างกระบวนการละลายหรือการแตกตัวของสารประกอบไปเป็นไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำกับกระบวนการรวมตัวของไอออนกลายเป็นสารประกอบหรือของแข็งซึ่งอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีดังนี้



โดยสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีดังนี้

$$K_{\text{sp}} (\text{CaCO}_3) = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.4)$$

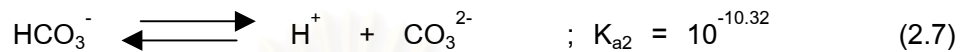
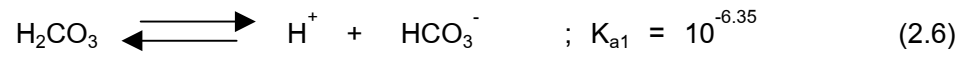
เมื่อ $K_{\text{sp}}(\text{CaCO}_3)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าเท่ากับ $10^{-8.34}$ ที่ 25°C (Snoeyink และ Jenkins, 1980)

$[\text{Ca}^{2+}], [\text{CO}_3^{2-}]$ คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมและคาร์บอเนตไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

จากสมการที่ 2.4 จะสามารถคำนวณปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เกิดจากละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้จาก

$$[\text{Ca}^{2+}] = \frac{K_{sp}(\text{CaCO}_3)}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (2.5)$$

ซึ่งความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะสามารถคำนวณได้จากสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกดังนี้ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)



เมื่อ K_{a1} , K_{a2} คือ ค่าคงที่ของสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่ 25°C ตามลำดับ

โดยที่

$$K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad (2.8)$$

$$K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2.9)$$

ซึ่งผลรวมของความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลจะเท่ากับ C_T และมีสมการดังนี้

$$C_T = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.10)$$

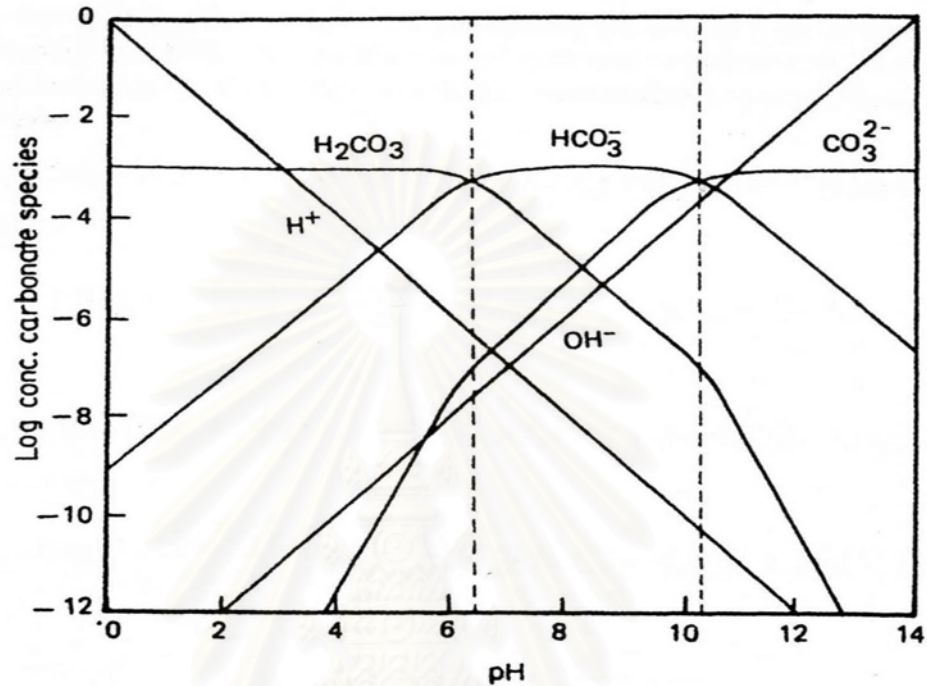
จากสมการที่ 2.8 2.9 และ 2.10 จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกได้ว่า

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \frac{C_T [\text{H}^+]^2}{([\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2})} \quad (2.11)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{C_T K_{a1} [\text{H}^+]}{([\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2})} \quad (2.12)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{C_T K_{a1} K_{a2}}{([\text{H}^+]^2 + K_{a1}[\text{H}^+] + K_{a1}K_{a2})} \quad (2.13)$$

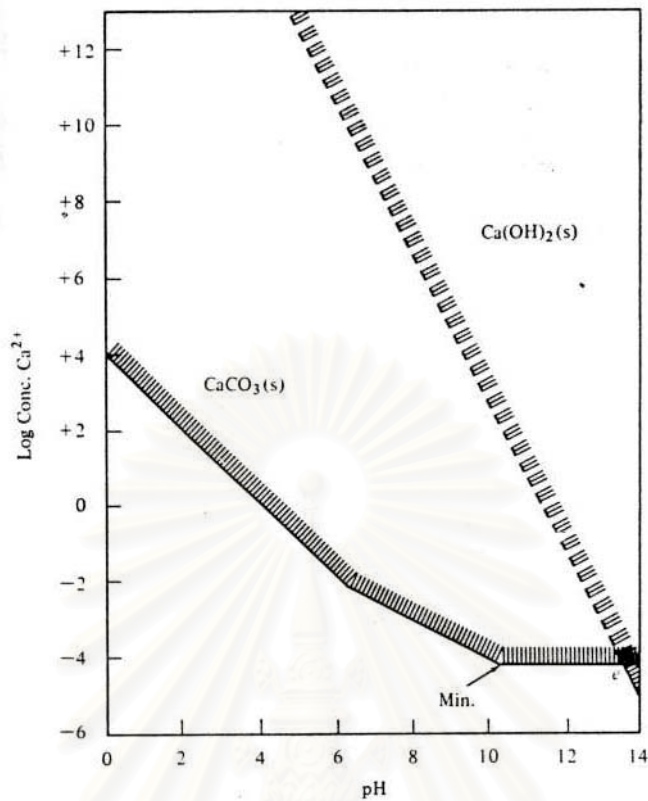
จากสมการดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดจะเปลี่ยนแปลงตามค่า pH ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH (Gehm และ Bregman, 1976)

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า pH ของสารละลายจะส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายลดลง ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

นอกจากนี้รูปที่ 2.2 ยังได้แสดงเส้นกราฟของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจากรูปที่ 2.2 จะพบว่าแคลเซียมไอออนจะตกตะกอนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงที่ค่า pH ต่ำกว่า 13.6 แต่เมื่อค่า pH มากกว่า 13.6 แคลเซียมไอออนจะตกตะกอนในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทน

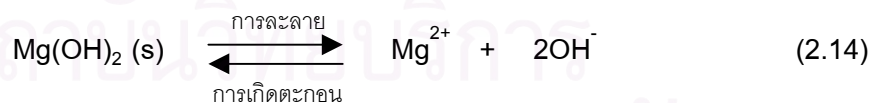


รูปที่ 2.2 ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH (Gehm และ Bregman, 1976)

2.1.2 สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีดัง

นี้



โดยมีสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์คือ

$$K_{\text{sp}} (\text{Mg(OH)}_2) = [\text{Mg}^{2+}][\text{OH}^-]^2 \quad (2.15)$$

เมื่อ $K_{\text{sp}}(\text{Mg(OH)}_2)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และมีค่าเท่ากับ $10^{-10.7}$ ที่ 25°C (Snoeyink และ Jenkins, 1980)

$[Mg^{2+}]$, $[OH^-]$ คือ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมและไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

จากสมการที่ 2.15 จะสามารถคำนวณหาปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เกิดจากละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้จาก

$$[Mg^{2+}] = \frac{K_{sp}(Mg(OH)_2)}{[OH^-]^2} \quad (2.16)$$

และจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของน้ำ (K_w)

$$K_w = [H^+][OH^-] \quad (2.17)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะได้ว่า

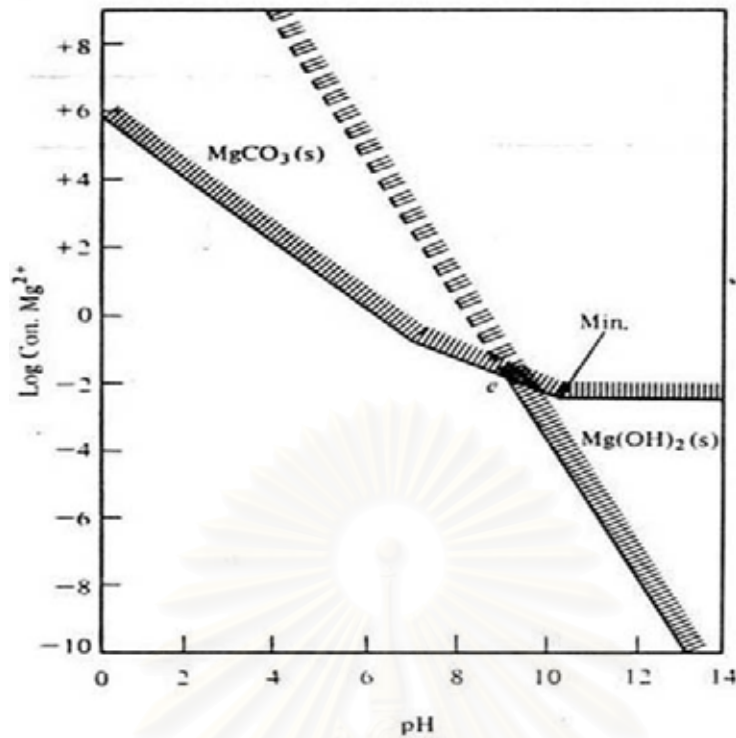
$$[Mg^{2+}] = \frac{K_{sp}}{[OH^-]^2} \quad (2.18)$$

แปลงสมการที่ 2.18 ให้อยู่ในรูปของลอการิทึมฟังก์ชันจะได้ว่า

$$\log [Mg^{2+}] = \log K_{sp} - 2\log K_w - 2pH \quad (2.19)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.19 จะสามารถวาดกราฟแสดงค่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH ได้ดังรูปที่ 2.3

นอกจากนี้รูปที่ 2.3 ยังได้แสดงเส้นกราฟของสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจากรูปที่ 2.3 จะพบว่าแมกนีเซียมไอออนจะตกตะกอนในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อ pH มีค่ามากกว่า 9.1 แต่จะตกตะกอนในรูปแมกนีเซียมคาร์บอเนตเมื่อ pH ต่ำกว่า 9.1



รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH (Gehm และ Bregman, 1976)

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก. อุณหภูมิ

ค่าคงที่สมดุลของการละลาย (K_{sp}) ของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยมีความสัมพันธ์กันดังนี้ (Loewenthal และ Marais , 1976)

$$pK_{sp}(\text{CaCO}_3) = 0.01183T + 8.03 \quad (2.20)$$

$$pK_{sp}(\text{Mg(OH)}_2) = 0.0175T + 9.97 \quad (2.21)$$

เมื่อ $pK_{sp} = -\log [K_{sp}]$

T คือ อุณหภูมิในหน่วย $^{\circ}\text{C}$ (0 – 80 $^{\circ}\text{C}$)

จากสมการที่ 2.20 และ 2.21 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า pK_{sp} ของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น หรือค่า K_{sp} มีค่าลดลงซึ่งหมายความว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ข. ความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในสารละลาย

โดยทั่วไปในสมการสมดุลเคมีมักจะสมมุติให้สารละลายเป็นสารละลายอุดมคติ (ideal solution) แต่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูง อนุภาคในสารละลายจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปจากสารละลายอุดมคติ โดยเมื่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ค่าแอกติวิตี (activity) ของไอออนมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในสารละลาย โดยค่าแอกติวิตีจะถูกลดลงด้วยแฟกเตอร์ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (activity coefficient) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$f_i = \gamma_i [i] \quad (2.22)$$

- เมื่อ (i) คือ ค่าแอกติวิตีของไอออน i
 [i] คือ ค่าความเข้มข้นของไอออน i
 γ_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออน i

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายถึงความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าในสารละลายคือค่าไอออนิกสเตรงท์ (ionic strength) และมีสมการดังนี้

$$\text{ionic strength} = I = \frac{1}{2} \sum (c_i Z_i)^2 \quad (2.23)$$

- เมื่อ c_i คือ ความเข้มข้นของไอออน i ในสารละลาย (โมลาร์)
 Z_i คือ ประจุไฟฟ้าของไอออน i ในสารละลาย

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_i) ของไอออนที่ประจุไฟฟ้าเท่ากับ Z ในสารละลายที่มีค่าไอออนิกสเตรงท์เท่ากับ I จะสามารถคำนวณได้จาก Davies Equation ซึ่งมีสมการดังนี้ (Loewenthal และ Marais, 1976)

$$\log f_i = -0.5Z^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.2I \right) \quad \text{เมื่อ } I < 0.5 \text{ โมลาร์} \quad (2.24)$$

ดังนั้นจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (สมการที่ 2.4) จะสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยคำนึงถึงผลของไอออนิกสเตรงท์ได้ว่า

$$K_{sp}(\text{CaCO}_3) = (\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-}) \quad (2.25)$$

$$= f_D[\text{Ca}^{2+}]^*f_D[\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.26)$$

เมื่อ f_D คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุ ± 2

จัดรูปสมการที่ 2.26 ใหม่จะได้ว่า

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_{sp}(\text{CaCO}_3)}{f_D^2} = K'_{sp}(\text{CaCO}_3) \quad (2.27)$$

เมื่อ $K'_{sp}(\text{CaCO}_3)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายที่รวมผลของไอออนิกสเตรงท์ไว้

ในทำนองเดียวกันจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (สมการที่ 2.15) จะสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยคำนึงผลของไอออนิกสเตรงท์ได้ว่า

$$K_{sp}(\text{Mg(OH)}_2) = (\text{Mg}^{2+})(\text{OH}^-)^2 \quad (2.28)$$

$$= f_D[\text{Mg}^{2+}]^*f_m^2[\text{OH}^-]^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ f_m คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ ± 1

จัดรูปสมการที่ 2.29 ใหม่จะได้ว่า

$$[\text{Mg}^{2+}][\text{OH}^-] = \frac{K_{sp}(\text{Mg(OH)}_2)}{f_D f_m^2} = K'_{sp}(\text{Mg(OH)}_2) \quad (2.30)$$

เมื่อ $K'_{sp}(\text{Mg(OH)}_2)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายที่รวมผลของไอออนิกสเตรงท์ไว้

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_m และ f_D) จะมีค่าลดลงเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากสมการที่ 2.27 และ 2.30 จะพบว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากขึ้น นั่นคือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายได้เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายยังมีผลต่อสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกโดยจะส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

จากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 (สมการที่ 2.8 และ 2.9) จะสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยคำนึงถึงผลของไอออนิกสเตรงท์ได้ว่า

$$K_{a1} = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(H_2CO_3)} = \frac{f_m[H^+] * f_m[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (2.31)$$

$$K_{a2} = \frac{(H^+)(CO_3^{2-})}{(HCO_3^-)} = \frac{f_m[H^+] * f_d[CO_3^{2-}]}{f_m[HCO_3^-]} \quad (2.32)$$

จัดรูปสมการที่ 2.31 และ 2.32 ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = \frac{K_{a1}}{f_m^2} = K'_{a1} \quad (2.33)$$

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{K_{a2}}{f_d} = K'_{a2} \quad (2.34)$$

เมื่อ K'_{a1} และ K'_{a2} คือ ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่รวมผลของไอออนิกสเตรงท์ไว้

เนื่องจากค่าไอออนิกสเตรงท์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_m และ f_d) มีค่าลดลง ดังนั้นจากสมการที่ 2.33 และ 2.34 จะได้ว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น

เนื่องจากกระบวนการเกิดตะกอนดังกล่าวเป็นกระบวนการเกิดผลึกชนิดหนึ่ง (Crystallization) ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดผลึก

2.2 กระบวนการเกิดผลึก

กระบวนการเกิดผลึกเป็นกระบวนการเกิดอนุภาคของแข็งในสารละลายที่เป็นของเหลวโดยที่ตัวถูกละลายภายในของเหลวจะถูกทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่ามากกว่าค่าการละลายของตัวเอง ตัวถูกละลายก็จะออกจากสารละลายเกิดเป็นอนุภาคของแข็งขึ้นมา กระบวนการเกิดผลึกจะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอนคือ การเกิดนิวเคลียสใหม่หรือที่เรียกว่า nucleation และการเพิ่มขนาดของผลึกหรือที่เรียกว่า crystal growth โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสใหม่จะเกิดขึ้นก่อนจากนั้นกระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกจึงเกิดตามมา ปัจจัยสำคัญในการผลักดันทั้งสองขั้นตอนก็คือค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด

2.2.1 ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด

ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายจะเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดที่ผลึกเกิดขึ้นกับสารละลายอิ่มตัวที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับผลึก สำหรับกระบวนการเกิดตะกอนสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดจะเกิดเนื่องจากการเติมสารตกตะกอน (precipitant) ลงไปซึ่งจะทำให้ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าที่สูงมากในเวลาอันรวดเร็ว

2.2.2 การเกิดนิวเคลียส

การเกิดนิวเคลียสของอนุภาคของแข็งในสารละลายจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ก. การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิ (Primary nucleation)

การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมินี้หมายถึงการเกิดอนุภาคใหม่ในสารละลายที่ไม่มีอนุภาคของของแข็งนั้นอยู่และเป็นผลจากความอิ่มตัวยิ่งยวดเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ โฮโมจีเนียสนิวเคลียชัน (homogeneous nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสภายใต้สภาวะที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อม เช่นผนังของภาชนะหรืออนุภาคของแข็งของสารชนิดอื่น อีกประเภทหนึ่งคือเฮเทอโรจีเนียสนิวเคลียชัน (heterogeneous nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสที่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจจะมีผลเร่งให้อัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น

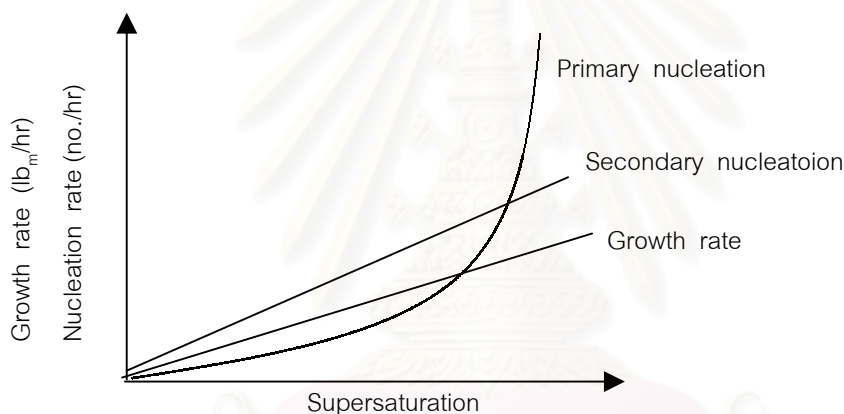
ข. การเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิ (secondary nucleation)

การเกิดนิวเคลียสแบบนี้จะเกิดขึ้นจากผลึกเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยจะเกิดจากการชนกันระหว่างผลึกกับผลึกด้วยกันเองหรือระหว่างผลึกกับผนังของภาชนะหรือใบพัดซึ่งจะทำให้นิวเคลียสบนผิวของผลึกที่กำลังเพิ่มขนาดหลุดออกแล้วไปรวมตัวกันเป็นผลึกใหม่ขึ้นมา เราเรียกการเกิดนิวเคลียสแบบนี้ได้อีกอย่างว่า contact nucleation หรือ collision breeding

2.2.3 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเพิ่มขนาดของผลึก

ก. อัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Rate)

อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเป็นผลรวมของอัตราการเกิดนิวเคลียสที่เกิดจากการเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิและการเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิ โดยทั้งสองแบบจะขึ้นกับค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดดังรูปที่ 2.4 จากรูปจะเห็นได้ว่าการเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิเป็นกระบวนการที่ต้องการค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงและอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลกับค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด ซึ่งจะทำให้เมื่อความอิ่มตัวยิ่งยวดเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเปลี่ยนไปอย่างมาก ส่วนการเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิจะมีอิทธิพลที่เด่นชัดในช่วงที่ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าต่ำเนื่องจากอัตราการเกิดนิวเคลียสดังกล่าวเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด นอกจากนี้อัตราการเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิหรือ contact nucleation ยังคงขึ้นกับพลังงานที่เกิดจากการชนกันของผลึกซึ่งจะขึ้นอยู่กับมวลของผลึกที่ชนกันและความเร็วรอบของใบพัด (Rousseau, 1987)



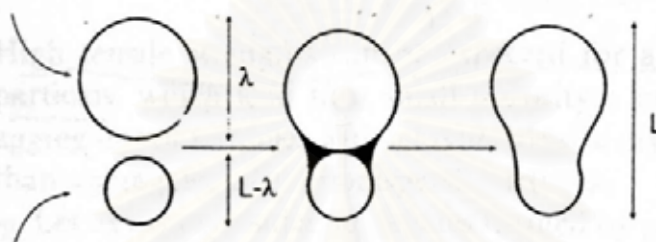
รูปที่ 2.4 ผลกระทบของค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก (Rousseau, 1987)

ข. อัตราการเพิ่มขนาดของผลึก (Growth Rate)

การเพิ่มขนาดของผลึกเป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังพื้นผิวที่กำลังเพิ่มขนาดของผลึกโดยวิธีการแพร่ผ่านของเหลวและเมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเคลื่อนที่ถึงผิวของผลึกจะเกิดการจับเรียงตัวกันบนผิวของผลึกซึ่งทั้งสองขั้นตอนจะเกิดขึ้นในสารละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวดเท่านั้น ผลกระทบของความอิ่มตัวยิ่งยวดต่ออัตราการเพิ่มขนาดของผลึกแสดงไว้ในรูปที่ 2.4

2.2.4 กระบวนการรวมตัวกันของผลึก

โดยทั่วไปอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดผลึกมักจะไม่ใช่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆแต่มักจะเกิดรวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือที่เรียกว่า “agglomeration” ซึ่งเกิดจากการที่ผลึกเคลื่อนที่เข้ามาชนแล้วเกิดการเชื่อมกันระหว่างผลึก (crystalline bridge) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งกระบวนการรวมตัวกันนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของการชนกันของผลึกและความสามารถในการเชื่อมผลึกเข้าด้วยกัน ทั้งนี้กระบวนการรวมตัวกันระหว่างผลึกจะเกิดในสารละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวดเท่านั้น



รูปที่ 2.5 รูปแบบการรวมตัวกันของผลึก

กระบวนการรวมตัวกันนี้ถ้าเกิดจากการชนกันเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบิสระ (Brownian motion) จะเรียกว่า “perikinetic” และถ้าเกิดจากการเคลื่อนที่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวจะเรียกว่า “orthokinetic” ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

จลนศาสตร์ของการรวมตัวกันแบบ perikinetic อธิบายได้โดย (Sonel และ Mullin,1991)

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \frac{4kT\varepsilon_p N^2(t)}{3\eta} \quad (2.35)$$

เมื่อ $N(t)$ คือ จำนวนอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายที่เวลา t หลังจากผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกัน

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ε_p คือ แฟกเตอร์ที่บอกถึงประสิทธิภาพในการรวมตัวแบบ perikinetic

η คือ ค่าความหนืดของสารละลาย

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.35 จะได้สมการที่แสดงจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาดังนี้

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + \frac{4\mathcal{E}_0 k T N_0 t}{3\eta}} \quad (2.36)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนอนุภาคในตอนเริ่มต้น (ก่อนจะเกิดการรวมตัวกัน) ในหนึ่งหน่วย ปริมาตรของสารละลาย

t คือ เวลา

จลนศาสตร์ของการรวมตัวกันแบบ orthokinetic อธิบายได้โดย (Sonel และ Mullin, 1991)

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \frac{2\mathcal{E}_0 G D^3(t) N^2(t)}{3} \quad (2.37)$$

เมื่อ \mathcal{E}_0 คือ แฟกเตอร์ที่บอกถึงประสิทธิภาพในการรวมตัวกันแบบ orthokinetic

G คือ อัตราของแรงเฉือนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว

$D(t)$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เวลา t

จากสมการแสดงปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลาย

$$V(t) = D^3(t) N(t) k_v \quad (2.38)$$

เมื่อ $V(t)$ คือ ปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายที่เวลา t หลังจากผสมสารตั้งต้นเข้าด้วยกัน

k_v คือ แฟกเตอร์รูปร่างของปริมาตร

สมมติให้ปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารละลายมีค่าคงที่และเท่ากับ V_1 เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.37 โดยมีสมการที่ 2.38 ช่วยจะได้สมการแสดงจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่อยู่ในสารละลายซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาดังนี้

$$N(t) = N_0 \exp\left(\frac{-2\mathcal{E}_0 V_1 G t}{3k_v}\right) \quad (2.39)$$

จากนั้นทำการเปลี่ยนสมการที่ 2.36 และ 2.39 ให้อยู่ในรูปของสมการที่แสดงขนาดของอนุภาคโดยใช้สมการที่ 2.38 ช่วยจะได้ว่า

สำหรับ perikinetic

$$D^3(t) = A_1 + B_1 t \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$A_1 = \frac{V_1}{k_v N_0} \quad (2.41)$$

$$B_1 = \frac{4\epsilon_p k T V_1}{3\eta k_v} \quad (2.42)$$

สำหรับ orthokinetic

$$\log D(t) = A_2 + B_2 t \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$A_2 = \log\left(\frac{V_1}{k_v N_0}\right)^{1/3} \quad (2.44)$$

$$B_2 = \frac{2\epsilon_0 G V_1}{2.303 * 9k_v} \quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.40 สามารถบอกได้ว่าขนาดของอนุภาคจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ 2.43 สามารถบอกได้ว่าขนาดของอนุภาคจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการกวนและความเข้มข้นของสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามสมการที่ 2.40 และที่ 2.43 จะใช้ได้เฉพาะในขั้นตอนต้นๆของกระบวนการรวมตัวกันเท่านั้น เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัดตามเวลาซึ่งไม่เป็นจริงเพราะในทางปฏิบัติแล้วภายในระยะเวลาหนึ่งขนาดของอนุภาคที่รวมตัวกันจะมีค่าสูงสุดค่าหนึ่ง (D_{max}) และจะคงที่ถ้าสถานะของกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากแรงที่เกิดจากเคลื่อนที่ของของเหลวนั้นทำให้เกิดการรวมตัวและการแตกตัว (deagglomeration) ของอนุภาคในอัตราที่เท่ากันเป็นผลให้ขนาดของอนุภาคมีค่าที่คงที่ โดยทั่วไปขนาดสุดท้าย (D_{max}) ของอนุภาคนี้จะเป็นฟังก์ชันกับความเร็วรอบของการกวน (r) และมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปที่แสดงได้ดังนี้ (Mullin และคณะ, 1989; Sonel และ Mullin, 1991)

$$D_{max} \sim r^{-n} \quad (2.46)$$

เมื่อ n คือ ค่าคงที่ค่าหนึ่งและมีอยู่ระหว่าง 0 - 3

2.3 กระบวนการตกตะกอน

จากการเกิดตะกอนทางเคมีข้างต้นจะก่อให้เกิดตะกอนของแข็งปะปนอยู่ในของเหลว ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำของเหลวใสไปใช้ประโยชน์ได้จึงจำเป็นต้องทำการแยกตะกอนของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งวิธีการที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพคือการตกตะกอน (Sedimentation) โดยอาศัยหลักการที่ว่าตะกอนของแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวย่อมจะตกตะกอนแยกตัวออกมาตัวแปรที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในกระบวนการตกตะกอนก็คือความเร็วของการตกตะกอนซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่นและรูปร่างของอนุภาครวมไปถึงความหนาแน่นและความหนืดของของเหลวด้วย

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันซึ่งปัจจัยที่สำคัญมีดังนี้

ก. ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

จากสมการของ Stoke (Stoke's equation) ที่ใช้อธิบายถึงความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคทรงกลมในสารละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำพบว่า ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจะสัมพันธ์กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคดังนี้ (Foust และคณะ, 1980)

$$v_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (2.47)$$

เมื่อ v_t คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s^2

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

μ คือ ค่าความหนืดของของเหลว

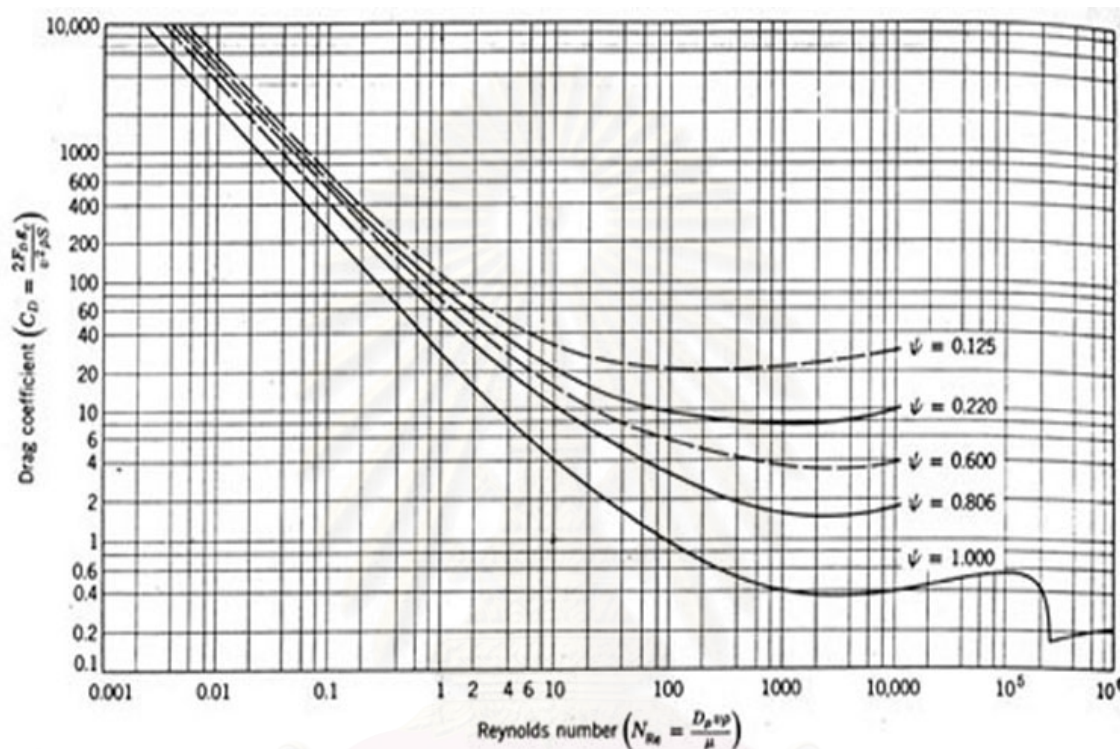
ซึ่งจากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูงขึ้นหรือความหนืดของของเหลวมีค่าลดลง

ข. รูปร่างของอนุภาค

รูปร่างของอนุภาคจะมีผลต่อความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคดังจะสังเกตเห็นได้จากรูปที่

2.6 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาค (drag

coefficient) กับค่า sphericity (ψ) ที่ค่า Reynolds Number ต่างๆกัน โดยจากรูปจะพบว่ายิ่งอนุภาคมีรูปร่างแตกต่างจากทรงกลมมากๆ (sphericity น้อยกว่า 1 มากๆ) ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคก็จะยิ่งมากขึ้น ส่งผลให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วของการตกตะกอนลดลง



รูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาค (drag coefficient) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า sphericity และ Reynold Number (Foust และคณะ, 1980)

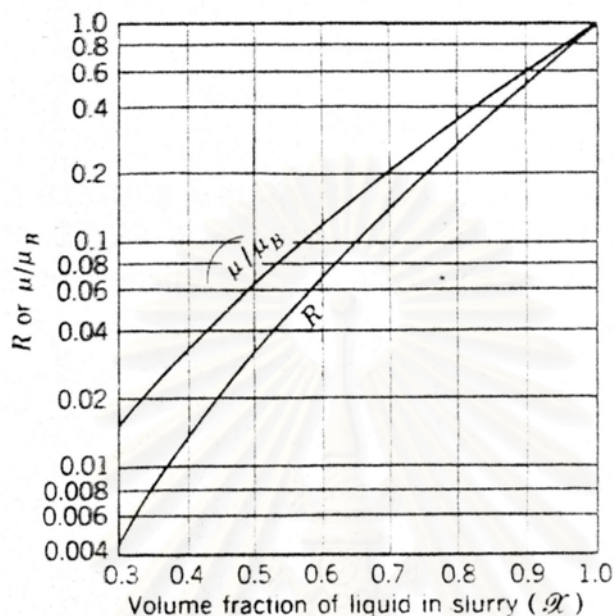
ค. ความเข้มข้นของอนุภาค

ความเข้มข้นของอนุภาคจะมีผลที่สำคัญต่อความเร็วของการตกตะกอน โดยเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกขัดขวางจากอนุภาคอื่นที่แวดล้อมอยู่ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “hindered settling” โดยที่ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในกรณีนี้จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคที่คำนวณได้จาก Stoke's equation ซึ่งมีสมการดังนี้ (Foust และคณะ, 1980)

$$v_H = \left\{ \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \right\} (R) \quad (2.48)$$

เมื่อ v_H คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในกรณี hindered settling

R คือ correction factor สำหรับการตกตะกอนในกรณี hindered settling ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาตรของของเหลวในสเลอรี (χ) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 corrector factor (R) สำหรับกรณีการตกตะกอนแบบ hindered settling ที่ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาตรของของเหลวในสเลอรี (χ) (Foust และคณะ, 1980)

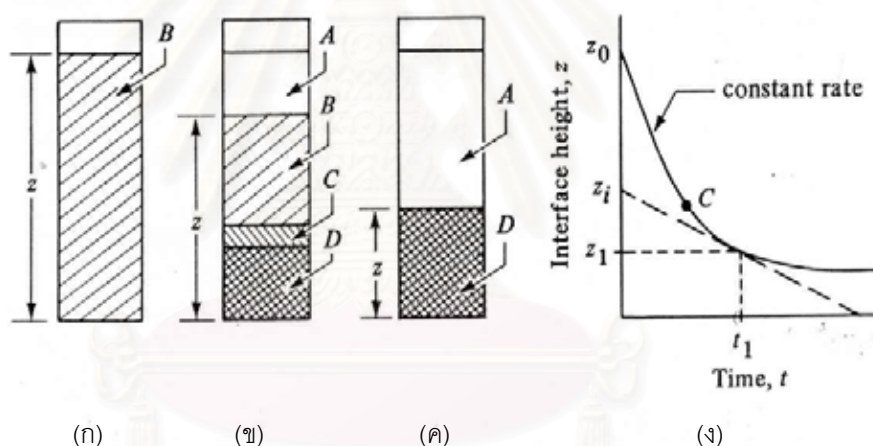
ง. การรวมตัวกันของอนุภาค

การรวมตัวของอนุภาคในกระบวนการตกตะกอนจะช่วยให้การเปลี่ยนกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอให้มารวมกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งจะช่วยเพิ่มความเร็วในการตะกอนได้มาก รูปร่างและความหนาแน่นของอนุภาคที่รวมตัวกันนี้จะแตกต่างจากอนุภาคเดี่ยวๆในตอนเริ่มต้นและไม่สามารถใช้สมการในการทำนายได้ ในทางปฏิบัติการรวมตัวของอนุภาคมักจะถูกเร่งโดยการใส่สารช่วยในการรวมตัวกัน (Flocculant) แต่ในบางกรณีการรวมตัวกันของอนุภาคสามารถเกิดขึ้นเองได้ถ้าอนุภาคในของเหลวมีคุณสมบัติในการดึงดูดกับอนุภาครอบข้างโดยไม่ต้องมีการเติมสารช่วยในการรวมตัวกัน

อย่างไรก็ดีเนื่องจากอนุภาคในสารละลายมักจะมีความหนาแน่นไม่เท่ากันทำให้ไม่สามารถใช้สมการทำนายความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคได้ ซึ่งในกรณีนี้ความเร็วของการตกตะกอนจะสามารถหาได้จากการทดลองการตกตะกอนแบบกะ (Batch settling test) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.2 การทดลองการตกตะกอนแบบกะ

การหาความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจากการทดลองการตกตะกอนแบบกะ (Batch settling test) สามารถทำได้โดยนำสารละลายที่มีอนุภาคกระจายอยู่สม่ำเสมอมาใส่ในท่อรูปทรงกระบอกแล้วปล่อยให้เกิดการตกตะกอนดังรูปที่ 2.8 เมื่อเริ่มต้นทำการตกตะกอนอนุภาคในโซน B จะตกตะกอนด้วยความเร็วที่คงที่และเกิดการแบ่งชั้นของตะกอนเกิดขึ้นของเหลวใสในโซน A โดยที่ความสูง Z จะลดลงอย่างคงที่ จากนั้นโซน D ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคที่ตกตะกอนแล้วจะปรากฏ โซน C จะเป็นช่วงรอยต่อระหว่างความเข้มข้นของโซน B และ D เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นโซน B และ C จะหายไปและการกักตัวของชั้นตะกอนจะเกิดขึ้น ณ จุดนี้เราเรียกว่า critical point ระหว่างการกักตัวของชั้นตะกอนของเหลวที่อยู่บนชั้นของตะกอนจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ขึ้นและความสูงของโซน D จะลดลงตามลำดับ ซึ่งความเร็วของการตกตะกอนจะหาได้จากการวาดกราฟความสูงของชั้นตะกอนกับเวลา ซึ่งความชันของกราฟที่คงที่ในช่วงแรกคือความเร็วของการตกตะกอน



รูปที่ 2.8 การทดลองการตกตะกอนแบบกะ (ก) สารละลายเริ่มต้นก่อนทำการตกตะกอน (ข) โซนต่าง ๆ เมื่อทำการตกตะกอนไประยะเวลาหนึ่ง (ค) การกักตัวของชั้นตะกอน (ง) กราฟแสดงความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

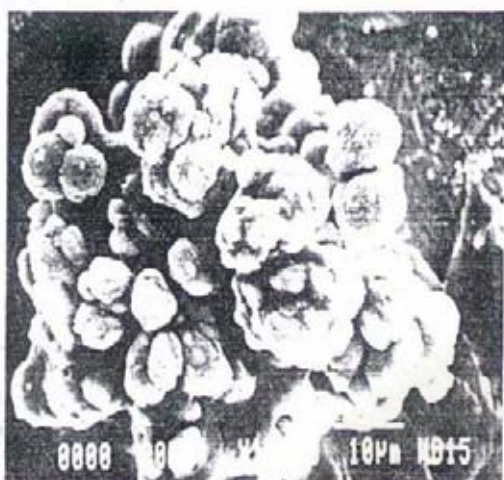
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีลักษณะโครงสร้างและขนาดของผลึกแตกต่างกันไปตามสภาวะของการเกิดตะกอน โดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ก. ลักษณะของผลึก

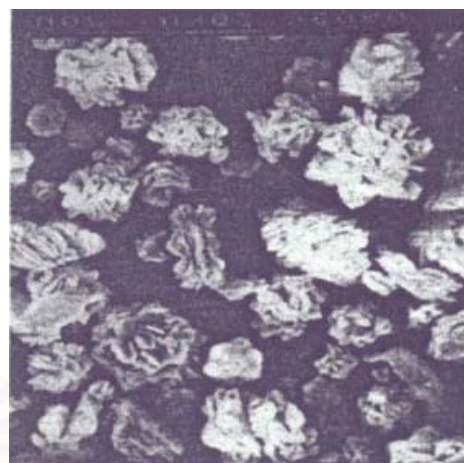
โดยทั่วไปผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบด้วยกันคือ

1. แคลไซต์ (calcite) มีลักษณะผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้าหรือที่เรียกว่า rhombohedron
2. อะราโกไนท์ (aragonite) มีลักษณะผลึกเป็นแท่งปริซึมหรือแท่งพีรามิดคู่หรือที่เรียกว่า orthorhombic ซึ่งมักจะเกิดการรวมตัวกันมีรูปร่างคล้ายดอกกุหลาบ
3. วาเทอไรท์ (vaterite) มีลักษณะผลึกเป็นทรงกลม

ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแบบไหนนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะระหว่างเกิดการเกิดตะกอนได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลาย ค่า pH ของการเกิดตะกอนและ อุณหภูมิ โดยปกติถ้าสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงหรือสารละลายมีความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงมักจะเกิดผลึกแบบวาเทอไรท์ ในขณะที่แคลไซต์จะเกิดในสารละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวดต่ำกว่าหรือสารตั้งต้นมีความเข้มข้นต่ำกว่า (Tai และ Chen,1995; Kabasci และคณะ,1996; Kitamura,2001) นอกจากนี้ผลึกแบบวาเทอไรท์จะเกิดในสารละลายที่มีค่า pH สูง ($pH > 9.5$) ในขณะที่ผลึกแบบแคลไซต์จะเกิดในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า ($pH \sim 8.5$) (Hostomsky และ Jones,1991) และผลึกแบบแคลไซต์และวาเทอไรท์จะเกิดขึ้นในสารละลายที่มีอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) ในขณะที่ผลึกแบบอะราโกไนท์จะเกิดในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (ประมาณ $90^{\circ}C$) (Wray และ Daniels,1957;Kabasci และคณะ,1996) โดยรูปแบบของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.9 รูปแบบของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก) Vaterite (ข) Aragonite (ค) Calcite

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอน

Maruscak และคณะ (1971) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของแคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ค่า pH ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเร็วรอบของการกวนและเวลาดังนี้

- **ค่า pH** โดยสภาวะทั่วไปอนุภาคในสารละลายจะมีประจุไฟฟ้าอยู่และมักจะทำให้ตัวเองมีประจุเป็นกลางโดยจะถูกล้อมรอบด้วยไฮดรอนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งขนาดและสัญลักษณ์ของประจุไฟฟ้าบนอนุภาคจะขึ้นอยู่กับค่า pH ดังนั้นแรงผลักระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการรวมตัวกันก็จะขึ้นอยู่กับค่า pH จากการทดลองพบว่าในช่วง pH ค่าหนึ่งค่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นสูงสุด ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่าเป็นช่วงที่อนุภาคไม่มีประจุไฟฟ้าทำให้อัตราการรวมตัวกันสูงสุด

- **ความเข้มข้นของสารตั้งต้น** ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือค่าความอิ่มตัวที่ยังยวดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายตามหลักการของการเกิดตะกอนที่มีกระบวนการรวมตัวกันเป็นกระบวนการสำคัญในการควบคุมการเพิ่มขนาดของผลึกได้ว่า เนื่องจากค่าความอิ่มตัวที่ยังยวดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของอนุภาคในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคสูงขึ้นและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคมีขนาดใหญ่

- **อุณหภูมิ** อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของตะกอนใหญ่ขึ้นซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการรวมตัวกันเป็นกระบวนการที่สำคัญในการควบคุมการเพิ่มขนาดของผลึกเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นและมีอัตราการรวมตัวกันที่สูงขึ้น

- **ความเร็วรอบของการกวน** ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของปัจจัยอื่นข้างต้นที่ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการรวมตัวกันเป็นกระบวนการที่สำคัญในการควบคุมการเพิ่มขนาดของผลึก เนื่องจากความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ในการชนกันของอนุภาคมากยิ่งขึ้นส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคมากขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบจะหยุดอยู่ที่ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการกวนส่งผลให้แรงเฉือนในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคที่รวมตัวกันเกิดการแตกตัวออกจากกัน

- **เวลา** เวลาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคน้อยมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการเพิ่มขนาดของอนุภาคจะรวดเร็วมากในช่วงต้นๆของกระบวนการการเกิดตะกอน ซึ่งการที่ขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคในสาร

ละลายที่มีความเข้มข้นของอนุภาคค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความแข็งแรงของตะกอนโดยอนุภาคของตัวถูกละลายจะเข้าไปเกาะบนผิวของตะกอนซึ่งจะช่วยยึดอนุภาคที่รวมตัวกันอยู่อย่างหลวมๆให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยของ Kabasci และคณะ, 1996 และ Kitamura, 2001 พบว่าเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงขึ้น ขนาดของอนุภาคจะเล็กลง ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนจะทำให้สารละลายมีค่าความอิมิตวียิ่งยวดที่สูงซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ในสารละลายมีอนุภาคเป็นจำนวนมากและความอิมิตวียิ่งยวดจะถูกใช้ไปในการเพิ่มขนาดของผลึกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความอิมิตวียิ่งยวดในสารละลายมีค่าลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของอนุภาคลดลง อนุภาคจึงมีขนาดเล็ก นอกจากนี้จากศึกษางานวิจัยของ Franke และ Mersmann, 1995 พบว่าการเพิ่มความเร็วยวของการกวนจะทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยวของการกวนจะทำให้การแตกตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้น อีกทั้งการเพิ่มความเร็วยวของการกวนจะทำให้สารตั้งต้นเกิดการผสมกันและเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็ว มีผลให้สารละลายมีค่าความอิมิตวียิ่งยวดสูง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น อันจะมีผลทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงเช่นกัน ซึ่งการที่ผลการทดลองดังกล่าวไม่สอดคล้องกับผลของ Maruscak และคณะ, 1971 อาจเป็นไปได้ว่า Maruscak และคณะ, 1971 ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สูงมากจนกระทั่งกระบวนการรวมตัวของผลึกมีอิทธิพลมากกว่ากระบวนการเพิ่มขนาดของผลึก

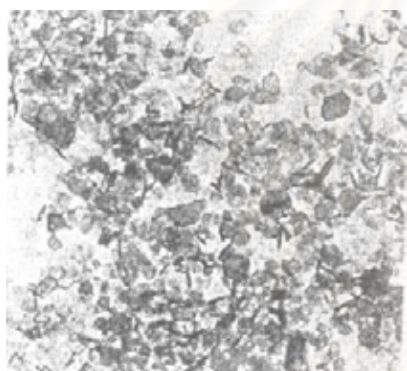
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

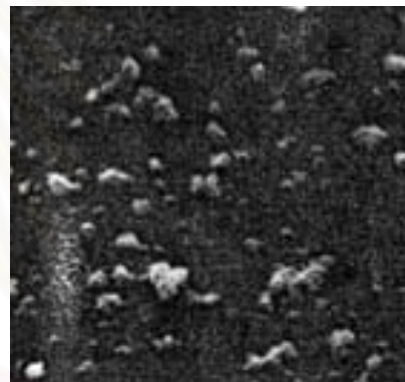
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าลักษณะโครงสร้างของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนและขนาดของตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่างๆมีดังนี้

ก. ลักษณะของผลึก

ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีลักษณะของการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐมภูมิ (Primary crystal) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นบางๆ (hexagonal thin plate) หรือที่เรียกว่าบรูไซต์ (brucite) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ± 3.5 nm มารวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นทรงกลมเรียกว่าผลึกแบบทุติยภูมิ (secondary crystal) (Mullin และคณะ,1989; Turek และ Knot,1995; Brakalov,1985) ซึ่งรูปแบบของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.10 รูปแบบของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

(ก) ผลึกแบบปฐมภูมิ (Primary Crystal) ซึ่งถ่ายจาก TEM (Transmission Electron Microscope)

(ข) ผลึกแบบทุติยภูมิ (Secondary Crystal) ซึ่งถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Microscope)

นอกจากนี้ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับกับน้ำ โดยจะเกิดการดูดน้ำไว้บนผิวของผลึก (lyosorption) ซึ่งเมื่อผลึกเหล่านี้เกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ น้ำจะถูกเก็บรวบรวมอยู่ภายในรูพรุนของผลึกที่เกาะตัวกัน ซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความหนาแน่นต่ำและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความเร็วของตกตะกอนมีค่าต่ำ (Turek และ Knot,1995)

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอน

Mullin และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่เวลา ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความเร็วรอบดังนี้

- **เวลา** ขนาดของผลึกจะมีแนวโน้มเล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นภายในช่วงต้นๆของกระบวนการโดยที่ 60-70% ของขนาดอนุภาคที่ลดลงจะเกิดภายในครึ่งชั่วโมงแรกของการเกิดตะกอน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการรวมตัวกันของอนุภาคจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและอาจจะมีขนาดใหญ่สุดได้ จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กลงอันเนื่องมาจากเกิดการแตกตัวของอนุภาค (deagglomeration) อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งขนาดของอนุภาคจะมีค่าคงที่อันเนื่องมาจากอัตราการรวมตัวกันและการแตกตัวของอนุภาคมีค่าเท่ากัน

- **ความเข้มข้นของสารตั้งต้น** ขนาดเริ่มต้นของอนุภาคที่รวมตัวกันมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคมีมาก อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งขนาดของอนุภาคจะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งขนาดสุดท้ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

- **ความเร็วรอบของการกวน** การลดลงของขนาดอนุภาคที่รวมตัวกันจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของการกวนโดยยิ่งมีความเร็วรอบมากก็จะยิ่งทำให้อนุภาคแตกตัวเร็วขึ้น ซึ่งขนาดสุดท้ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนสูงจะเล็กกว่าตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ

2.4.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การประยุกต์หลักการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้มีการกล่าวไว้ในงานวิจัยของ Leentvaar และ Rebhun (1982) และ Elmaleh และคณะ (1996) เกี่ยวกับการกำจัดอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งพบว่าการกำจัดอนุภาคของแข็งนี้จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นหลายเท่าเมื่อเพิ่มความเป็นด่างให้กับระบบซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้น โดยเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลงไป ซึ่งทั้งตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคของแข็ง ทำให้เกิดการตกตะกอนที่เร็วขึ้นและสามารถแยกอนุภาคของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะเป็นตัวทำให้เกิดกลไกที่เรียกว่า sweep coagulation ทำให้อนุภาคของแข็งขนาดใหญ่รวมตัวกันได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นสารเพิ่มน้ำหนัก (weighting agent) ให้กับอนุภาคที่รวมตัวกัน โดยจะเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคที่รวมตัวกันทำให้การตกตะกอนเร็วขึ้น ในขณะที่ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการดูดจับกับอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก เกิดกลไกที่เรียกว่า adsorption coagulation เนื่องจากโครงสร้างของตะกอนจะประกอบไปด้วยพื้นผิวที่สามารถดูดจับกับอนุภาคได้เป็นจำนวนมากและพื้นผิวของตะกอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งจะเกิดการดูดจับกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวช่วยในการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประสิทธิภาพ ประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้มีการกล่าวไว้ในงานวิจัยของ Black และ Chistman, 1961 ซึ่งทำการศึกษาประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำน้ำอ่อน โดยพบว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ในขณะที่อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกตลอดช่วง pH ที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้มีการกล่าวไว้ในงานวิจัยของ Vuuren และคณะ (1967) ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดอนุภาคของแข็งในน้ำเสียโดยใช้เทคนิค lime softening floatation โดยเติมสารละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือน้ำปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลงไป ซึ่งน้ำปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตของแมกนีเซียม ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$) ในสารละลายเกิดเป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะช่วยดูดจับกับอนุภาคของแข็งที่อยู่ในสารละลายทำให้สามารถแยกอนุภาคของแข็งได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นซึ่งจะมีลักษณะละเอียดและการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียวปกติจะใช้เวลานานในการตกตะกอนให้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในระบบจะช่วยให้การกำจัดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตง่ายขึ้น เนื่องจากโครงสร้างพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมในการดูดจับกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายให้มาอยู่รวมกันทำให้สามารถทำการแยกได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงผลกระทบจากการเกิดตะกอนร่วมของสารประกอบ 2 ชนิดที่มีผลให้คุณสมบัติของตะกอนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงไป เช่นจากงานวิจัยของ Sudmalis และ Sheikholeslami (2000) ซึ่งกล่าวถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อความสามารถในการละลายของตะกอน ลักษณะโครงสร้างของตะกอนและความแข็งแรงของตะกอน โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งพบว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะแตกต่างกันไปจากการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแต่จะใกล้เคียงกับการเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟต นอกจากนี้จากการศึกษาภาพถ่ายของตะกอนร่วมพบว่า ตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกยึดเหนี่ยวให้ติดกันโดยมีตะกอนแคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวเชื่อมอีกทั้งยังทำให้ผลึกของตะกอนทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง เมื่อพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างของตะกอนพบว่า ผลึกที่รวมตัวกันของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากกว่าผลึกที่รวมตัวกันของแคลเซียมซัลเฟตซึ่งรวมตัวกันอย่างหลวมๆ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของตะกอนร่วมพบว่าตะกอนร่วมจะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมซัลเฟตแต่จะน้อยลงเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ในทำนองเดียวกัน Chong และ Sheikholeslami (2001) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่มีต่อการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลให้สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนแปลงไปโดยจะทำให้ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าสูงขึ้น

จากผลการศึกษาที่กล่าวมาชี้ให้เห็นว่าการเกิดตะกอนร่วมของสารประกอบอาจจะส่งผลให้คุณสมบัติของตะกอนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

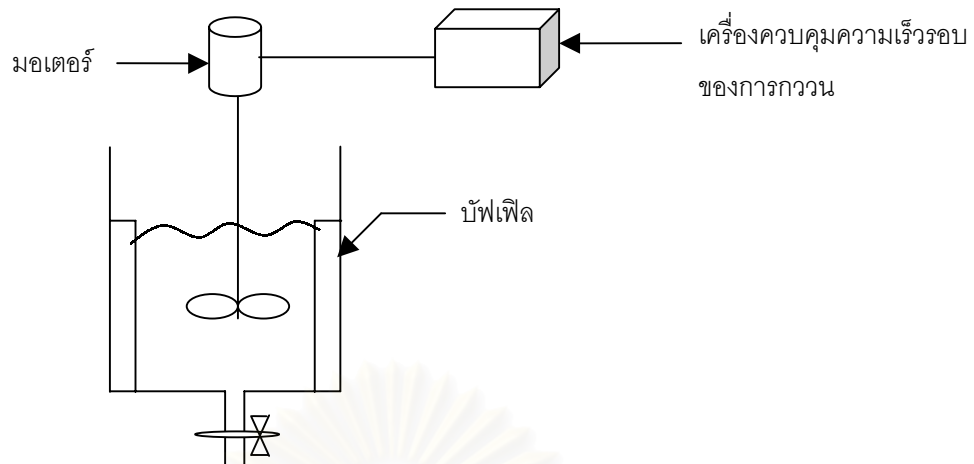
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด Analytical grade
2. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท UNIVAR ชนิด Analytical grade
3. โซเดียมคาร์บอเนตแอนดไฮดรัส (Na_2CO_3) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด Analytical grade
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท MERCK ชนิด Analytical grade
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท MERCK ชนิด Analytical grade
6. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ถังปฏิกรณ์ (Reactor)

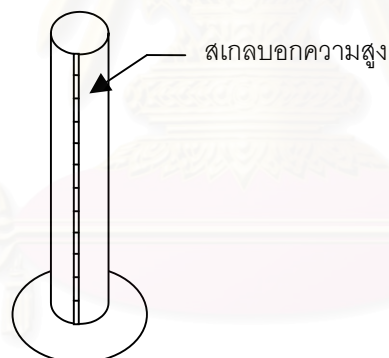
ถังปฏิกรณ์ทำจากบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร ความสูง 16 เซนติเมตร พร้อมติดบัพเฟิล 4 ใบซึ่งทำมาจากอะคริลิกมีความกว้าง 1 เซนติเมตร และของเหลวภายในถังจะถูกปั่นกวาดด้วยใบพัดแบบ 2 ใบ (dual-blade paddle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 เซนติเมตรและทำมาจากพอลิโพรพิลีนซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ที่ถังปฏิกรณ์จะทำการเจาะรูแล้วติดวาล์วเพื่อใช้ในการปิดเปิดเก็บสารตัวอย่าง รูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ถึงปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลอง

2) หลอดตกตะกอน (Sedimentation Tube)

เป็นหลอดรูปทรงกระบอกทำมาจากอะคริลิกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร ความสูง 100 เซนติเมตรพร้อมติดสเกลบอกความสูงไว้ รูปแบบของหลอดตกตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หลอดตกตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

- 3) Atomic absorption spectrophotometer ของบริษัท Instrumentation Laboratory Inc. รุ่น IL 551
- 4) เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ยี่ห้อ Coulter รุ่น LS 230
- 5) pH meter ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 8424
- 6) กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BH-2
- 7) เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS
- 8) กระดาษกรองเบอร์ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร ยี่ห้อ Whatman
- 9) นาฬิกาจับเวลา (ความละเอียด 0.01 วินาที)

3.2 วิธีทำการทดลอง

3.2.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.1.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก.) หลังจากนั้นจะเริ่มทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนโดยนำสารละลายของแคลเซียมและโซเดียมคาร์บอเนตที่เตรียมไว้ผสมกันในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้ง pH meter และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ซึ่งรูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอน

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH ของสารละลายและเก็บสารตัวอย่างจำนวน 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 1 5 10 20 และ 30 นาทีตามลำดับ จากนั้นจะทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 11.1 (ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อทำการควบคุมค่า pH ของการเกิดตะกอนแต่ผลการทดลองให้มีค่าเท่ากัน) โดยหยุดสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ลงไป (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก.) จนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 11.1 จึงหยุดเติม จากนั้นจะทำการวัดค่า pH ของสารละลายและเก็บสารตัวอย่างต่อที่เวลา 31 35 40 50 60 และ 90 นาทีตามลำดับ สารตัวอย่างที่เก็บได้ทั้งหมดจะถูกนำไปกรองทันทีด้วยกระดาษกรอง Whatman

เบอร์ 5 ซึ่งสารละลายที่กรองได้จะถูกเก็บไว้ในขวดลูกชมฟู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่เติมสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 0.5 มิลลิลิตรลงไป (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก.) การเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปเพื่อเป็นการหยุดปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นหลังจากสารละลายผ่านกระบวนการกรองแล้ว หลังจากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วจำนวน 5 มิลลิลิตรไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร (เจือจาง 20 เท่า) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแคลเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ต่อไป (วิธีการวิเคราะห์ดูในภาคผนวก ข.)

เริ่มทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนอีกครั้งหนึ่ง โดยตัวอย่างที่ได้จะนำไปสังเกตรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) (วิธีการวิเคราะห์ดูในภาคผนวก ข.)

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่างและเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้วนำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ จากนั้นจะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยจะวัดความสูงของชั้นตะกอนทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่เริ่มทำการตกตะกอนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะวัดความสูงทุกๆครึ่งชั่วโมงจนถึงที่เวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนข้ามคืนและทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนอีกครั้งที่เวลา 18 ชั่วโมงและจะวัดความสูงของชั้นตะกอนทุกๆครึ่งชั่วโมงจนถึงที่เวลา 24 ชั่วโมง นำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน รูปแบบการทดลองกระบวนการตกตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

3.2.1.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก.) หลังจากนั้นจะเริ่มทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนโดยนำสารละลายของแมกนีเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ผสมกันในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้ง pH meter และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อ นาที



รูปที่ 3.4 รูปแบบการทดลองกระบวนการตกตะกอน

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH ของการเกิดตะกอนและเก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ซึ่งวิธีการทดลองดังกล่าวจะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เริ่มต้นทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนอีกครั้งหนึ่ง โดยสารตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น โดยวิธีการวิเคราะห์จะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มต้นทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่าง และเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้วนำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ จากนั้นจะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งวิธีการวัดจะกระทำเหมือนกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน

3.2.2 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ก. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมมีค่าเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก.) และปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ข. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแมกนีเซียมมีค่าเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก.) และปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.2.2 ผลของความเร็วยรอบของการกวน

ก. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมมีค่าเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก.) และความเร็วยรอบของการกวนที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยวิธีการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ข. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแมกนีเซียมมีค่าเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (วิธีการ

เตรียมสารดูในภาคผนวก ก.) และความเร็วรอบของการกวนที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยวิธีการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอน และตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วระหว่าง แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก.) หลังจากนั้นจะเริ่มต้นทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนโดยนำสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ผสมกันในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้ง pH meter และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำการกวนเป็นเวลา 10 นาทีหลังจากนั้นจึงทำการผสมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไป (เพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดตะกอนของแมกนีเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากตะกอนของแมกนีเซียมคาร์บอเนตมีค่าการละลายที่ต่ำเช่นเดียวกัน)

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH ของการเกิดตะกอนและเก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ซึ่งวิธีการทดลองดังกล่าวจะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เริ่มต้นทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนอีกครั้ง โดยสารตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มต้นทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่าง และเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้วนำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นจะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งวิธีการวัดจะกระทำเหมือนกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน

3.2.4 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนรวม

3.2.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนรวม โดยจะทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันคือ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ซึ่งความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่างๆกันแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่างๆกัน

อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น	ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้น	
	แคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)	แมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)
3:1	13,500	4,500
2:1	12,000	6,000
1:1	9,000	9,000
1:2	6,000	12,000
1:3	4,500	13,500

โดยวิธีทำการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนรวม

3.2.4.2 ผลของความเร็วยรอบ

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนรวม โดยจะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่าเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก.) และความเร็วยรอบของการกวนที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งวิธีทำการทดลองจะกระทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนรวม

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

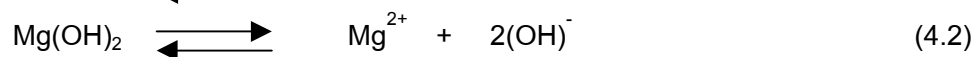
การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นอาจแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ส่วนด้วยกันคือ ในส่วนที่หนึ่งจะทำการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในส่วนที่สองจะทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในส่วนที่สามจะทำการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว และในส่วนที่สี่จะทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยรายละเอียดของผลการศึกษามีดังนี้

4.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

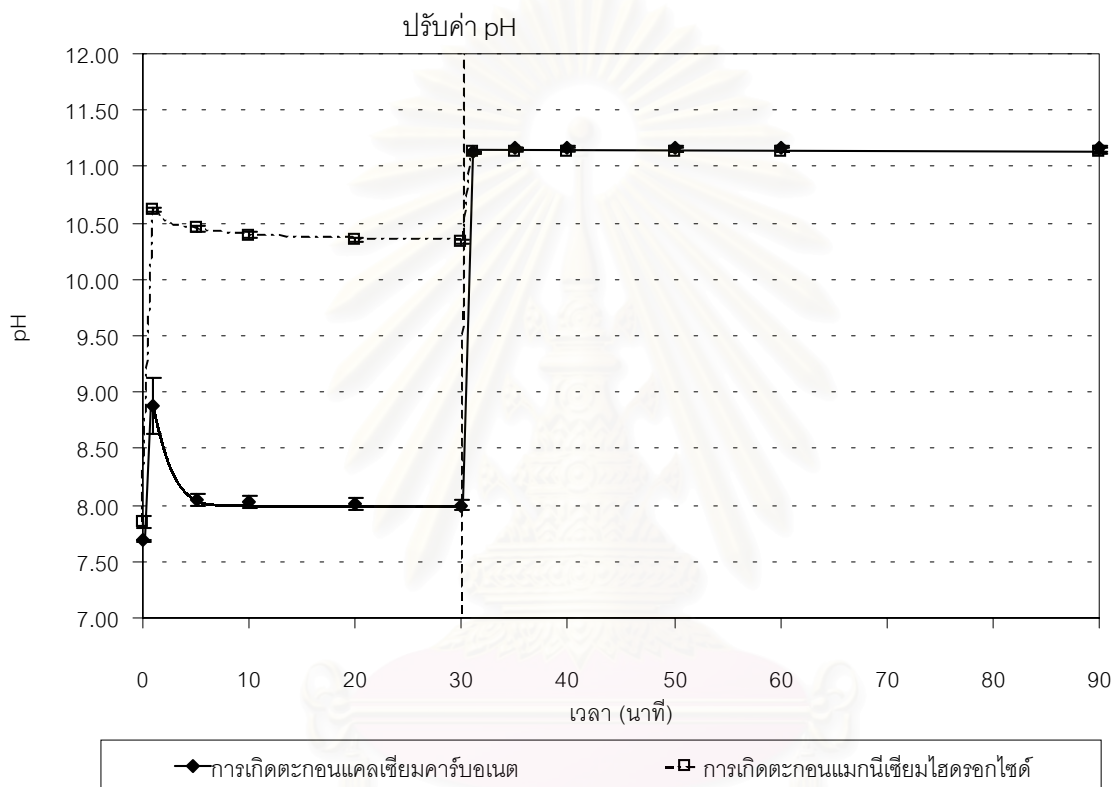
จากการทดลองโดยนำสารละลายของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา และปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาทีแล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอน ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนตามเวลาจะได้ผลดังรูปที่ 4.1 โดยพบว่าก่อนเริ่มทำการปฏิกริยานั้นสารละลายของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7 – 8) เมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปพบว่าค่า pH จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามลำดับจนประมาณนาทีที่ 10 พบว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนจะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งจากรูปจะพบว่าค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีค่าประมาณ 8 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าประมาณ 10.3 ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ณ สภาวะสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีดังนี้



จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งมีความเป็นเบสสูงกว่าคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำให้ ณ สภาวะสมดุลค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต



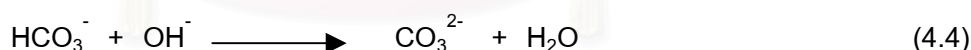
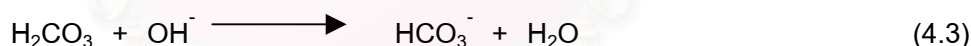
รูปที่ 4.1 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

อย่างไรก็ตามเนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับค่า pH ดังนั้นในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของตะกอนจึงจำเป็นต้องทำการควบคุมค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าเท่ากัน โดยจะทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนหลังจากนาทีที่ 30 ให้มีค่าเท่ากับ 11.1 จากการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป ซึ่งหลังจากทำการปรับค่า pH พบว่าระบบจะปรับตัวให้เข้าสู่สมดุลใหม่อย่างรวดเร็วและจะมีค่า pH คงที่จนจบการทดลอง

ข. ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

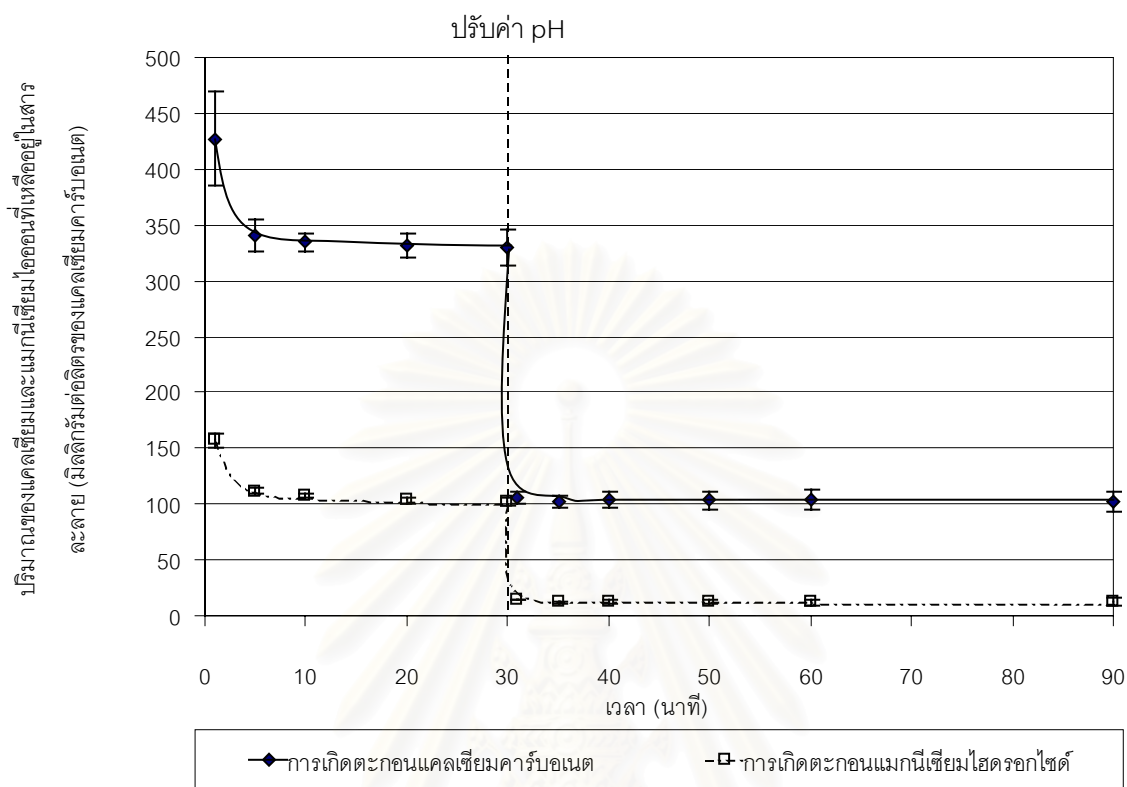
จากการพิจารณาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนตามเวลาจะได้อผลดังรูปที่ 4.2 โดยพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นทำปฏิกิริยาเนื่องจากปฏิกิริยาของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณค่าที่ 10 โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุลพบว่า ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะต่ำกว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการกำจัดแมกนีเซียมไอออนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดแคลเซียมไอออน ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้เท่ากับ 11.1 โดยการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีปริมาณลดลง ทั้งนี้เป็นไปตามหลักการของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (สมการที่ 4.1) เนื่องจากการเติมไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ลงไปจะไปรบกวนสมดุลเดิมของระบบ โดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ที่อยู่ในสารละลายเกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ตามสมการดังนี้ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)



ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่ามากขึ้นทำให้ระบบเสียสมดุลและระบบต้องปรับให้เข้าสู่สมดุลใหม่ในทิศทางที่ลดปริมาณคาร์บอเนตไอออนลง โดยเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับตามสมการที่ 4.1 นั่นคือจะเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายลดลง ในทำนองเดียวกันการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าสูงขึ้นนั้นพบว่า ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นไปตามหลักการของสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (สมการที่ 4.2) เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เติมลงไปจะไปรบกวนสมดุลเดิมของระบบโดยจะไปเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายให้มากขึ้น ทำให้ระบบเสียสมดุลและระบบจะต้องปรับให้เข้าสู่สมดุลใหม่ในทิศทางที่ลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนลง โดยจะเกิดปฏิกิริยา

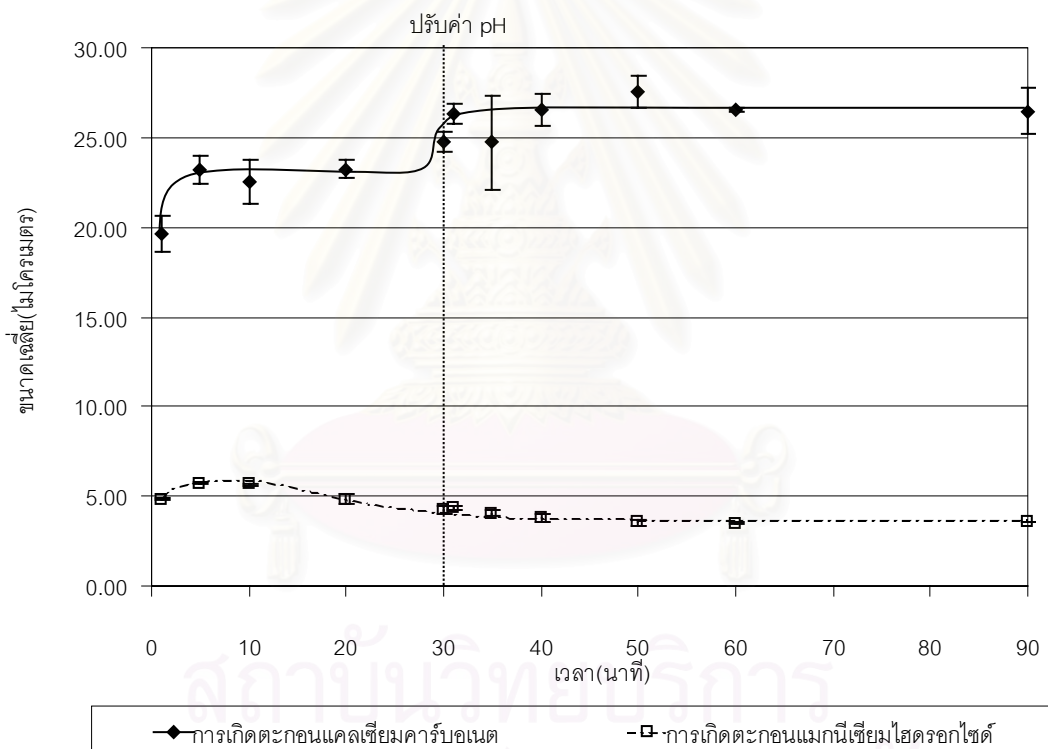
ย้อนกลับตามสมการที่ 4.2 คือเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนในสารละลายจะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

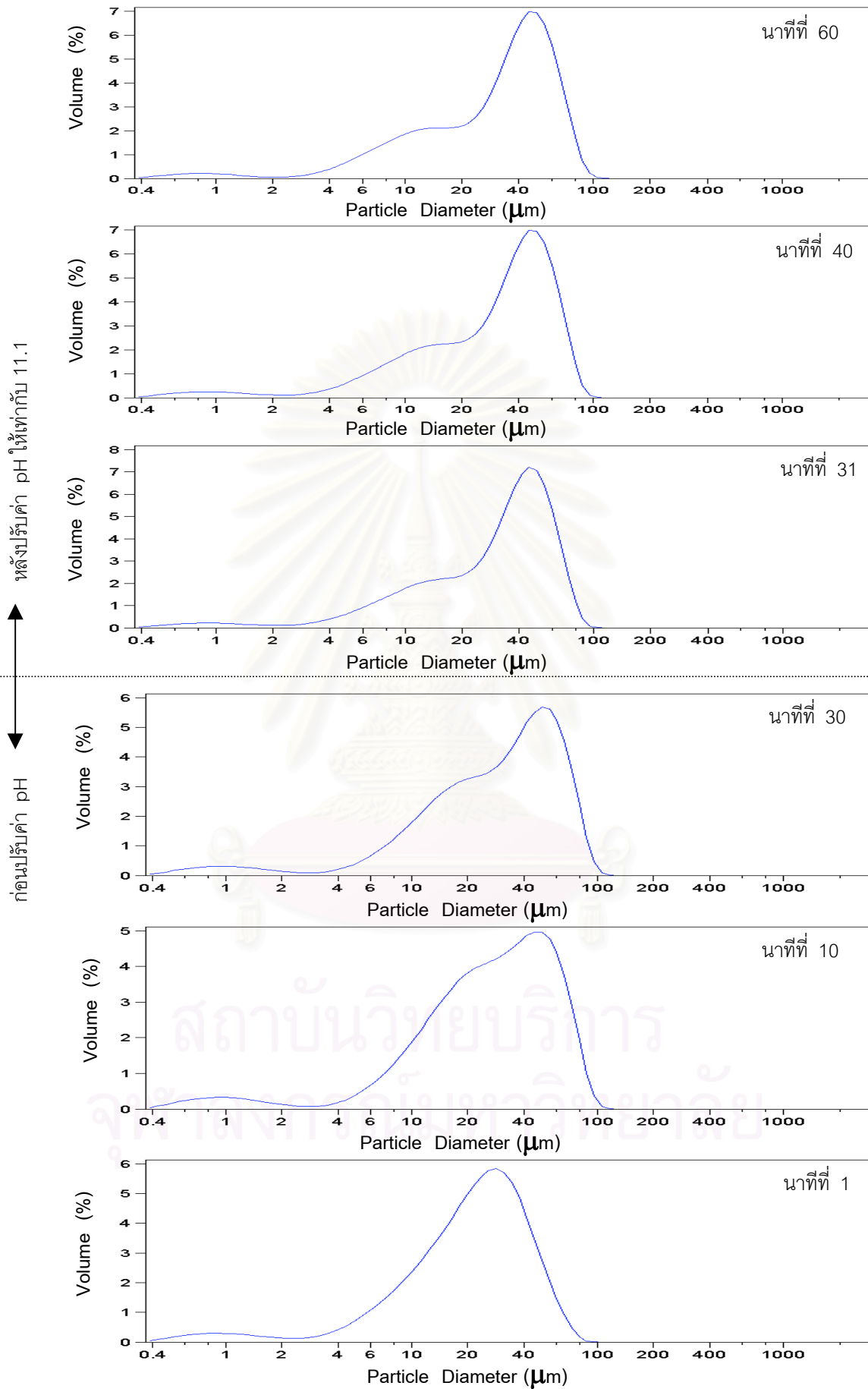
ค. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยพบว่าในกรณีของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนตามเวลาดังนี้คือ ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงเริ่มต้นของการเกิดตะกอนจะมีขนาดเล็ก จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของตะกอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากการเพิ่มขนาด (crystal growth) และการรวมตัวกัน (agglomeration) ของผลึกอย่างรวดเร็ว จากนั้นขนาดของอนุภาคจะมีค่าคงที่เนื่องจากเกิดความสมดุลกันระหว่างการรวมตัวกันและการแตกตัวของผลึก เมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าสูงขึ้นพบว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดที่สูงขึ้นเล็กน้อยและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งซึ่งกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เวลาต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



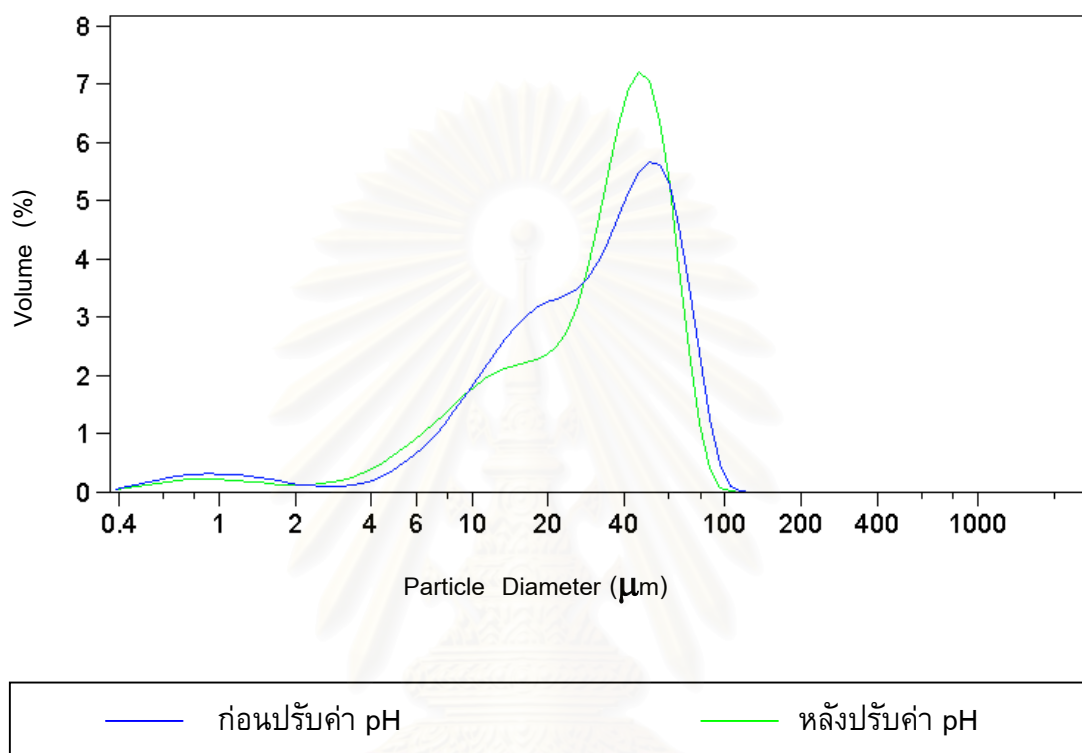
รูปที่ 4.3 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่างๆกัน

ซึ่งการที่ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการเพิ่มค่า pH นั้นอธิบายได้ว่า เนื่องจากอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Black และ Christman, 1961) ดังนั้นการเพิ่มค่า pH โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะเป็นการเพิ่มประจุบวกของโซเดียมไอออน (Na^+) ให้กับสารละลายซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคแคลเซียม



รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ณ เวลาต่าง ๆ กัน

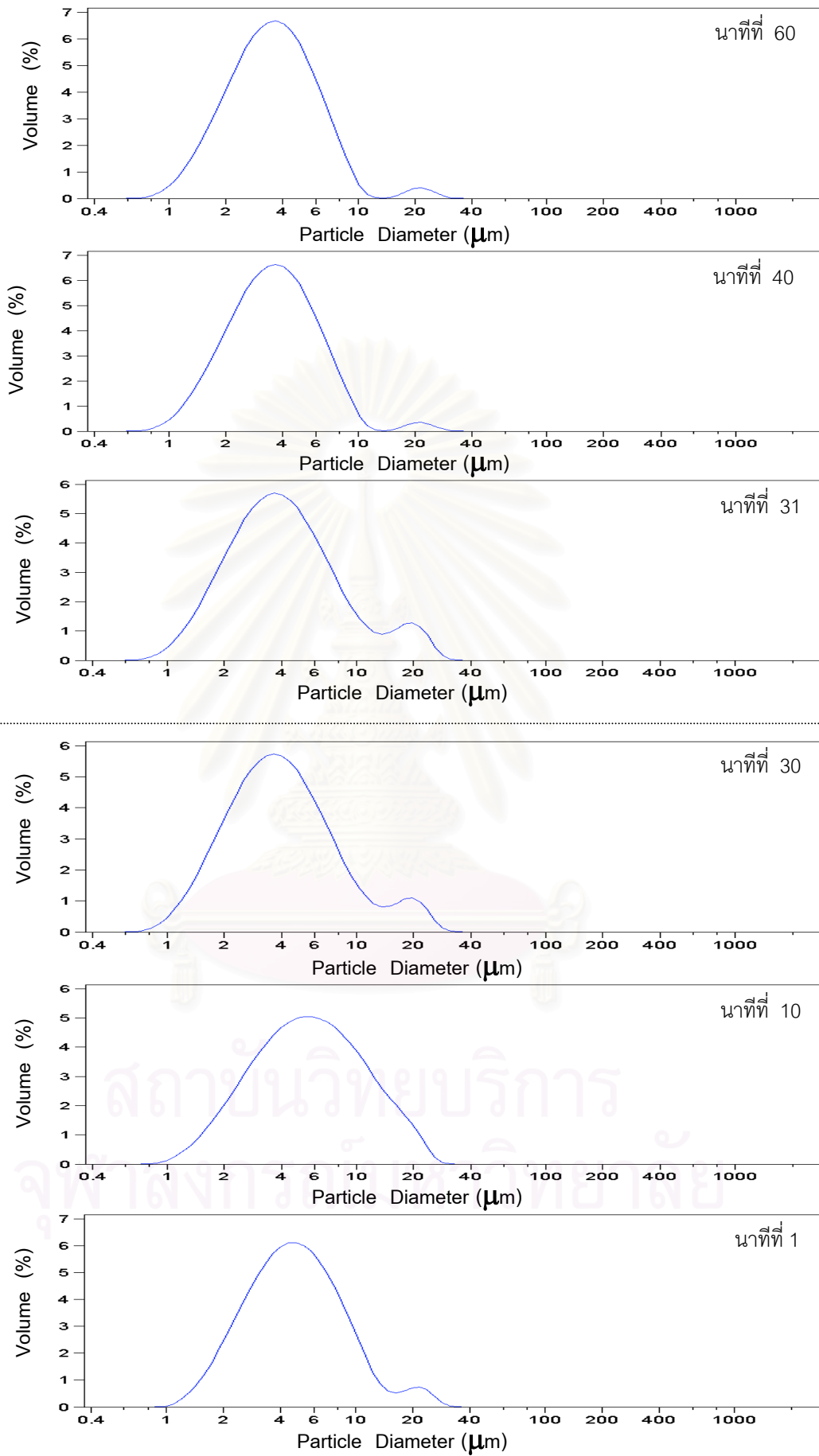
คาร์บอนेटมีประจุเป็นลบลดลง ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง อนุภาคสามารถรวมตัวกันได้มากขึ้นจึงทำตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น กราฟการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนและหลังปรับ pH แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจากรูปจะพบว่า การเพิ่มค่า pH นั้นจะส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กมีปริมาณลดลงในขณะที่จะให้อนุภาคขนาดใหญ่มีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนและหลังปรับค่า pH

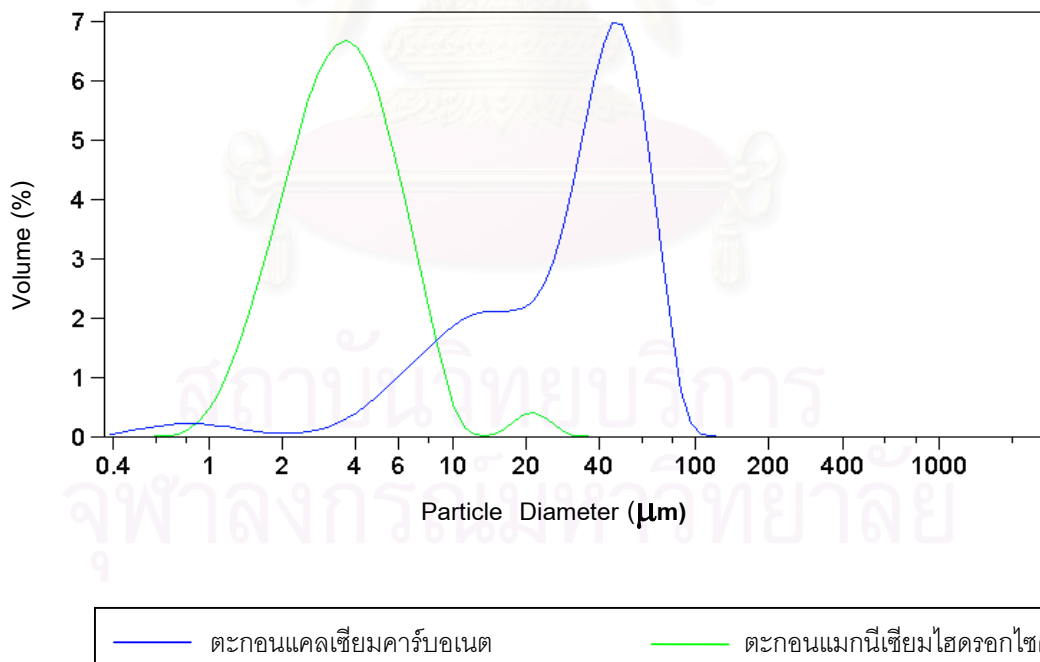
เมื่อพิจารณาตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงแรกของการเกิดตะกอนอนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีขนาดใหญ่จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอนุภาคจะมีขนาดเล็กลงอันเนื่องมาจากการแตกตัวของอนุภาค (Mullin และคณะ, 1989) จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายพบว่าขนาดของตะกอนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากอนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีประจุเป็นบวก (Black และ Christman, 1961) ดังนั้นการเพิ่มประจุบวกของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการรวมตัวกันของผลึก อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของตะกอนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนประมาณค่าที่ 40 ขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ผลดังกล่าวสามารถสังเกตได้จากกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.6

หลังปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1
 ↑
 ↓
 ก่อนปรับค่า pH

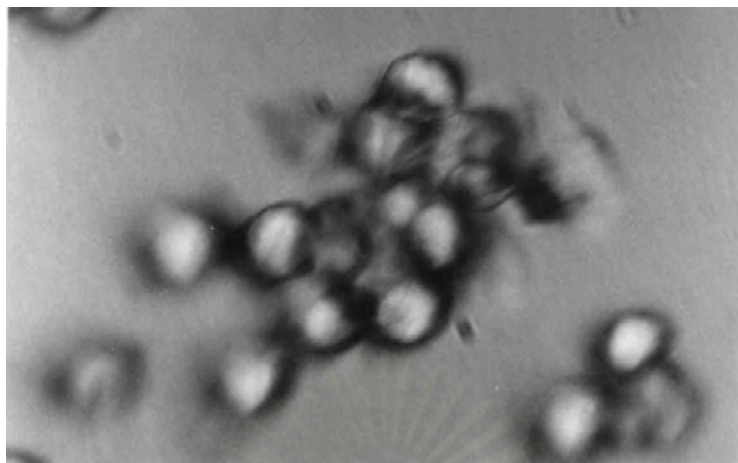


รูปที่ 4.6 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ณ เวลาต่างๆกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 4.3 จะพบว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 25-30 ไมโครเมตรในขณะที่ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 4-5 ไมโครเมตร ซึ่งกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 การที่ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่กว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นสามารถอธิบายได้จากการพิจารณาภาพถ่ายของตะกอนดังรูปที่ 4.8 ซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1000 เท่าพบว่า ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากผลึกที่มีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลมหรือที่เรียกว่าวาเทอไรท์ (vaterite) เป็นส่วนใหญ่มารวมตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีความแข็งแรงสูง ในขณะที่ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดจากการรวมตัวกันของผลึกที่มีขนาดเล็กซึ่งจากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นเห็นว่าลักษณะดังกล่าวคือรูปแบบของผลึกทุติยภูมิ (secondary crystal) ของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการรวมตัวกันของผลึกแบบปฐมภูมิ (primary crystal) หรือที่เรียกว่าบรูไซต์ จากรูปจะเห็นได้ว่าผลึกดังกล่าวจะเกาะตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่แต่เป็นการเกาะแบบหลวมๆเมื่อถูกแรงภายนอกมากกระทำ ผลึกที่เกาะกันอยู่จะหลุดออกกลายเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กลง

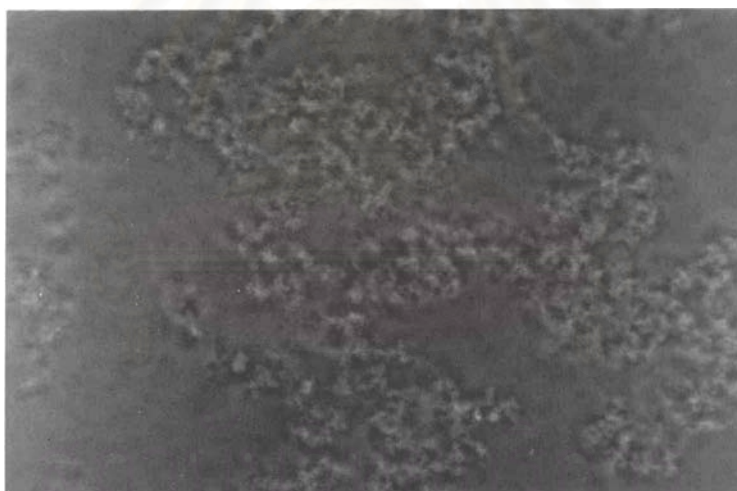


รูปที่ 4.7 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์



10 μm

(ก)



10 μm

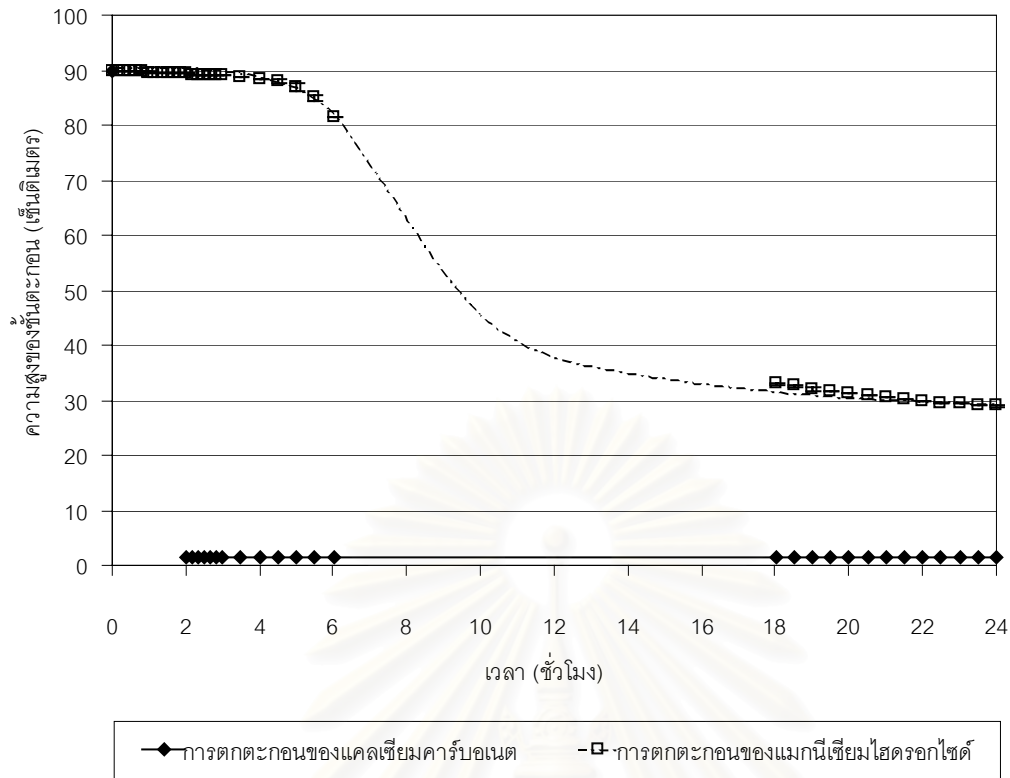
(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จากห้อง
จุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่า
(ก) ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ง. ความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเกิดตะกอนมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอน โดยจะทำการทดลองตกตะกอนในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงความสูงของรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนกับของเหลวใส (interface) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะได้ผลดังรูป 4.9 โดยพบว่าในกรณีของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นการตกตะกอนจะรวดเร็วมากคือภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงจึงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าสูง อย่างไรก็ตามจากรูปจะพบว่าไม่สามารถวาดกราฟในช่วง 2 ชั่วโมงแรกได้ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจนซึ่งเป็นเพราะว่าตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นมีการกระจายของขนาดที่ค่อนข้างกว้างประมาณ 2 – 100 ไมโครเมตร และตะกอนไม่มีคุณสมบัติในการจับกลุ่มกันทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนได้เร็ว ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กต้องใช้เวลาานานกว่าในการตกตะกอน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าสามารถสังเกตเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจนเนื่องจากตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติในการจับกลุ่มกันทำให้อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แม้จะมีขนาดแตกต่างกันแต่จะตกตะกอนด้วยความเร็วที่เท่ากัน ซึ่งเมื่อพิจารณาความเร็วของการตกตะกอนพบว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนได้ช้ามาก เนื่องจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นเพราะว่าผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติในการดูดซับกับน้ำ (lyosorption) โดยที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นผลึกที่มีน้ำอยู่บนผิว ซึ่งผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถดูดซับกับผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อื่นๆได้โดยมีน้ำเป็นตัวประสาน เกิดเป็นกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่มีน้ำอยู่ภายในรูพรุนของผลึกที่เกิดการดูดซับกัน ซึ่งมีผลให้ความหนาแน่นของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำและส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าน้อยตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงปริมาตรของชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงพบว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาตรของชั้นตะกอนสูงกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความหนาแน่นต่ำกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมาก



รูปที่ 4.9 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

4.2 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

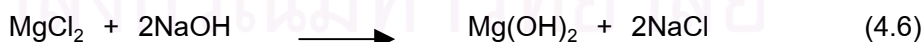
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น

จากการทดลองโดยนำสารละลายของแคลเซียมและสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยทำการกวนด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที แล้วพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอนซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

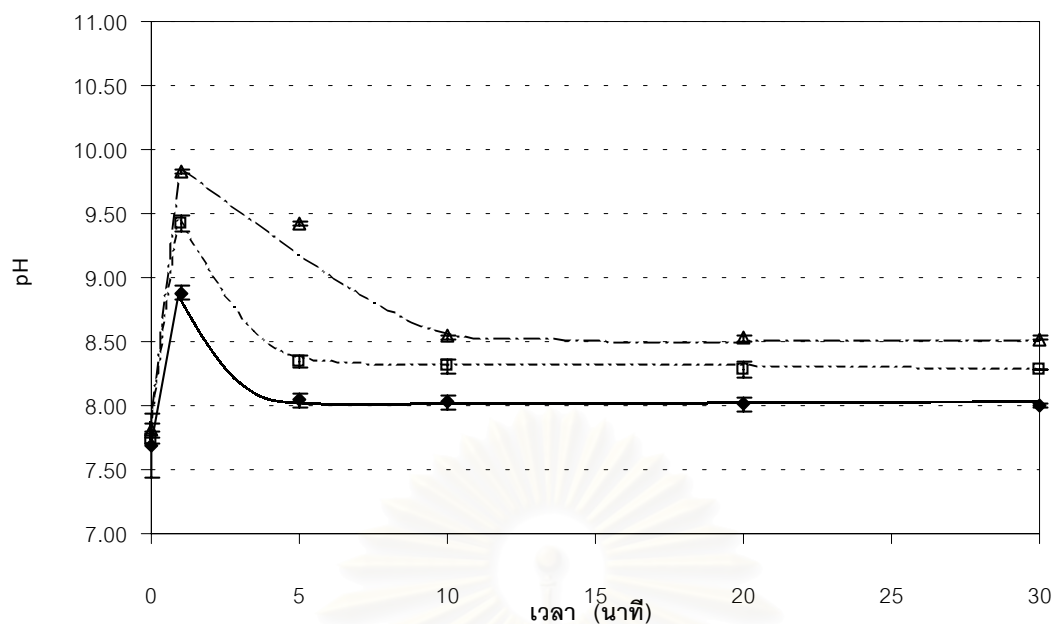
ก. ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน

เมื่อพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาสารละลายของแคลเซียมและสารละลายของแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7 – 8) จากนั้นเมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปพบว่าค่า pH จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนประมาณค่าที่ 10 ค่า pH ของการเกิดตะกอนจะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.10 ก. และ ข.

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าค่า pH จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้อธิบายได้จากพิจารณาปฏิกิริยาเคมีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตามสมการข้างล่างนี้

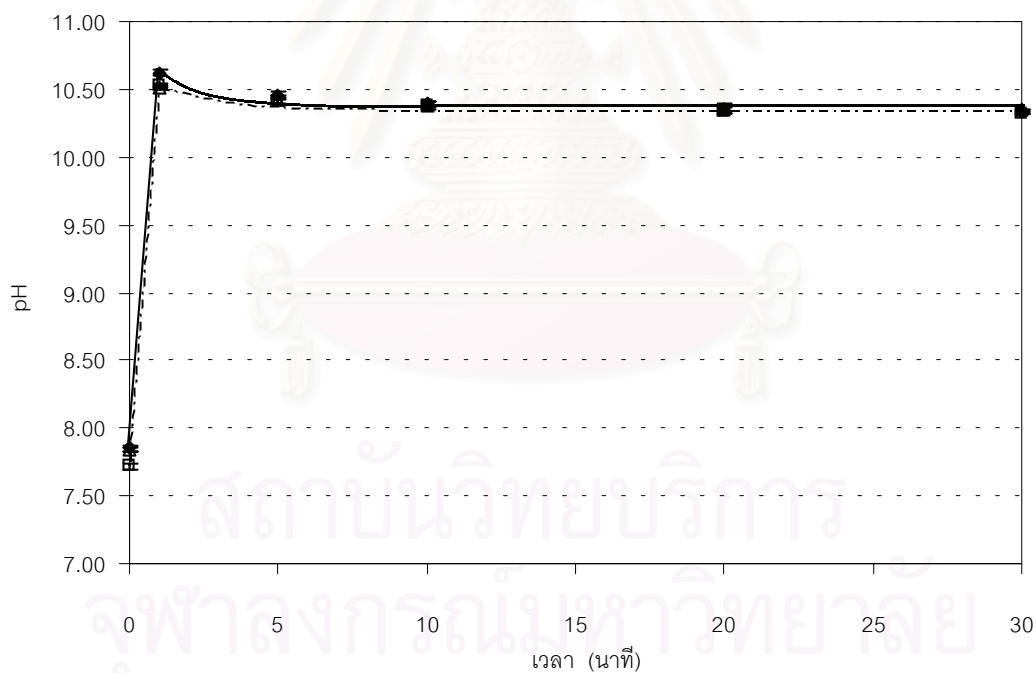


พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นด้วยทำให้ปริมาณของไอออนในสารละลายมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อค่าไอออนิกสเตรนจ์ (ionic strength) ในสารละลายให้มีค่าสูงขึ้น (ดูทฤษฎีในหัวข้อ 2.1.3 ข.) ซึ่งจะส่งผลต่อค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังนี้



- การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
- การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
- ▲ การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

(ก)



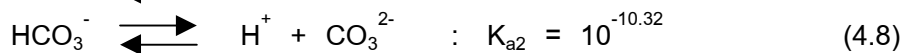
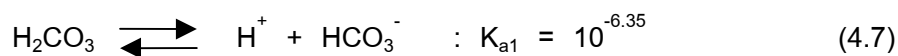
- การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
- การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
- ▲ การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

(ข)

รูปที่ 4.10 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

(ก) การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ข) การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ในกรณีการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ค่า pH ของการเกิดตะกอนจะพิจารณาได้จากสมมูลของการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกซึ่งมีสมการดังนี้ (Snoeyink และ Jenkins,1980)



เมื่อ K_{a1} , K_{a2} คือ ค่าคงที่สมมูลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

เนื่องจากค่าไอออนิกสเตรนจ์ในสารละลายที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมมูลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น (ดูทฤษฎีในหัวข้อ 2.1.3 ข.) ซึ่งการที่ค่าคงที่ของสมมูลดังกล่าวมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้สมมูลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกมีการแตกตัวให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายต่ำลง

ในกรณีค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นจะพิจารณาได้จากสมมูลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แต่เนื่องจากค่าคงที่สมมูลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมากประมาณ $10^{-10.7}$ (Snoeyink และ Jenkins,1980) จึงทำให้ค่าไอออนิกสเตรนจ์ที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อค่าคงที่ของสมมูลการละลายน้อยมาก ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน

โดยหลังจากนาที่ที่ 30 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะถูกปรับให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

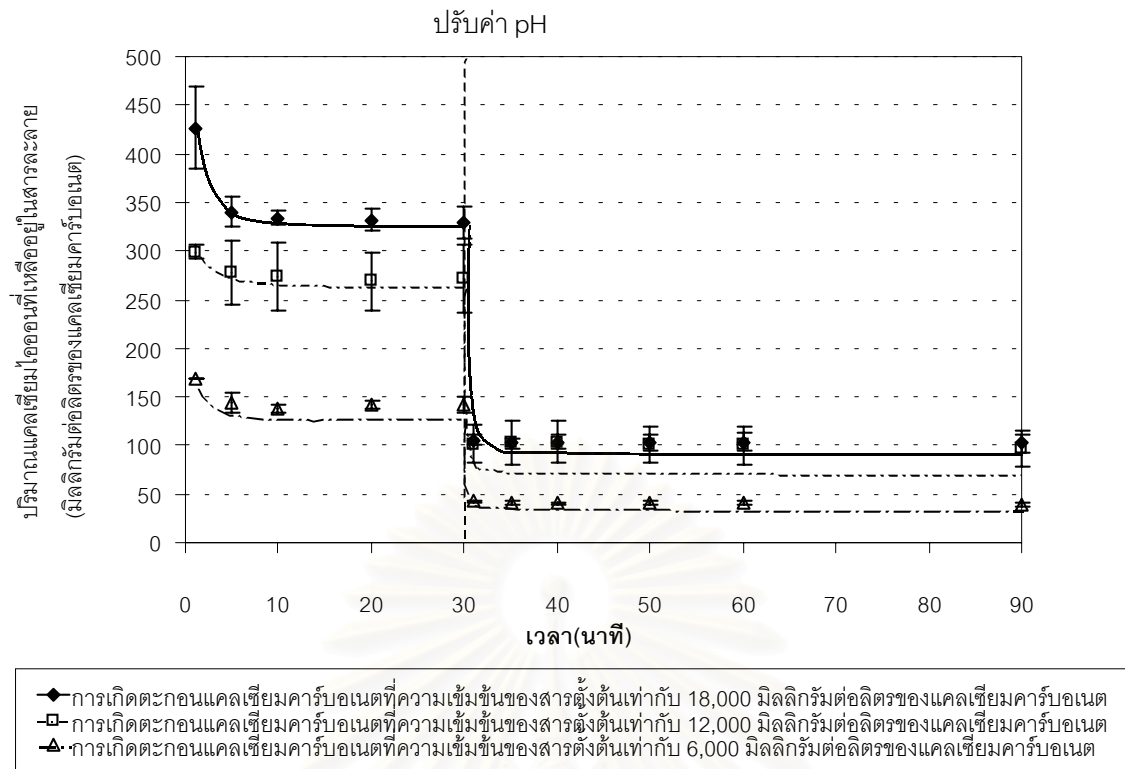
จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ พบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีลักษณะที่คล้ายกันคือ ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณวันที่ 10 จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลาย ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.11 ก. และ ข.

โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะพบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

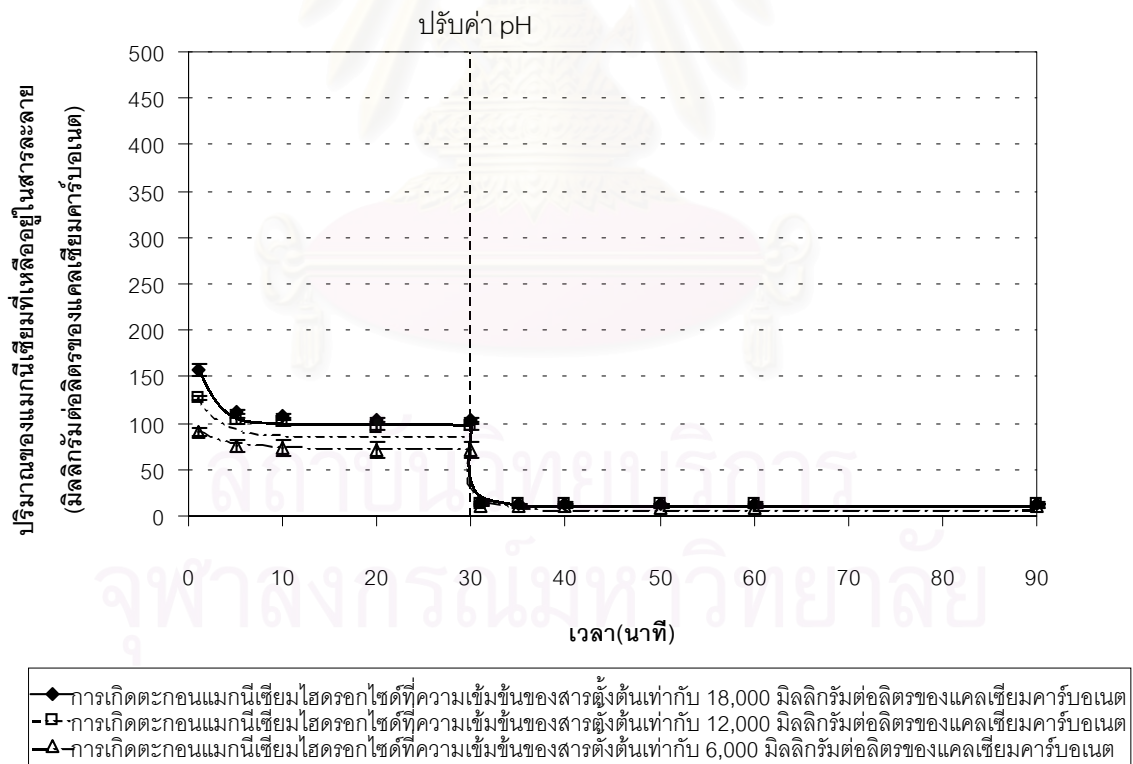
$$[\text{Ca}^{2+}] = \frac{K_{\text{sp}}(\text{CaCO}_3)}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (4.9)$$

ซึ่งจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าลดลงด้วย (ดูรูปที่ 2.1) และเนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรนจ์ในสารละลายมีค่ามากขึ้น มีผลทำให้ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (K_{sp}) มีค่าสูงขึ้น (ดูทฤษฎีในหัวข้อ 2.1.3 ข.) จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายจะพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเนื่องจากคาร์บอเนตไอออนในสารละลายจะถูกปรับให้เท่ากัน อย่างไรก็ตามปริมาณของแคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงยังคงมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงนั้นยังคงมีค่ามากกว่านั่นเอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน
(ก) การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ข) การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

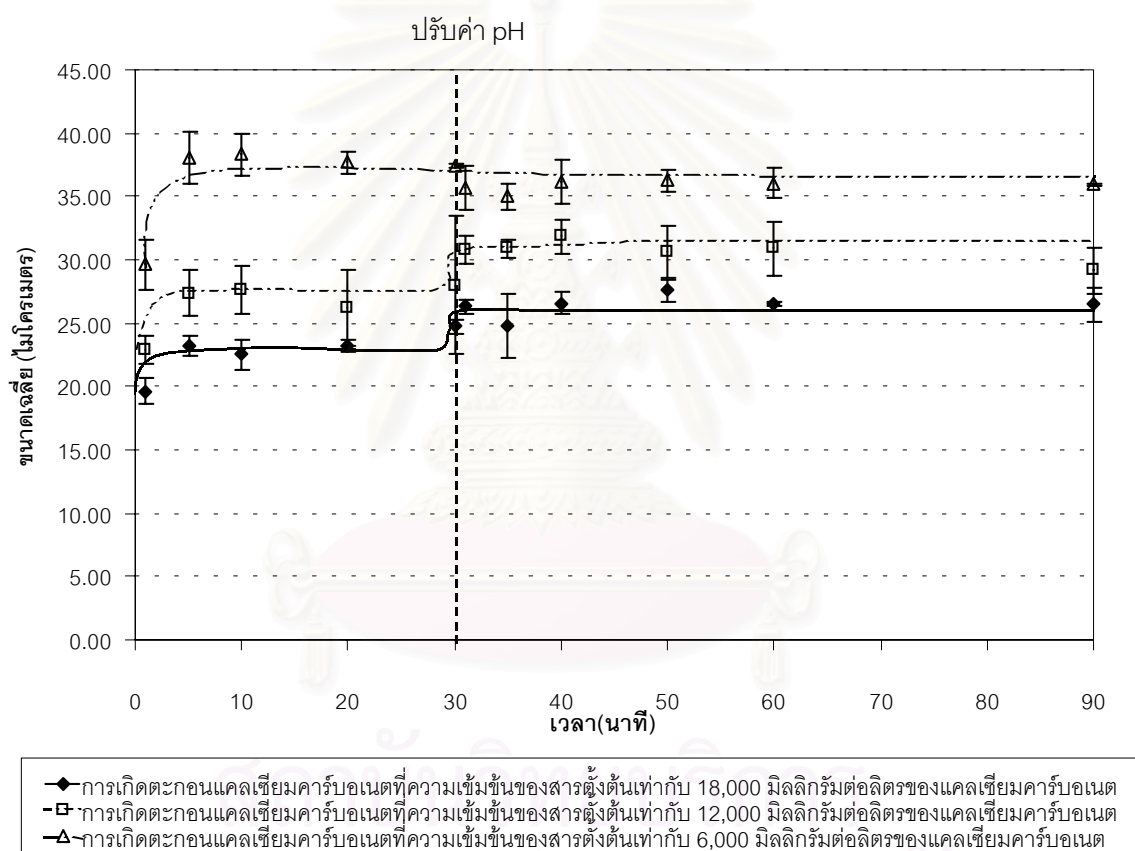
เมื่อพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่า ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$[\text{Mg}^{2+}] = \frac{K_{sp}(\text{Mg}(\text{OH})_2)}{[\text{OH}]^2} \quad (4.10)$$

เนื่องจากค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมากส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าไอออนิกสเตรนจ์ในสารละลายอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าคงที่ของสมดุล และจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า pH ของสารละลาย ส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวจะหมดไปเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอน

ค. ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อขนาดเฉลี่ยและลักษณะรูปร่างของตะกอน

จากการวิเคราะห์ขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกันพบว่า ในกรณีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นตะกอนที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกันจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขนาดตามเวลาที่ใกล้เคียงกันคือ ในช่วงแรกตะกอนจะมีขนาดเล็กจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นตะกอนจะมีขนาดคงที่ และเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายพบว่าตะกอนจะมีขนาดที่สูงขึ้นเล็กน้อยและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.12 อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าขนาดของตะกอนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลาย

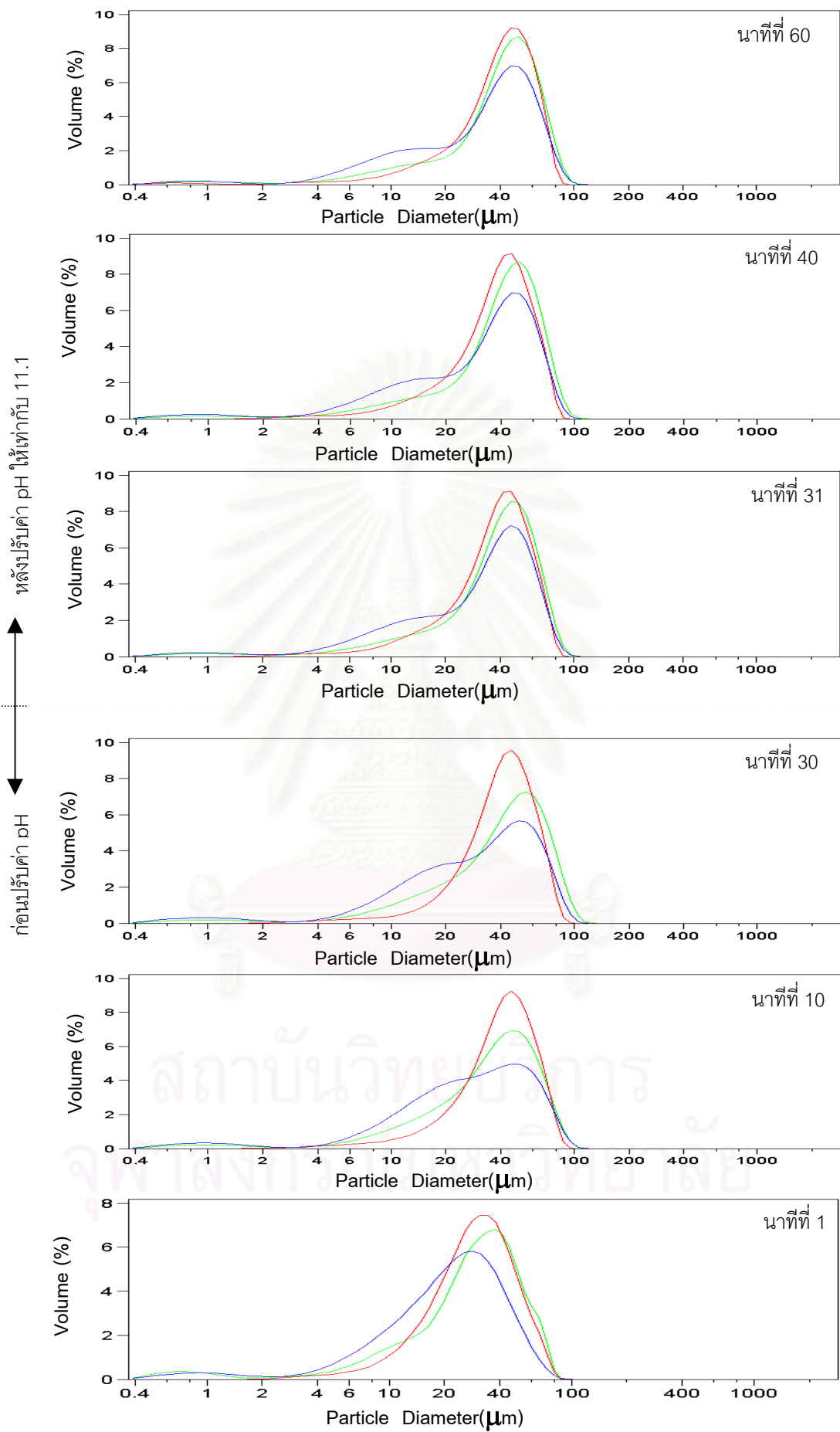


รูปที่ 4.12 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่า ขนาดของตะกอนมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการพิจารณากราฟการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันดังรูปที่ 4.13 ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น

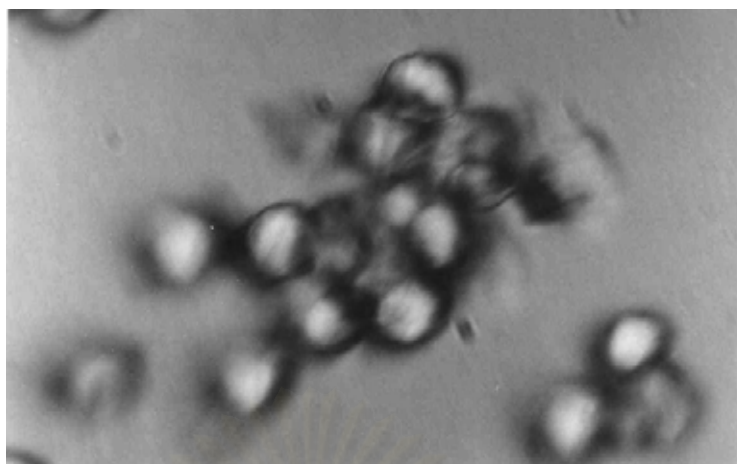
นั้นตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมากในขณะที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เป็นจำนวนน้อย แต่เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าลดลงจะพบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีอนุภาคขนาดเล็กลดลงแต่จะมีอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนจะส่งผลให้ค่าความอิมิตวียังยวดของสารละลายมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้นด้วย (ดูรูปที่ 2.4) ส่งผลให้ในสารละลายจะมีอนุภาคเป็นจำนวนมากและความอิมิตวียังยวดจะถูกใช้ไปในการเพิ่มขนาดของผลึกอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความอิมิตวียังยวดในสารละลายมีค่าลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกมีค่าลดลง อนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าดังรูปที่ 4.14 จะพบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไป โดยเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำนั้นผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปแบบของแคลไซต์ซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรที่สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง แต่เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นผลึกจะมีรูปแบบของวาทอไรท์เพิ่มขึ้นตามลำดับซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแคลไซต์ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับกฎของ Ostwald (Ostwald 's step rule) ซึ่งกล่าวว่าเมื่อความอิมิตวียังยวดของสารละลายมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสมีค่าสูงและรูปแบบของผลึกที่เกิดขึ้นมักจะเป็นรูปแบบที่ไม่เสถียร (Markov,1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



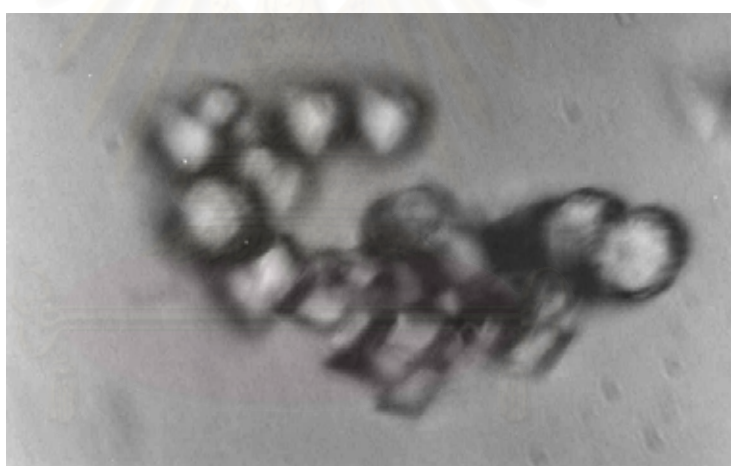
— 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต — 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต — 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 4.13 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน



10 μm

(ก)



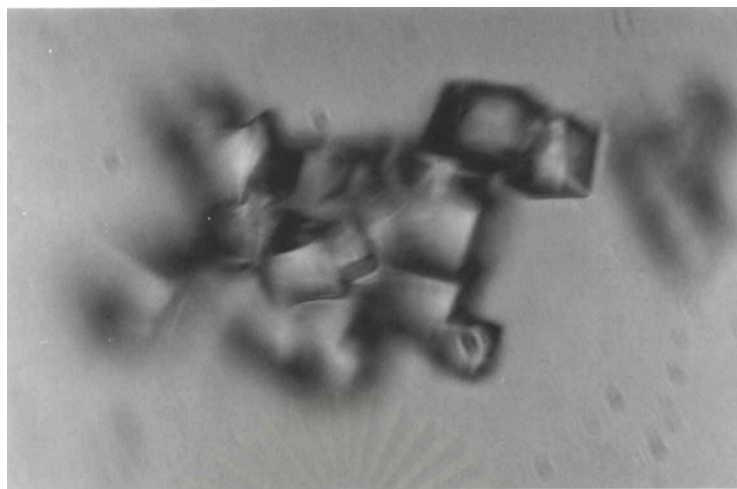
10 μm

(ข)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

(ก) 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

(ข) 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

10 μm

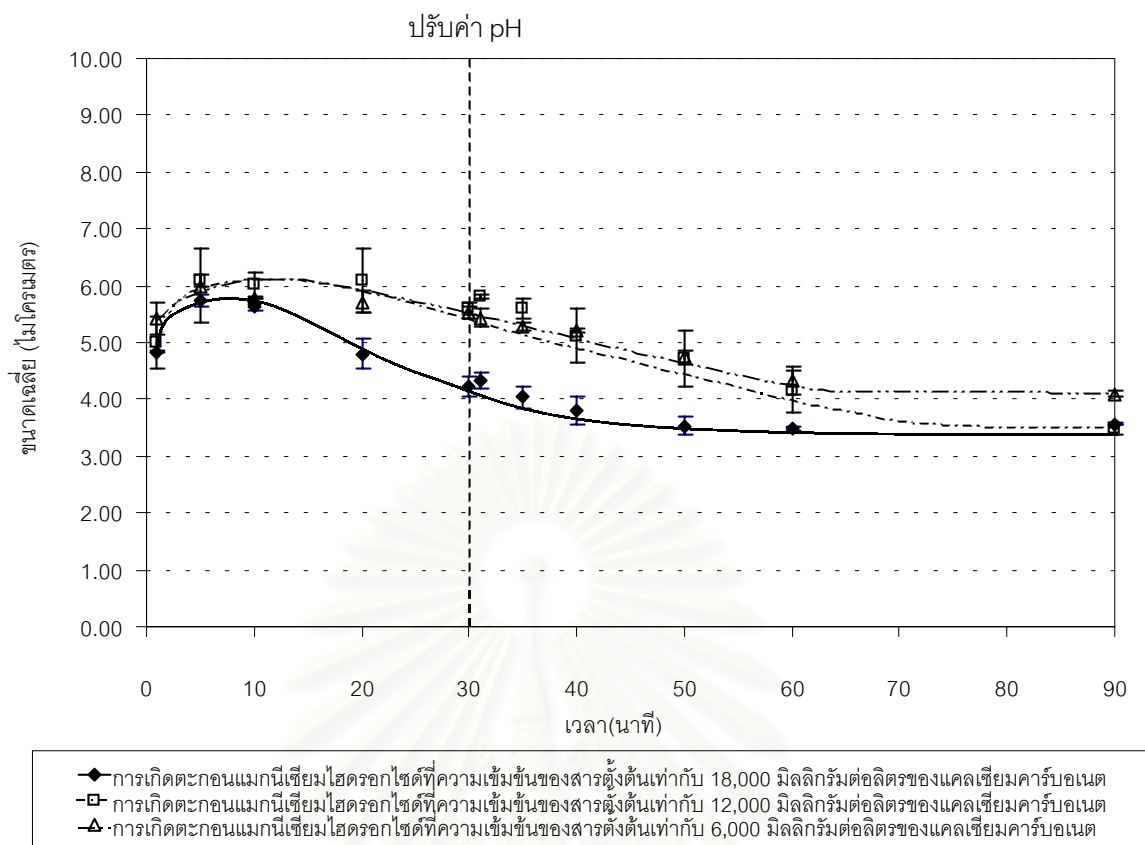
(ค)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ กัน (ต่อ)

(ค) 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

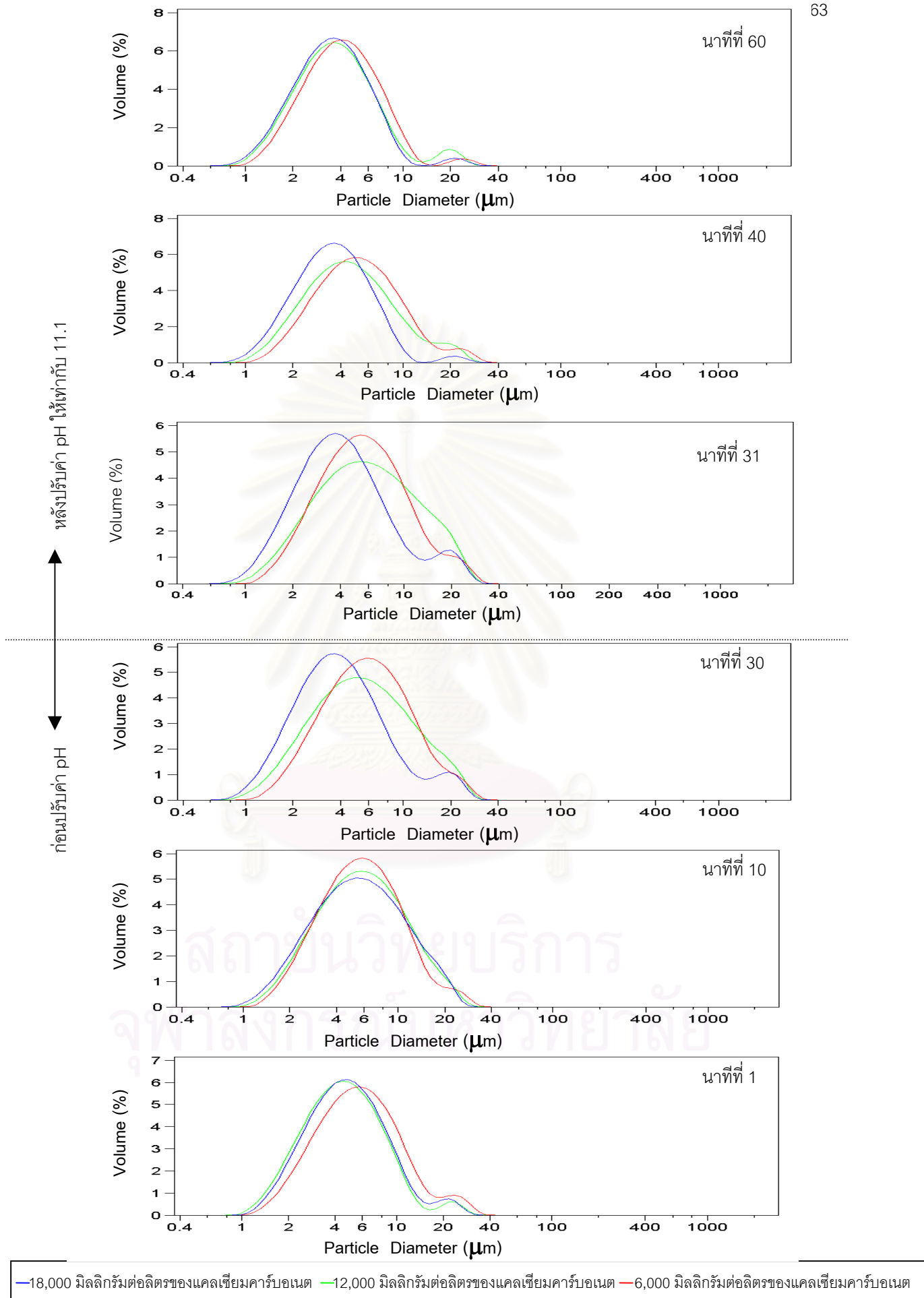
เมื่อพิจารณาขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ กันพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนตามเวลาจะใกล้เคียงกันคือ ตะกอนจะมีขนาดใหญ่ในช่วงแรกของการเกิดตะกอน จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเล็กลงและเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอน ณ นาทีที่ 30 พบว่าขนาดของตะกอนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามขนาดของตะกอนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนเมื่อถึงเวลาหนึ่งขนาดของตะกอนจะเข้าสู่ค่าคงที่ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.15

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ กันพบว่า ในช่วงแรกขนาดของตะกอนจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการแตกตัวของตะกอน โดยตะกอนที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงจะมีขนาดลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ได้เร็วกว่าตะกอนที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งขนาดของตะกอนที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ กันดังรูปที่ 4.16

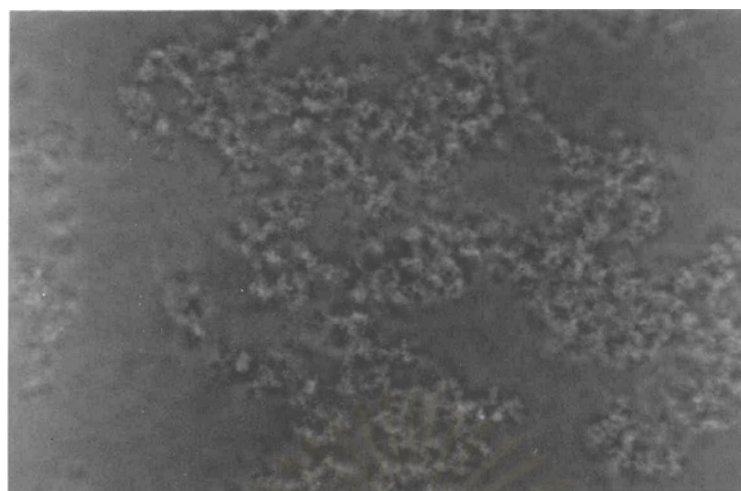


รูปที่ 4.15 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mullin และคณะ,1989 ซึ่งพบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงจะมีอัตราการแตกตัวมากกว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ ซึ่งผลดังกล่าวอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้มีอนุภาคเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งจะทำให้การชนกันระหว่างอนุภาคด้วยกันเองมีมากขึ้นส่งผลให้การแตกตัวของอนุภาคเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อถึงเวลาหนึ่งขนาดของอนุภาคที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันจากภาพถ่ายของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าพบว่า ตะกอนจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนมีขนาดเล็ก มีรูปร่างของผลึกที่ไม่ชัดเจนและเกาะตัวกันอยู่เป็นกลุ่มจึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างได้ดังรูปที่ 4.17

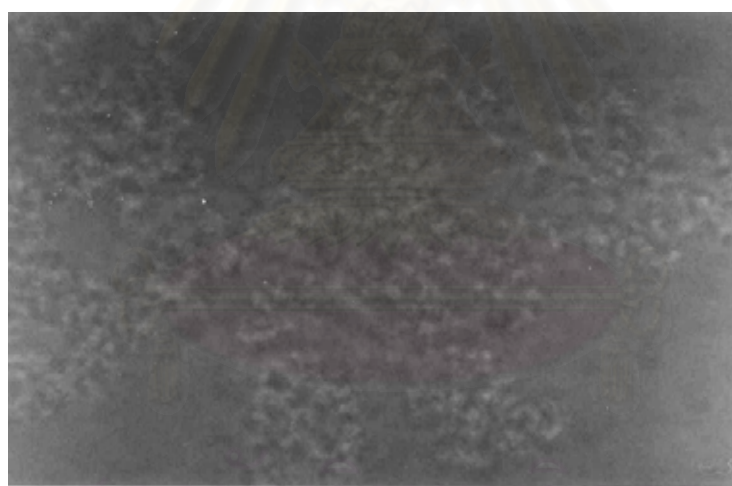


รูปที่ 4.16 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ



10 μm

(ก)



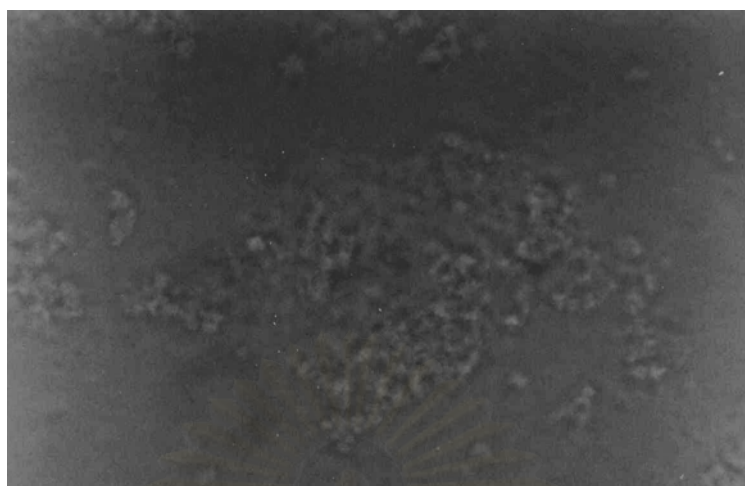
10 μm

(ข)

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆ
กัน

(ก) 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

(ข) 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต



10 μm

(ค)

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น
ต่าง ๆ กัน (ต่อ)

(ค) 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

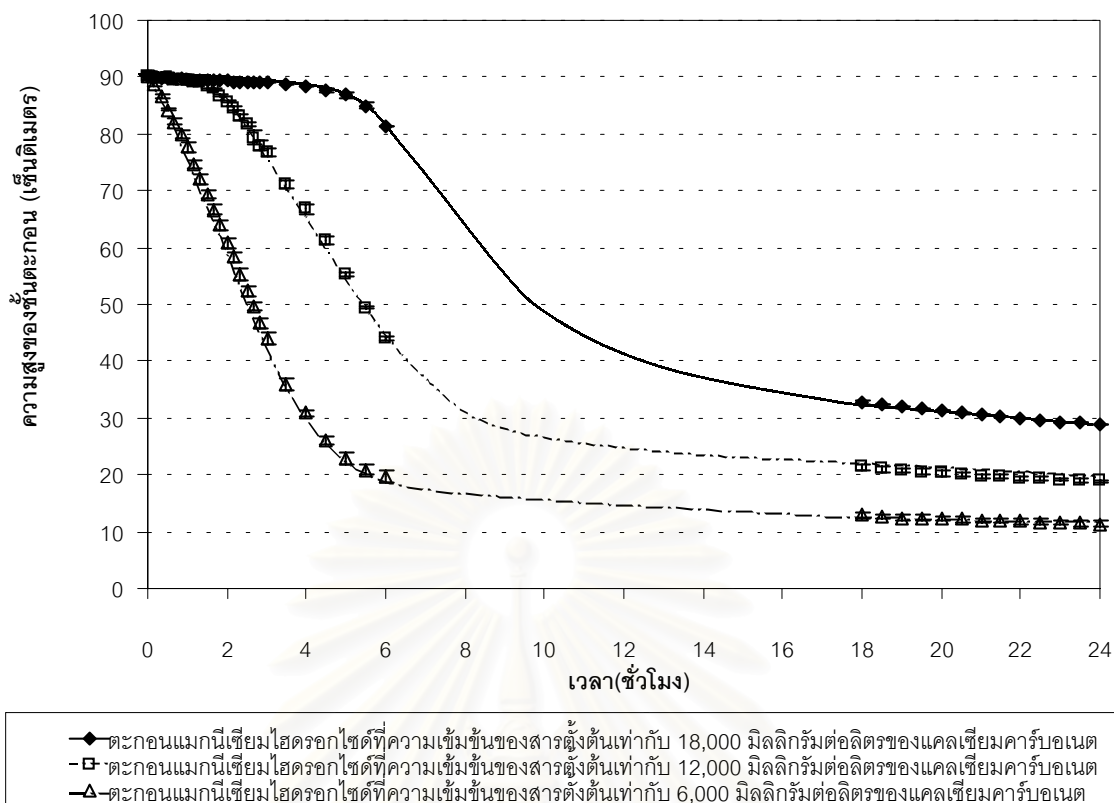
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอน พบว่าในกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะของการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกันคือ การตกตะกอนจะรวดเร็วมากซึ่งภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงการตกตะกอนจะสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะมีการกระจายของขนาดที่ค่อนข้างกว้างและไม่จับกลุ่มกันทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ไม่สามารถเปรียบเทียบความเร็วของการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเร็วของการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าลดลงดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.18 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นอนุภาคจะอยู่ใกล้กันมากขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกขัดขวางจากอนุภาคอื่นที่แวดล้อมอยู่ ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ช้าลง ความเร็วของการตกตะกอนจึงลดลง ผลดังกล่าวดังกล่าวชี้ให้เห็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า“hindered settling”

นอกจากนี้จากรูปยังสังเกตเห็นได้ว่าตะกอนที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงนั้นจะตกตะกอนได้ช้ามากในช่วงแรกของการตกตะกอน แต่เมื่อถึงเวลาหนึ่งความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (Black และ Christman, 1961) เมื่ออนุภาคเหล่านี้อยู่ใกล้กันจะส่งผลให้เกิดแรงผลัทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค ซึ่งแรงผลันี้จะมีอิทธิพลมากกว่าแรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ไม่เกิดการตกตะกอนในช่วงแรกของการตกตะกอน อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการดูดจับกับอนุภาครอบข้างเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้นจนเมื่อถึงเวลาหนึ่งแรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคจะมีอิทธิพลมากกว่าแรงผลัทางไฟฟ้า จึงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

4.2.2 ผลของความเร็วยรอบของการกวน

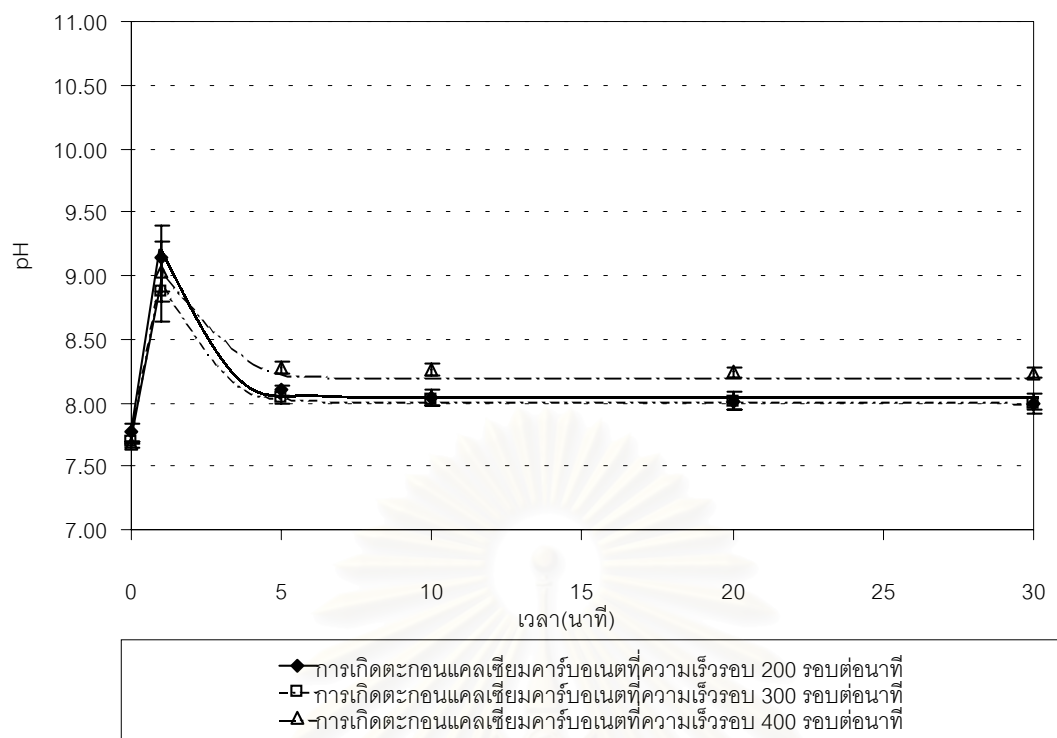
จากการทดลองโดยนำสารละลายของแคลเซียมและสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยทำการปั่นกวนด้วยความเร็วยรอบ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ย และรูปร่างลักษณะของตะกอน และความเร็วของการตกตะกอน ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

ก. ผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน

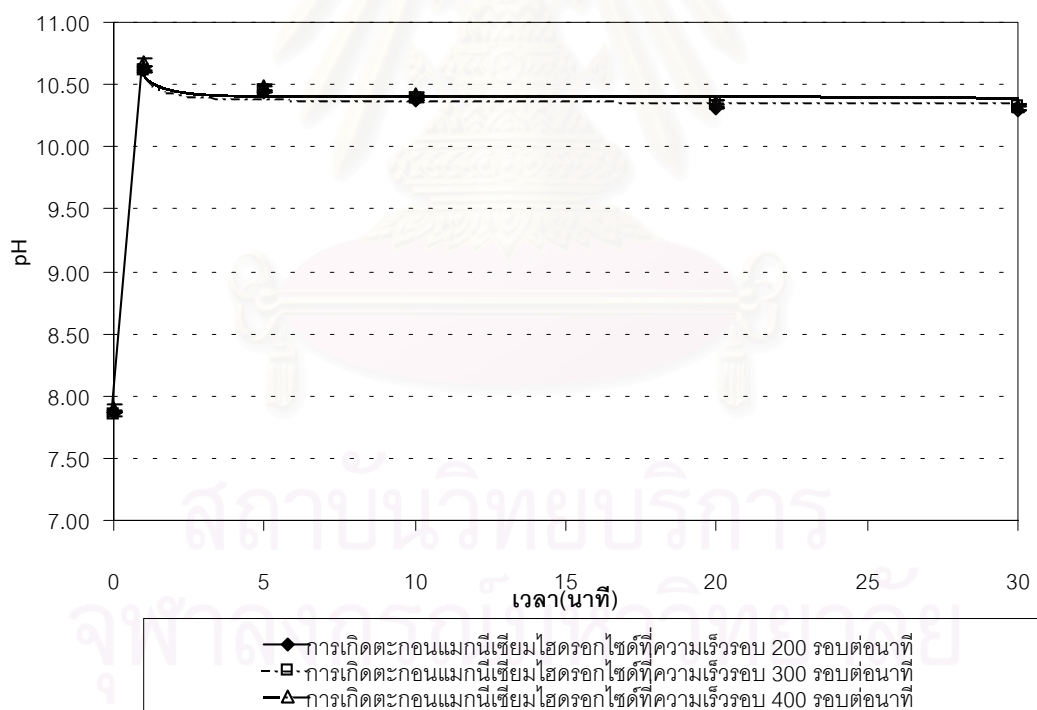
จากการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่าง ๆ กันพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของการเกิดตะกอนที่ความเร็วยรอบของการกวนต่าง ๆ กันตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาสารละลายของแคลเซียมและสารละลายของแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7 - 8) จากนั้นเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาพบว่าค่า pH จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า pH จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนประมาณค่าที่ 10 ค่า pH ของการเกิดตะกอนจะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.19 ก. และ ข.

เมื่อพิจารณาค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วยรอบของการกวนต่าง ๆ กันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะพิจารณาได้จากสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกตามสมการที่ 4.7 และ 4.8 ดังนั้นจากการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าคงที่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงจ์ในสารละลายมีใกล้เคียงกันนั้น จะส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน และสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกมีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่า pH ของสารละลายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ในทำนองเดียวกันกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วยรอบต่าง ๆ กันจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าคงที่จะส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงจ์ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันด้วย ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วยรอบต่าง ๆ กันจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามหลังจากนาทีที่ 30 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วยรอบต่าง ๆ กันจะถูกปรับให้เท่ากันและเท่ากับ 11.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

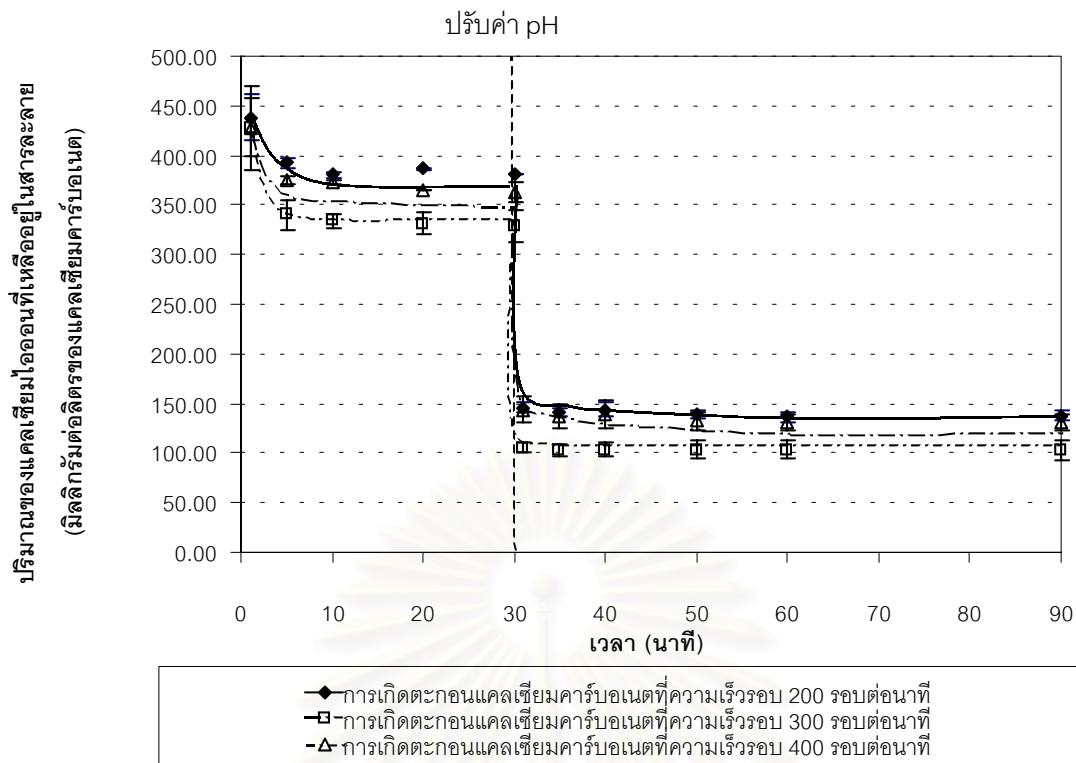
(ก) การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ข) การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ข. ผลของความเร็วยวรอบของการกวนที่มีต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

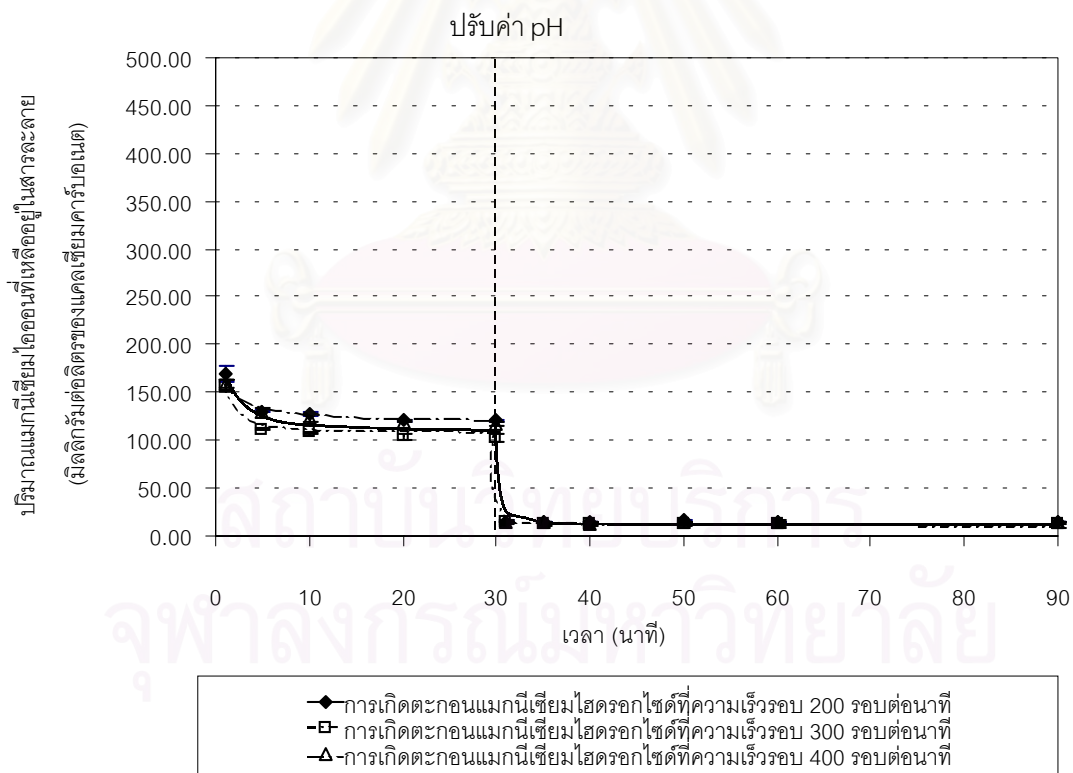
จากการพิจารณาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเร็วยวรอบของการกวนต่าง ๆ กัน จะได้ผลดังรูปที่ 4.20 ก. และ ข. โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเร็วยวรอบต่าง ๆ กันตามเวลาจะใกล้เคียงกันคือ ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณนาที่ที่ 10 จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลาย ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่ง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเร็วยวรอบของการกวนต่าง ๆ กันจะพบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุลจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (K_{sp}) และปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.9 ซึ่งจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วยวรอบของการกวนจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า pH ของสารละลายซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการที่ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าคงที่ซึ่งจะมีผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันนั้น จะส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากัน จากสาเหตุดังกล่าวจึง ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อพิจารณาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเร็วยวรอบต่าง ๆ กันจะพบว่า ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้ว่า เนื่องจากปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (K_{sp}) และปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.10 ซึ่งจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วยวรอบของการกวนจะไม่ส่งผลต่อค่า pH ของสารละลายซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการที่ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าเท่ากันจะมีผลให้ค่าไอออนิก



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไออนอนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน
(ก) การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ข) การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

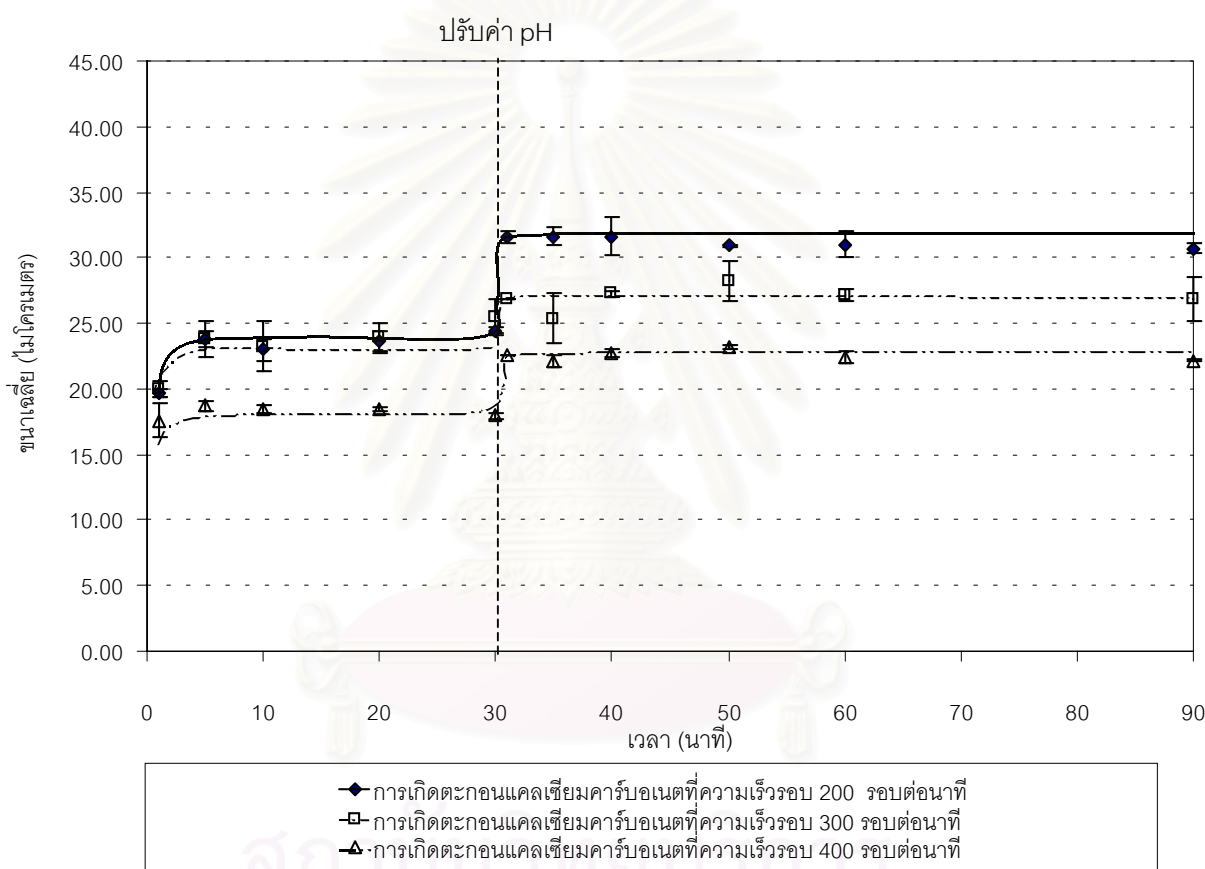
สเตรงท์ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. ผลของความเร็รรอบของการกวนที่มีต่อขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

จากการพิจารณาขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็รรอบของการกวนต่างๆกันพบว่า ในกรณีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ตะกอนที่เกิดขึ้นที่ความเร็รรอบของการกวนต่างๆกันจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขนาดตามเวลาที่ใกล้เคียงกันคือ ตะกอนจะมีขนาดเล็กในช่วงแรกของการเกิดตะกอน จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ค่าคงที่ จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนจะทำให้ตะกอนมีขนาดที่สูงขึ้นเล็กน้อยและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็รรอบของการกวนต่างๆกัน

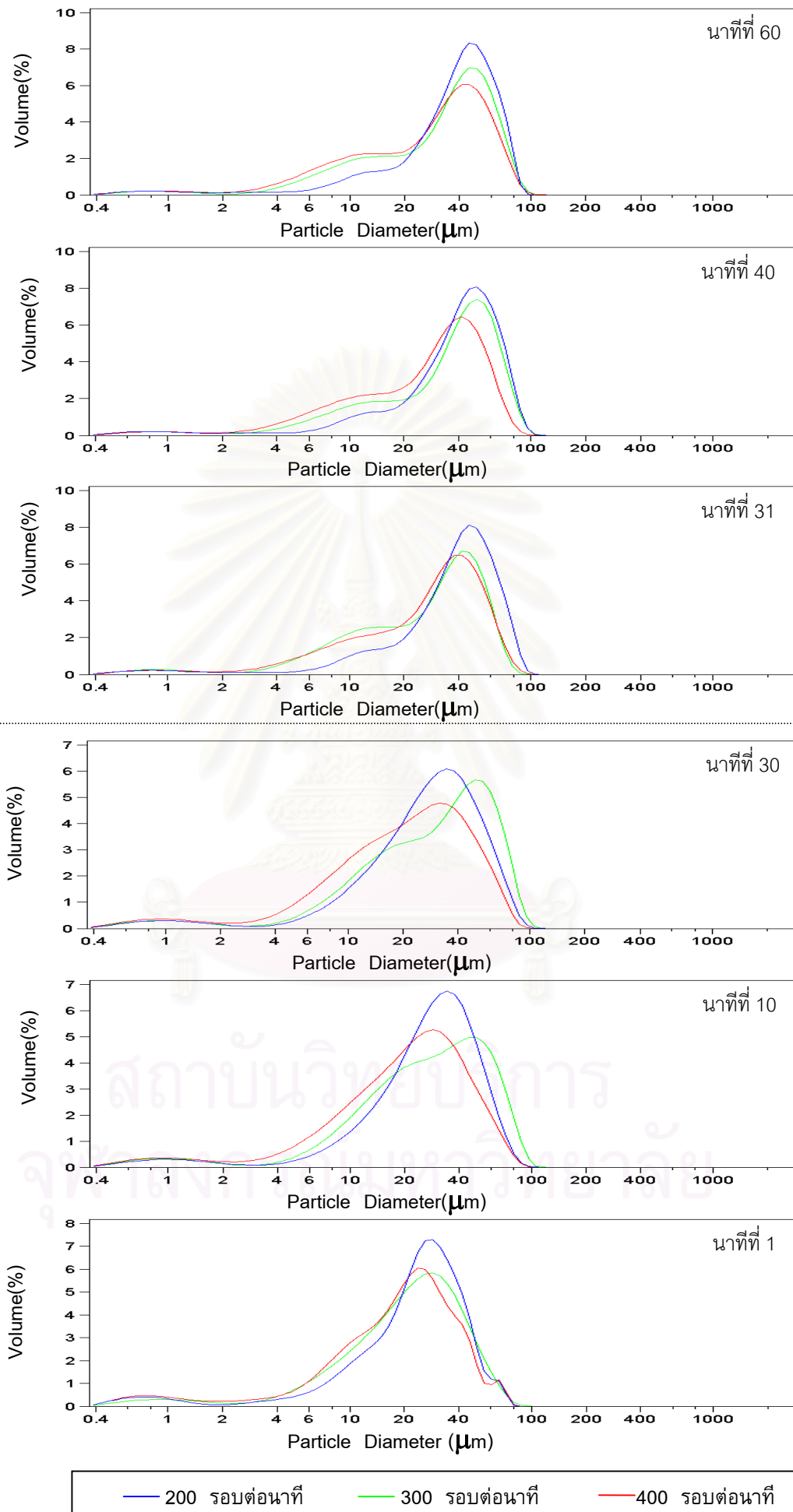
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็รรอบของการกวนต่างๆกันพบว่า ขนาดเฉลี่ยของตะกอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็รรอบของการกวนให้สูงขึ้น ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็รรอบของการกวนต่างๆกันดังรูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่าที่ความเร็รรอบของการกวนต่ำนั้นอนุภาคขนาดใหญ่จะมีเป็นจำนวนมากในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะมีจำนวนน้อย แต่เมื่อเพิ่ม

ความเร็วรอบของการกวนให้สูงขึ้นพบว่าอนุภาคขนาดใหญ่จะมีจำนวนลดลงในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเพิ่มความเร็วยรอบของการกวนให้สูงขึ้นนั้นจะทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ที่เร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ผลึกจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันแล้วเกิดการเชื่อมของผลึกมีน้อย ผลึกจึงมีโอกาสรวมตัวกันที่ลดลง ส่งผลให้ขนาดของตะกอนเล็กลงซึ่งผลดังกล่าวจะสังเกตได้จากการพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าดังรูปที่ 4.23 โดยพบว่าที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำนั้นอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจะอยู่รวมตัวกันค่อนข้างมากทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อความเร็วรอบของการกวนเพิ่มขึ้นพบว่าอนุภาคจะมีการรวมตัวกันที่น้อยลง นอกจากนี้จากภาพถ่ายของตะกอนยังสังเกตได้ว่าผลึกเดี่ยว ๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบของการกวนสูงนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วรอบของการกวนสูงนั้นจะทำให้การผสมกันของสารตั้งต้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความอิ่มตัวของสารละลายมีค่าสูงทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้มีอนุภาคเป็นจำนวนมากในสารละลายและความอิ่มตัวของตัวยิ่งยวดจะถูกใช้ในการเพิ่มขนาดของผลึกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความอิ่มตัวของตัวยิ่งยวดที่เหลือในสารละลายลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกลดลง ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก

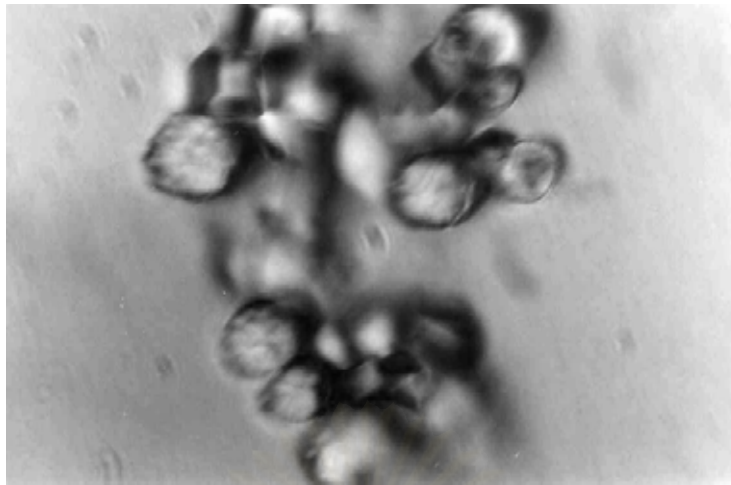


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1
 ↑
 ก่อนปรับค่า pH
 ↓

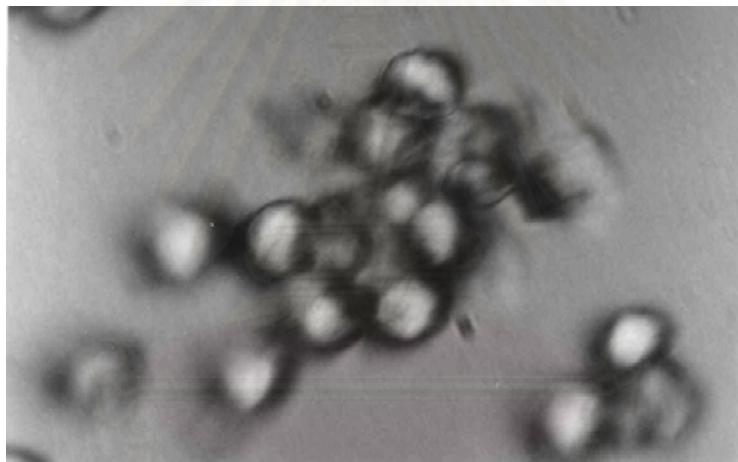


รูปที่ 4.22 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆ



10 μm

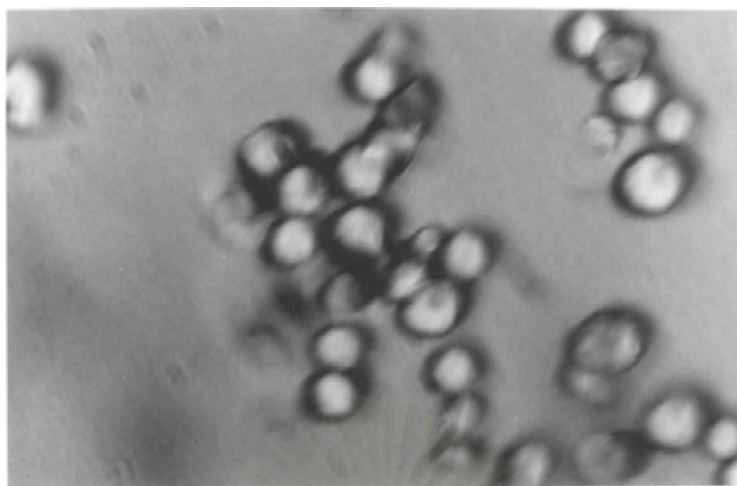
(ก)



10 μm

(ข)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน
 (ก) 200 รอบต่อนาที (ข) 300 รอบต่อนาที

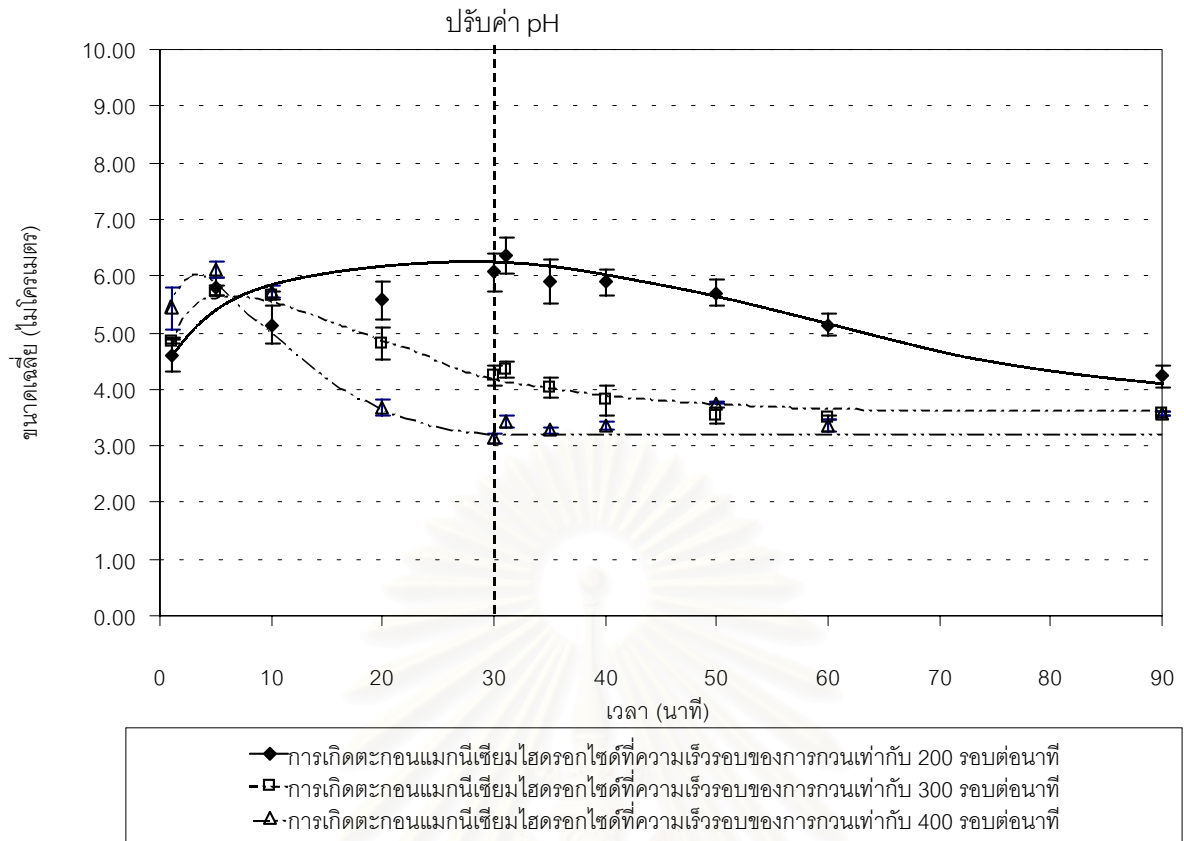


10 μm
(ค)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน
(ต่อ)
(ค) 400 รอบต่อนาที

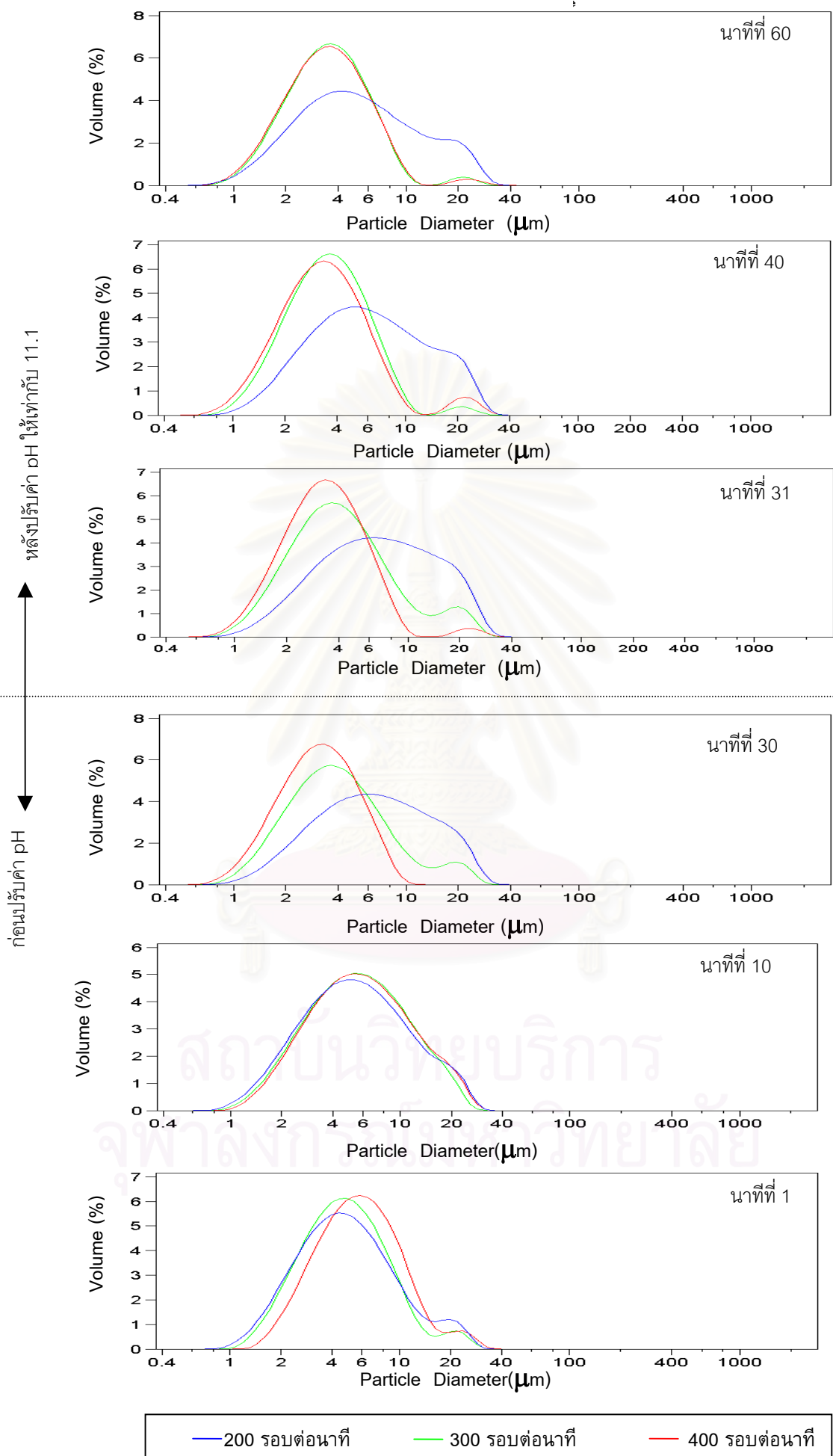
เมื่อพิจารณาขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนขนาดของตะกอนตามเวลาจะใกล้เคียงกันคือ ตะกอนจะมีขนาดใหญ่ในช่วงแรกของการเกิดตะกอน จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดที่เล็กลงเนื่องจากเกิดการแตกตัว และเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าขนาดของตะกอนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ขนาดของตะกอนยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนเมื่อถึงเวลาหนึ่งขนาดของตะกอนจะเข้าสู่ค่าคงที่ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.24

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันพบว่า ในช่วงแรกตะกอนจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงตะกอนจะมีขนาดเล็กลงและเข้าสู่ค่าคงที่ได้รวดเร็วกว่าตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ และขนาดของตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนสูงจะเล็กกว่าตะกอนที่ความเร็วรอบต่ำเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟการกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันดังรูปที่ 4.25

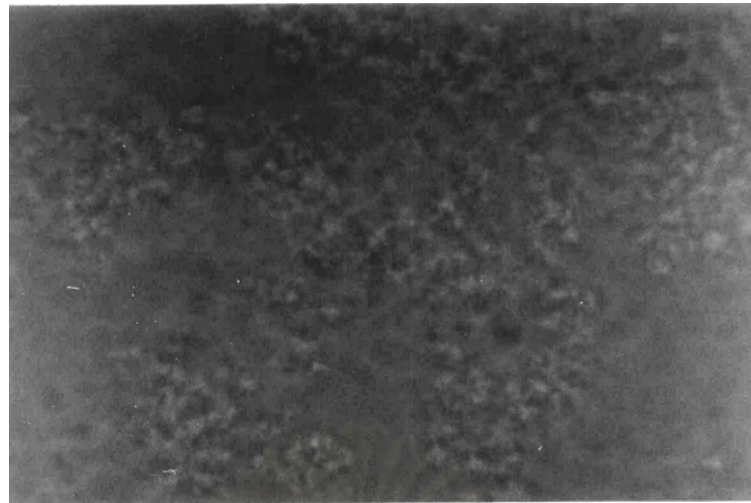


รูปที่ 4.24 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน

ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mullin และคณะ, 1989 ซึ่งพบว่าเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่ามากขึ้นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีการแตกตัวเร็วขึ้นและขนาดสุดท้ายของตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนสูงก็จะต่ำกว่าตะกอนที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้อนุภาคที่รวมตัวกันมีการเคลื่อนที่มากขึ้นและเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคด้วยตัวเองหรือกับผนังของภาชนะหรือใบพัดมากขึ้นจึงส่งผลให้อนุภาคมีการแตกตัวที่รวดเร็วกว่าและมีขนาดที่เล็กกว่าอนุภาคที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กันจากภาพถ่ายของตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าจะพบว่าตะกอนมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนมีขนาดเล็ก มีรูปร่างของผลึกที่ไม่ชัดเจนและเกาะตัวกันอยู่เป็นกลุ่มจึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างได้ดังรูปที่ 4.26

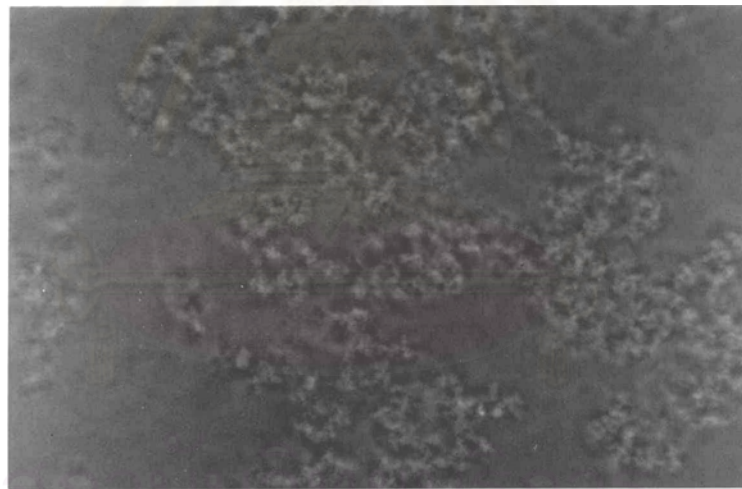


รูปที่ 4.25 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่างกัน



10 μm

(ก)



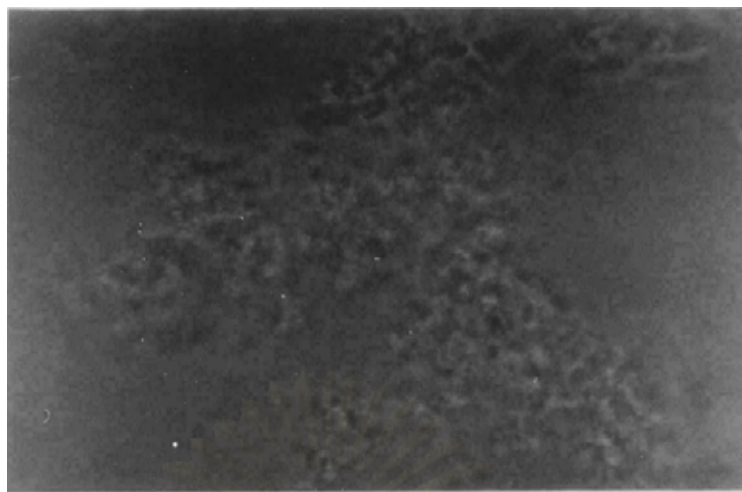
10 μm

(ข)

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆ
กัน

(ก) 200 รอบต่อนาที

(ข) 300 รอบต่อนาที



10 μm

(ค)

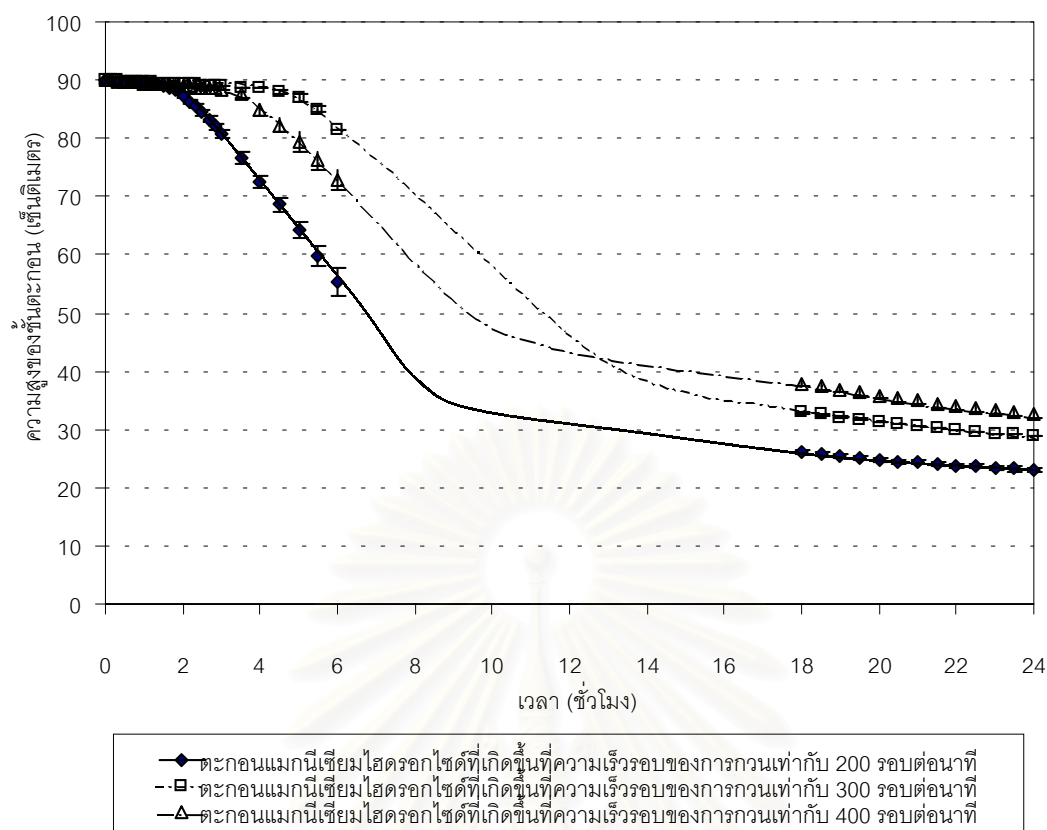
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆ
กัน (ต่อ)
(ค) 400 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ผลของความเร็รรอบที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอนพบว่า ในกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ การตกตะกอนจะรวดเร็วมากซึ่งภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงการตกตะกอนจะสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันจะมีการกระจายของขนาดที่ค่อนข้างกว้างและไม่จับกลุ่มกันทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้ไม่สามารถเปรียบเทียบความเร็วของการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเร็วของการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันจะได้ผลดังรูปที่ 4.27 โดยพบว่าที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำๆนั้น (200 รอบต่อนาที) ตะกอนที่เกิดขึ้นจะตกตะกอนด้วยความเร็วที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่เมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงขึ้น (300 และ 400 รอบต่อนาที) ตะกอนที่เกิดขึ้นจะตกตะกอนได้ช้าลง ทั้งนี้อธิบายได้จากผลการทดลองในหัวข้อ ค. ซึ่งให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบของการกวนน้อยๆนั้นผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีการรวมตัวกันค่อนข้างสูง ผลึกจะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักรวมมาก จึงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากรูปจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของการกวนให้สูงขึ้นจนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที ตะกอนที่เกิดขึ้นกลับตกตะกอนได้เร็วกว่าที่ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ซึ่งผลดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงนั้น ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีการแตกตัวมากและมีขนาดเล็กลง เมื่อนำมาทำการตกตะกอนอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของอนุภาคมีมากขึ้น ทำให้อนุภาคจะเกิดการดูดซับกับอนุภาครอบข้างได้มากขึ้น เกิดเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาตรของชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงจะพบว่า ปริมาตรของชั้นตะกอนจะลดลงเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของการกวนลดลงอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักรวมมากขึ้นจึงส่งผลให้การกดอัดตัวของตะกอนเพิ่มขึ้น ปริมาตรของชั้นตะกอนจึงลดลง



รูปที่ 4.27 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแมงกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

4.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว

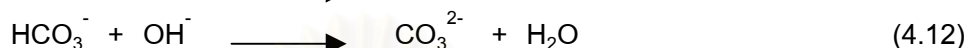
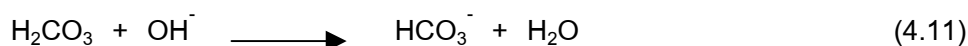
จากการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยนำสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยในขั้นตอนของกระบวนการเกิดตะกอนนั้นจะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยเติมละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปก่อนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไป แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นและความเร็วของการตกตะกอน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบที่ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายมีค่าเท่ากัน โดยผลของการทดลองมีดังนี้

ก. ผลของการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน

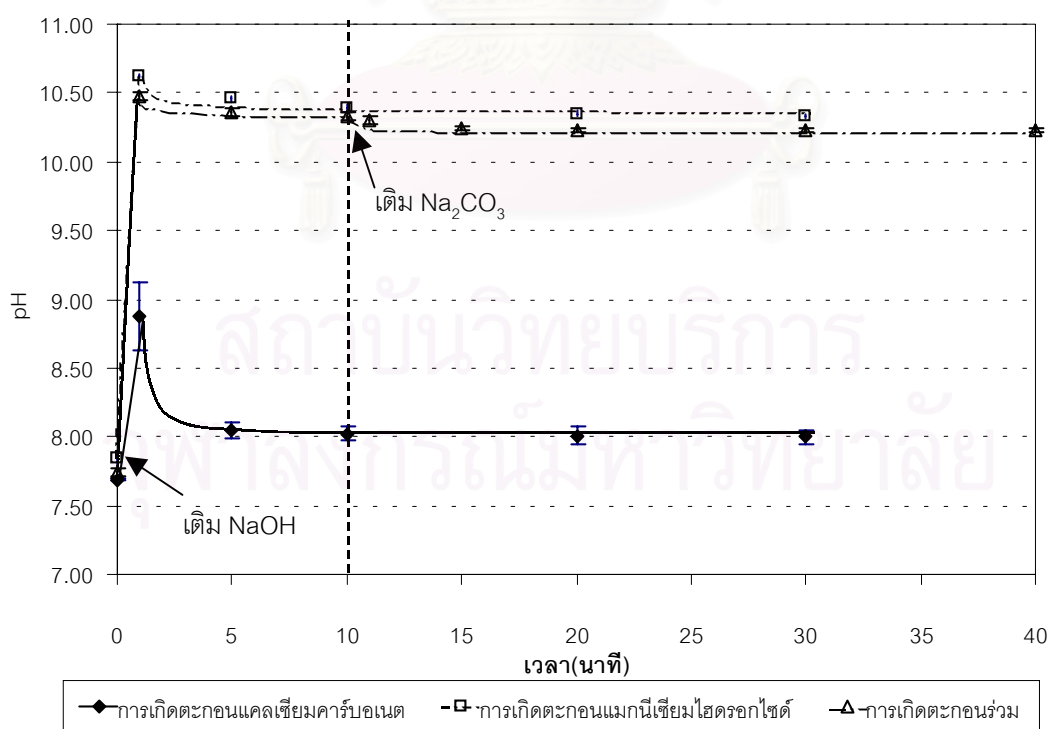
จากการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะได้ผลดังรูปที่ 4.28 โดยพบว่าก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7-8) จากนั้นเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าสารละลายจะมีค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า pH ของสารละลายจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที จะทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งพบว่าสารละลายจะมีค่า pH ลดลงเล็กน้อยและจะเข้าสู่ค่าคงที่หลังจากเริ่มทำปฏิกิริยาไปประมาณ 10 นาที

จากการเปรียบเทียบค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวพบว่า ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่จะต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ณ สภาวะสมดุลการละลายของตะกอนร่วม ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายให้แอนไอออนคือ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะละลายให้แอนไอออนคือ คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งจากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะส่ง

ผลให้ในสารละลายของตะกอนร่วมมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมากกว่ากรณีการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว จึงทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่ามากกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต อย่างไรก็ตามไบคาร์บอเนตไอออนและกรดคาร์บอนิกที่เกิดจากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนที่อยู่ในสารละลายตามสมการข้างล่างนี้ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)



ซึ่งจะมีผลให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามจากรูปจะเห็นว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมจะต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่สมดุลในสารละลายมีค่าน้อยลง ส่งผลให้สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เสียไปและระบบจะต้องปรับตัวให้เข้าสู่สมดุลใหม่ในทิศทางที่เพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน นั่นคือตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายเพิ่มขึ้นซึ่งผลดังกล่าวจะช่วยทดแทนไฮดรอกไซด์ไอออนบางส่วนที่หายไปทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมไม่ต่ำกว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวมากนัก



รูปที่ 4.28 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

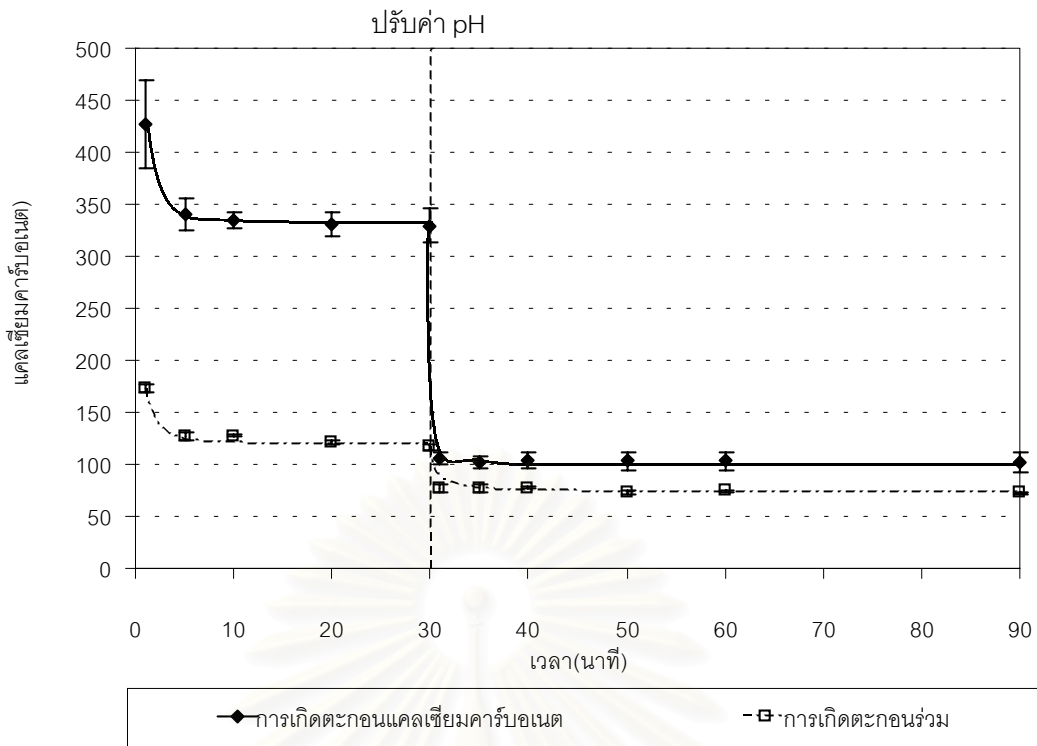
ข. ผลของการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วม โดยจะเริ่มทำการพิจารณาหลังจากเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปแล้ว โดยพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นทำการพิจารณาและจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณค่าที่ 10 แต่ในกรณีของแมกนีเซียมไอออนพบว่าจะมีค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มทำการพิจารณาเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นแล้ว 10 นาที จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.29 ก.และข.

โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะพบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากในระบบของการเกิดตะกอนร่วมนั้นจะมีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ด้วยกันซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนบางส่วนที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ตามสมการ 4.11 และ 4.12 ทำให้ในสารละลายมีปริมาณคาร์บอเนตไอออนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ระบบเสียสมดุลและระบบจะต้องปรับตัวให้เข้าสู่สมดุลใหม่ในทิศทางที่ลดคาร์บอเนตไอออนนั่นคือเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น จากผลดังกล่าวจึงทำให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าลดลง

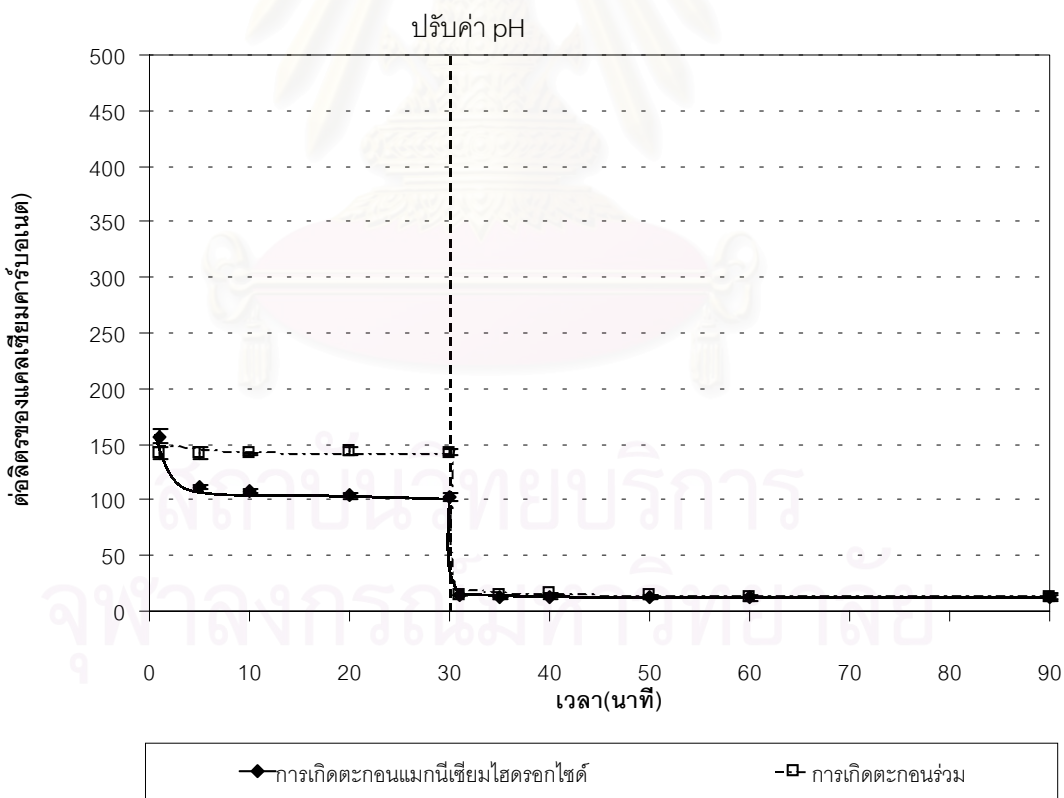
อย่างไรก็ตามเมื่อได้ทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมและการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีค่าเท่ากันแล้วจะพบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนนั้นจะเป็นการปรับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ปริมาณของแคลเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย(มิลลิกรัมต่อลิตรของ



(ก)

ปริมาณของแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย(มิลลิกรัม



(ข)

รูปที่ 4.29 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม
 (ก) ปริมาณของแคลเซียมไอออน (ข) ปริมาณของแมกนีเซียมไอออน

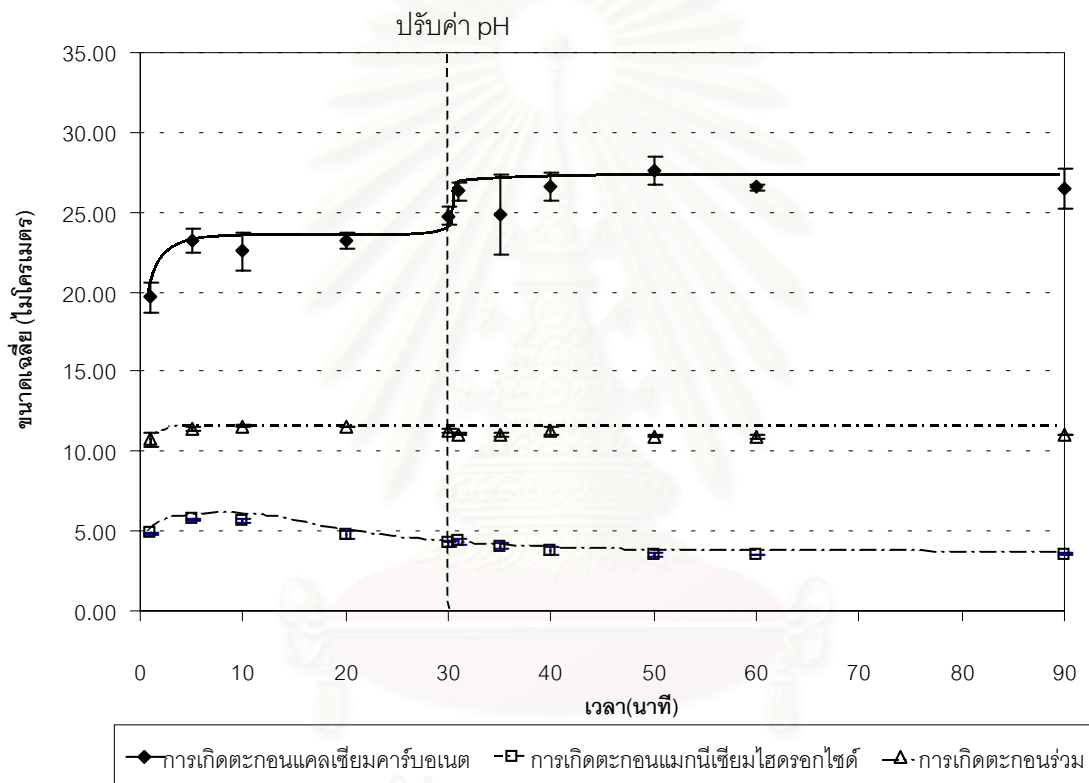
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายพบว่า ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่ามากกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากในระบบของการเกิดตะกอนร่วมนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนหนึ่งจะถูกจะใช้ไปในการเปลี่ยนกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ในสารละลายให้กลายเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) อันจะทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายลดลง ส่งผลให้สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เสียไปและระบบจะต้องปรับให้เข้าสู่สมดุลใหม่ที่ทิศทางที่เพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออนให้กับสารละลายนั่นคือตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมและการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าเท่ากันพบว่า ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนนั้นจะเป็นการปรับปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งจะมีผลให้ความสามารถของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ใกล้เคียงกัน ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าเมื่อทำการควบคุมค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าเท่ากันแล้วค่าความสามารถในการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการเกิดตะกอนร่วมยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตะกอนที่เกิดจากการเกิดตะกอนเพียงชนิดเดียว

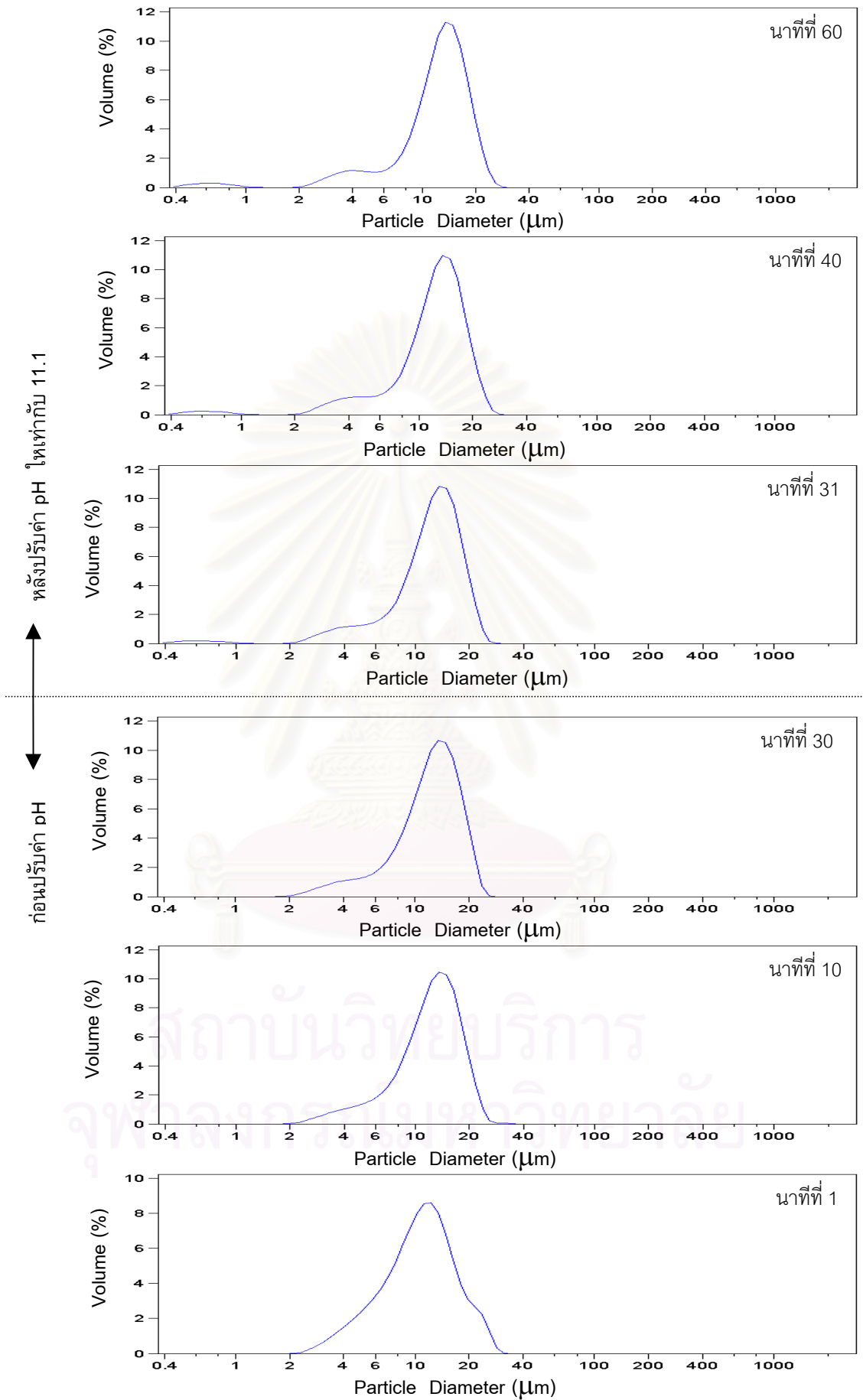
ค. ผลของการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะได้ผลดังรูปที่ 4.30 โดยพบว่าตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการเกิดตะกอนจะมีขนาดเล็ก จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเล็กน้อยและจะเข้าสู่คงที่อย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าสูงขึ้นพบว่าตะกอนยังคงมีขนาดเท่าเดิมและจะคงที่จนจบการทดลองซึ่งกราฟการกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เวลาต่างๆกันจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.31



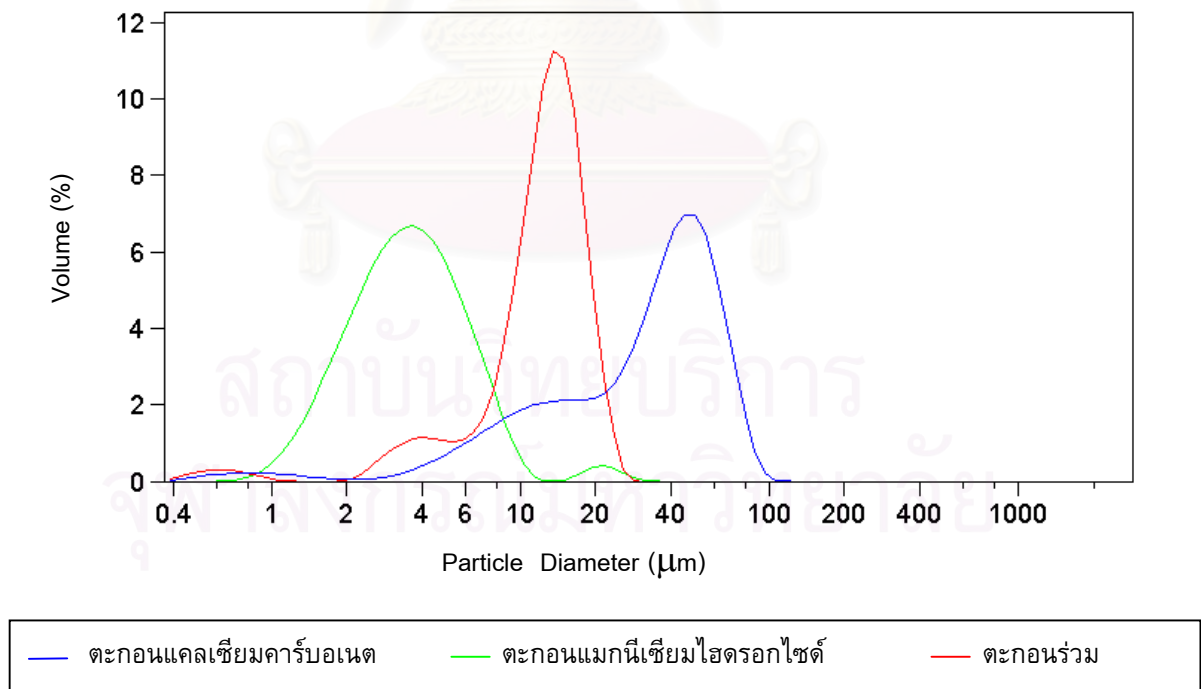
รูปที่ 4.30 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม

โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า ตะกอนร่วมจะมีขนาดเฉลี่ยที่เล็กกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟการกระจายขนาดของตะกอนร่วมพบว่า ตะกอนร่วมจะมีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงระหว่างตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังรูปที่ 4.32



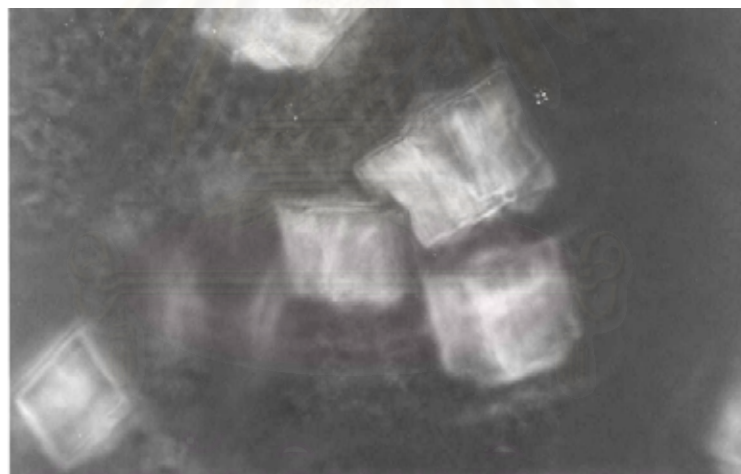
รูปที่ 4.31 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ กัน

ซึ่งผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนจากภาพถ่ายซึ่งถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยพบว่าตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นมีลักษณะของการดูดจับกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะประกอบไปด้วยพื้นที่ผิวเป็นจำนวนมากจึงมีความเหมาะสมต่อการดูดจับกับผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต (Vuuren และคณะ, 1967) ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อาจเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เนื่องจากในการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำน้ำอ่อนจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ในขณะที่ผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีประจุเป็นบวก (Black และ Christman, 1961) จึงส่งผลให้เมื่อผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันจะเกิดการดูดจับกัน นอกจากนี้ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในระบบจะส่งผลให้การรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตลดลงเนื่องจากจะทำให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการชนกันเองที่น้อยลงและผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้พื้นที่ผิวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่สามารถเกิดการรวมตัวกันได้ลดลง ด้วยเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแต่จะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.32 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนร่วม

นอกจากนี้จากภาพถ่ายของตะกอนร่วมยังสังเกตเห็นได้ว่าผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปแบบของแคลไซต์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากันคือ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (ดูรูปที่ 4.14 ข.) พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบของวาทอไรท์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนร่วมนั้นได้ทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้การเกิดนิวเคลียสของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous nucleation) ที่ได้รับอิทธิพลจากผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะช่วยลดพลังงานที่ต้องใช้ในการเกิดนิวเคลียสลง ทำให้การเกิดนิวเคลียสของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นที่ความอิ่มตัวที่ยังยวดยต่ำลง ส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปแบบของแคลไซต์ซึ่งเป็นรูปแบบที่เสถียรกว่าตามกฎของ Ostwald (Ostwald 's step rule)



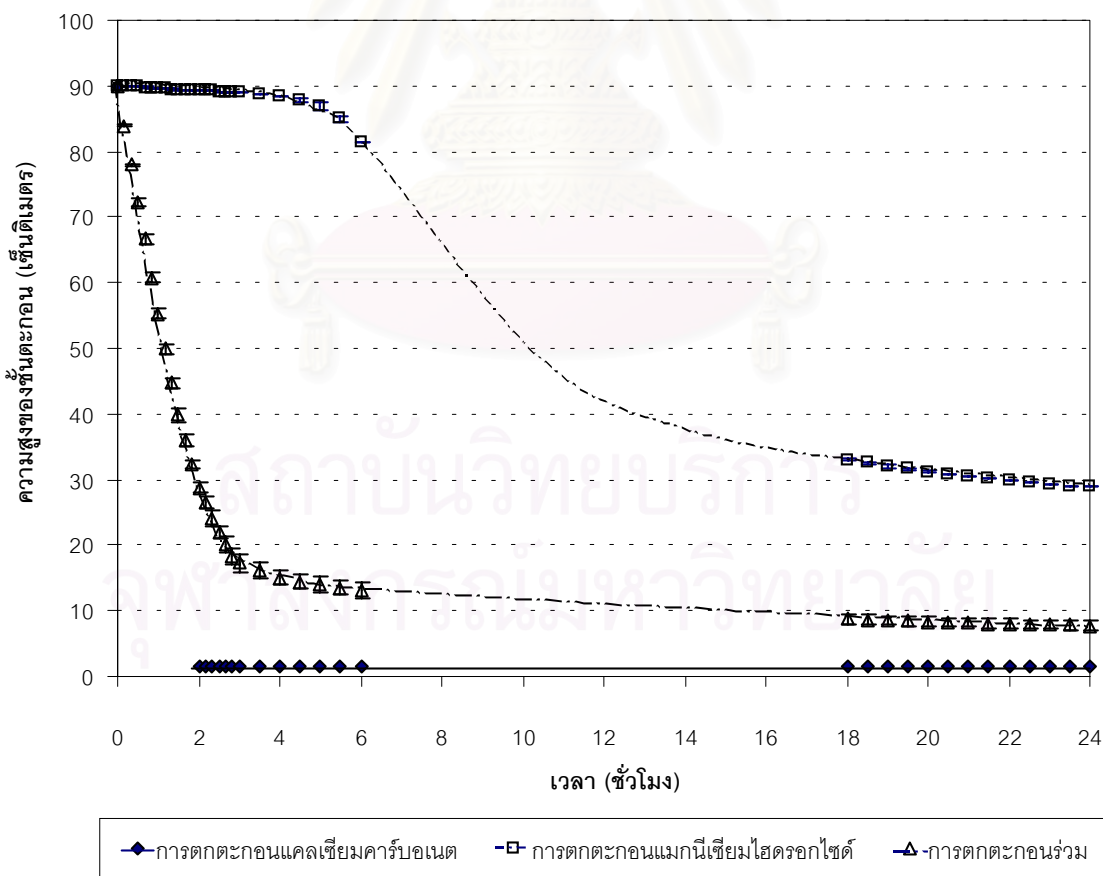
10 μ m

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมจากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1000 เท่า

ง. ผลของการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอน โดยเปรียบเทียบกับ ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า ตะกอนร่วมจะมีความเร็วของการตกตะกอนมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แต่จะช้ากว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.34 ทั้งนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากตะกอนร่วมมีลักษณะของการดูดจับกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดที่ใหญ่กว่าและมีน้ำหนักมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ตะกอนร่วมมีความเร็วของการตกตะกอนมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วตะกอนร่วมยังคงมีขนาดและน้ำหนักของตะกอนที่น้อยกว่าทำให้ความเร็วในการตกตะกอนของตะกอนร่วมยังคงช้ากว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาตรของชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงพบว่า ตะกอนร่วมจะมีปริมาตรของชั้นตะกอนน้อยกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากตะกอนร่วมมีน้ำหนักมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้การกอดตัวของชั้นตะกอนมีมากขึ้น ปริมาตรของชั้นตะกอนจึงลดลง



รูปที่ 4.34 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม

4.4 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

4.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

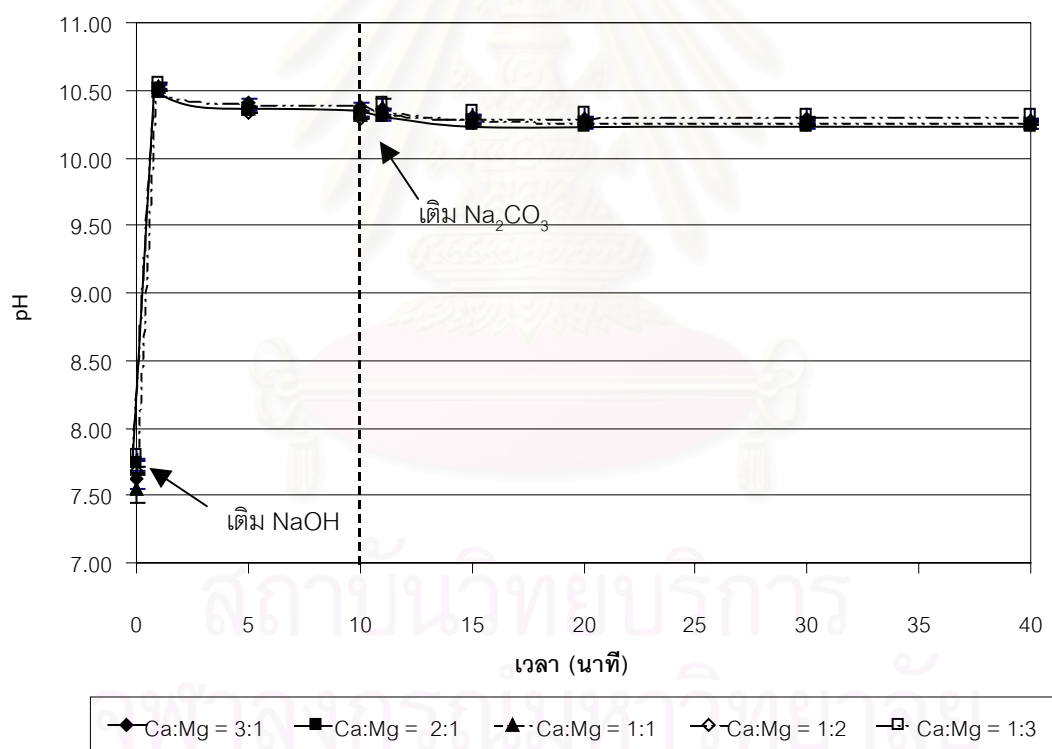
การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมจะกระทำโดยนำสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นต่างๆกันตามตารางที่ 4.1 มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยาและใช้ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยในขั้นตอนของกระบวนการเกิดตะกอนนั้นจะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยเติมละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปก่อนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไป แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอน โดยในการทดลองนี้จะทำการกำหนดให้ค่าไอออนิกสเตรนจ์ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันมีค่าเท่ากันโดยจะกำหนดให้ความเข้มข้นทั้งหมดของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าเท่ากันคือ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่างๆกัน

อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น	ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้น	
	แคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)	แมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)
3:1	13,500	4,500
2:1	12,000	6,000
1:1	9,000	9,000
1:2	6,000	12,000
1:3	4,500	13,500

ก. ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของการเกิดตะกอนตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7-8) จากนั้นเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าสารละลายจะมีค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า pH ของสารละลายจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที จะทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งพบว่าสารละลายจะมีค่า pH ลดลงเล็กน้อยและจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่หลังจากเริ่มทำปฏิกิริยาไปประมาณ 10 นาทีดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน

เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการกำหนดค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายให้มีค่าคงที่จะมีผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิกและไบคาร์บอเนตไอออนตามสมการที่ 4.11 และ 4.12 มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตามหลังจากการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 30 นาที ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันจะถูกปรับให้เท่ากันและเท่ากับ 11.1

ข. ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันโดยจะเริ่มทำการพิจารณาหลังจากเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไปแล้วพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายตามเวลาของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันจะใกล้เคียงกันคือ ปริมาณของแคลเซียมไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นทำการพิจารณาและจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณวันที่ 10 แต่ในกรณีของแมกนีเซียมไอออนพบว่าจะมีค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มทำการพิจารณาเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้เกิดขึ้นก่อนหน้านี้อแล้ว 10 นาที หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.36 ก. และ ข.

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าจากการพิจารณาปริมาณแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.9 จะพบว่าจากการกำหนดให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายให้มีค่าคงที่จะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายในทำนองเดียวกันได้ว่า จากการพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.10 พบว่าจากการกำหนดให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายให้มีค่าคงที่จะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

ต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่สมมูลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

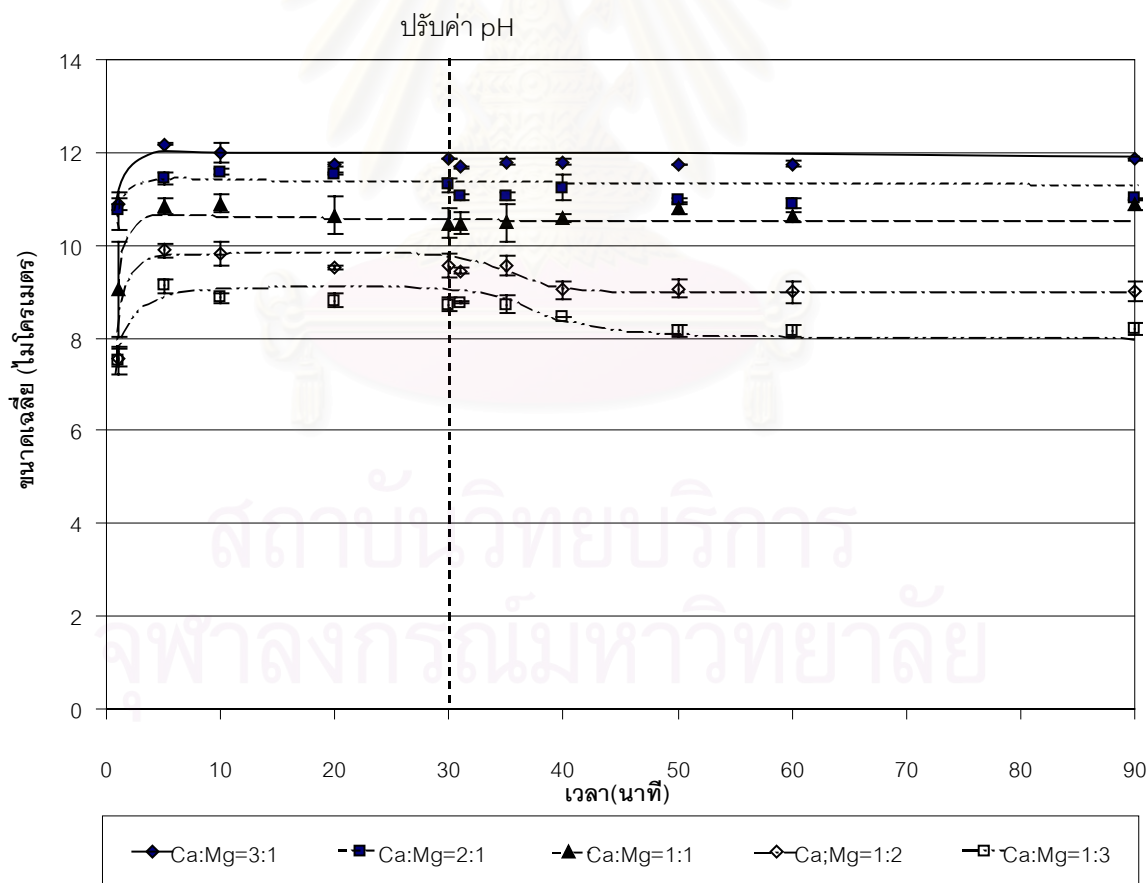
จากผลการทดลองข้างต้นซึ่งให้เห็นว่าเมื่อได้ทำการกำหนดค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายให้มีค่าคงที่แล้วการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นของการเกิดตะกอนร่วมจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมาทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคจะได้ผลดังรูปที่ 4.37 โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ในช่วงแรกของการเกิดตะกอนนั้นตะกอนยังคงมีขนาดเล็กแต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยและจะมีขนาดที่คงที่ จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าขนาดของตะกอนยังคงไม่เปลี่ยนแปลงและจะมีขนาดที่คงที่จนจบการทดลอง ยกเว้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าน้อยๆเช่นเท่ากับ 1:3 จะพบว่าเมื่อทำการกวนจนถึงเวลาหนึ่งขนาดของตะกอนจะมีค่าลดลงเล็กน้อยและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าลดลงจะส่งผลให้ตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นมีส่วนประกอบของอนุภาคแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ตะกอนร่วมมีความแข็งแรงลดลง ตะกอนจึงเกิดการแตกตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

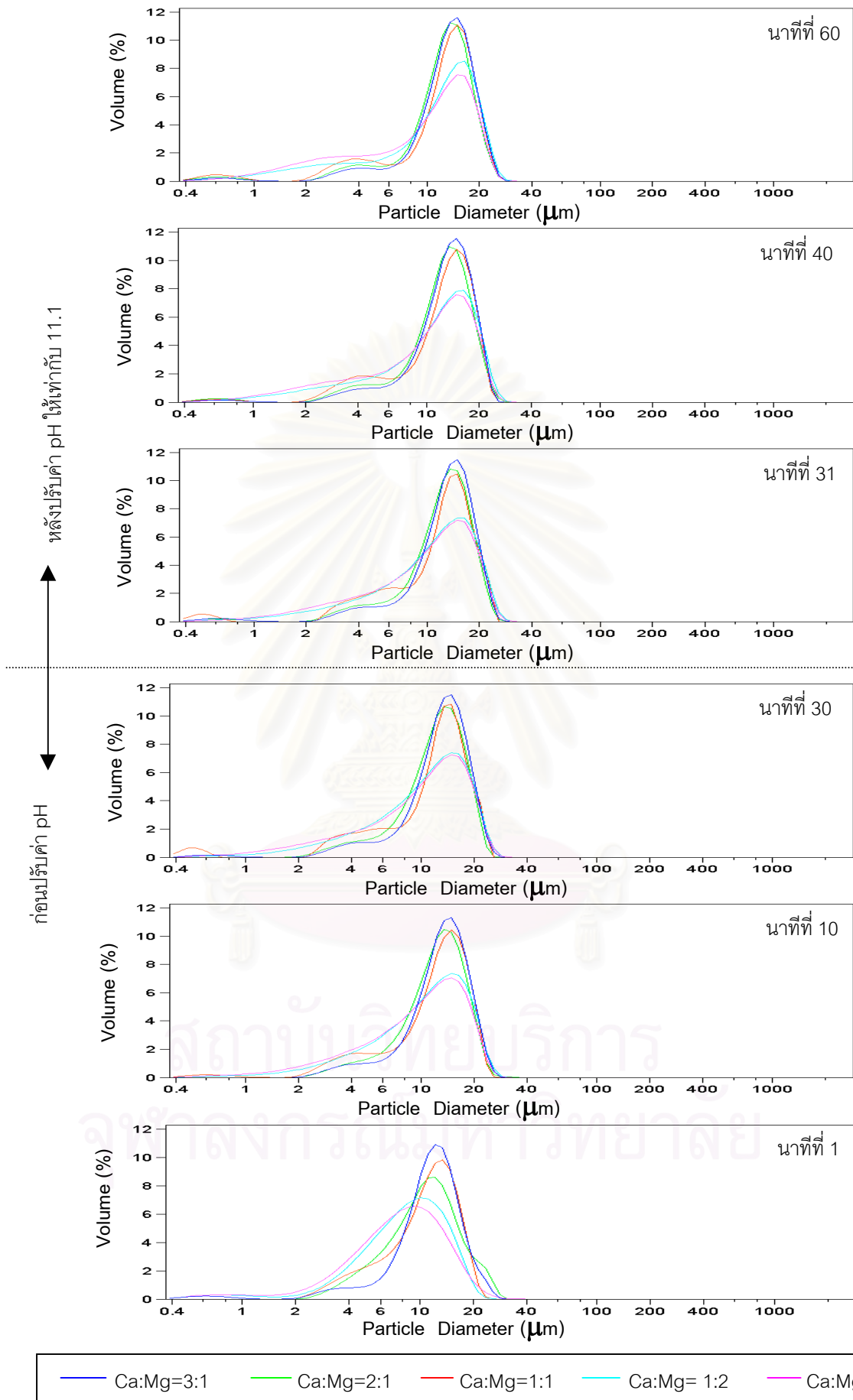


รูปที่ 4.37 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

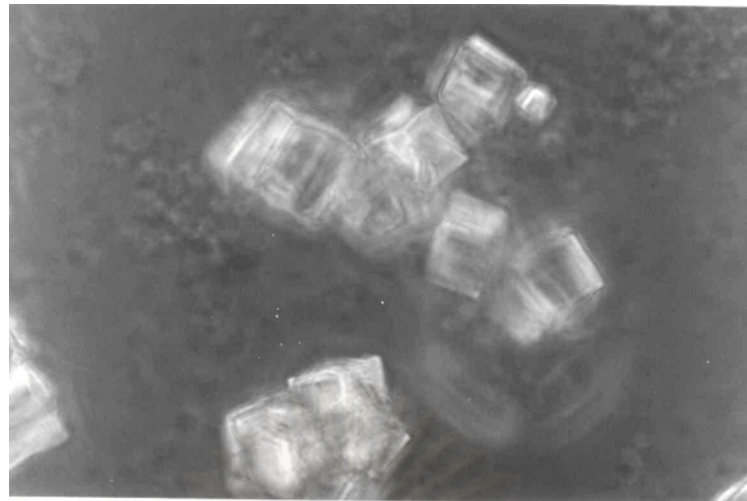
เมื่อเปรียบเทียบขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่า ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกราฟการกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.38 โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคขนาดใหญ่มีจำนวนมากขึ้น ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กมีจำนวนลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าดังรูปที่ 4.39 โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นนั้นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการรวมตัวกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนนั้น ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากจึงส่งผลให้โอกาสที่ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดการชนกันแล้วเกิดการรวมตัวกันมีเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

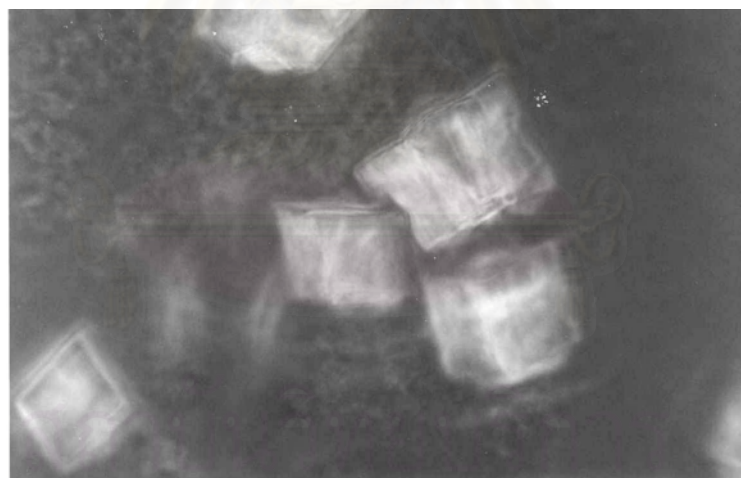


รูปที่ 4.38 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน



10μm

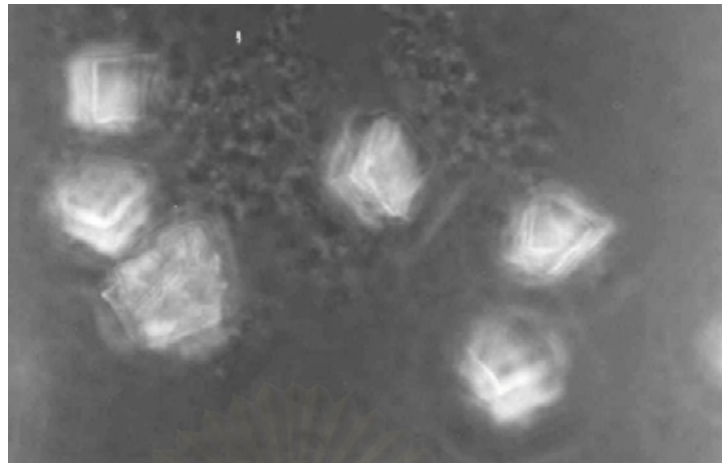
(ก)



10μm

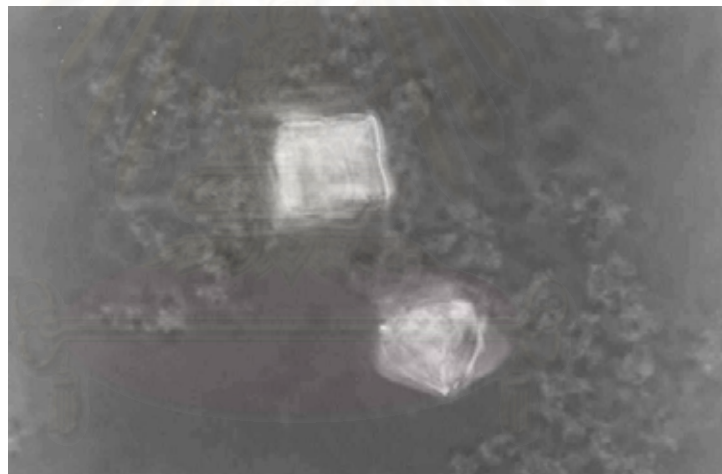
(ข)

รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างกัน
 (ก) อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 3:1
 (ข) อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 2:1



10μm

(ค)

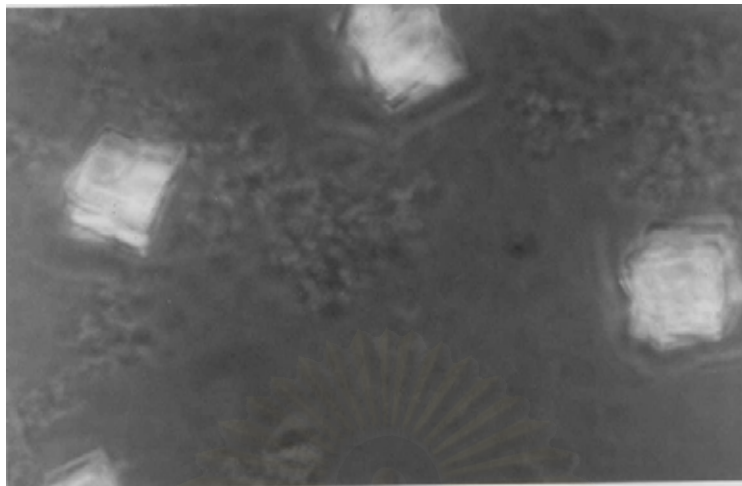


10μm

(ง)

รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ต่อ)

- (ค) อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:1
- (ง) อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:2



10 μ m

(จ)

รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ต่อ)

(จ) อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:3

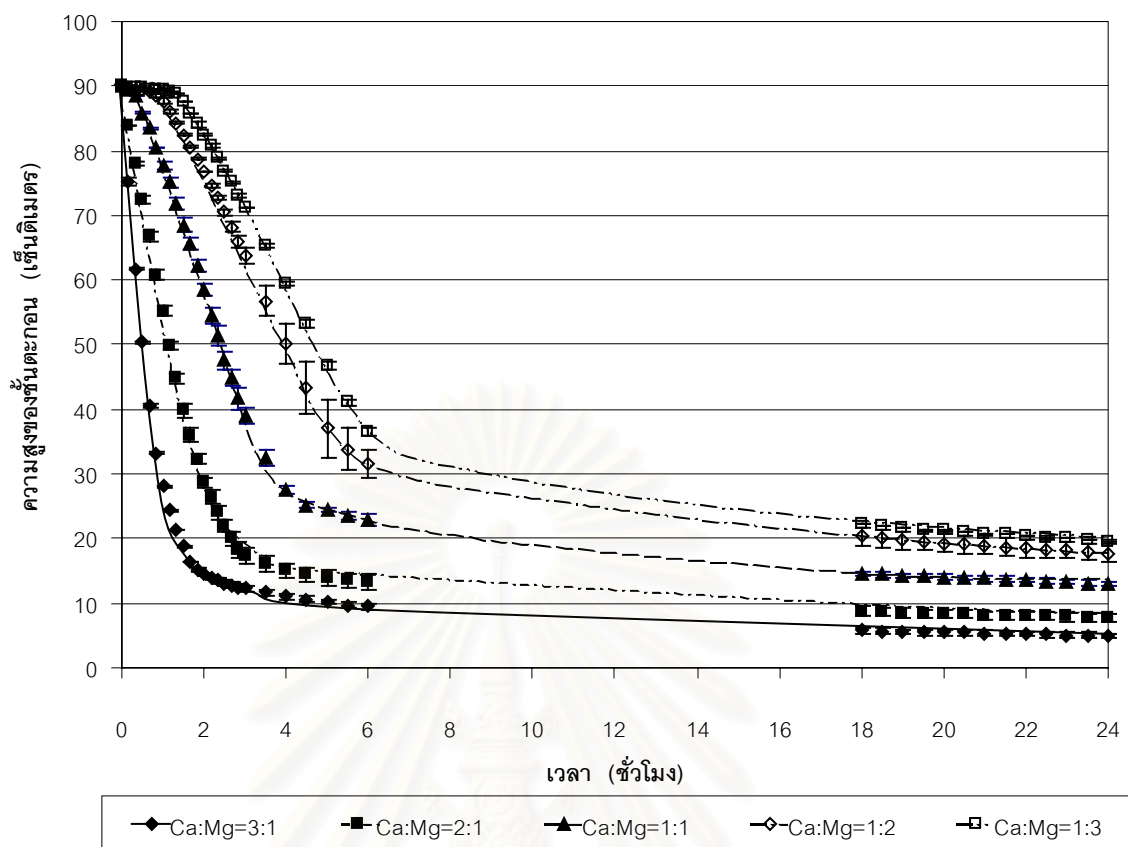
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง. ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีผลต่อความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอนพบว่า ความเร็วของการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.40 ทั้งนี้อธิบายได้ว่าจากผลการศึกษานาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันในหัวข้อ ค. พบว่า การที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการรวมตัวกันมากขึ้น ส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้นจึงทำให้ความเร็วของการตกตะกอนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเข้มข้นของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนร่วมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความเร็วของการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีผลที่สำคัญต่อลักษณะของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมดังจะเห็นได้จากเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าต่ำเช่นเท่ากับ 1:3 โดยในสารละลายจะประกอบไปด้วยผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนจะช้ามากในช่วงแรกของการตกตะกอนทั้งนี้ลักษณะดังกล่าวจะใกล้เคียงกับการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาตรของชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงพบว่าปริมาตรของชั้นตะกอนจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงนั้นตะกอนร่วมจะมีน้ำหนักมาก ส่งผลให้การกดอัดตัวของตะกอนมีมากขึ้นปริมาตรของชั้นตะกอนจึงลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.40 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน

4.4.2 ผลของความเร็วยรอบของการกวน

การศึกษาผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมจะกระทำโดยนำสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วยรอบของการกวนเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยในขั้นตอนของกระบวนการเกิดตะกอนนั้นจะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยเติมละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปก่อนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไป แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอน ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

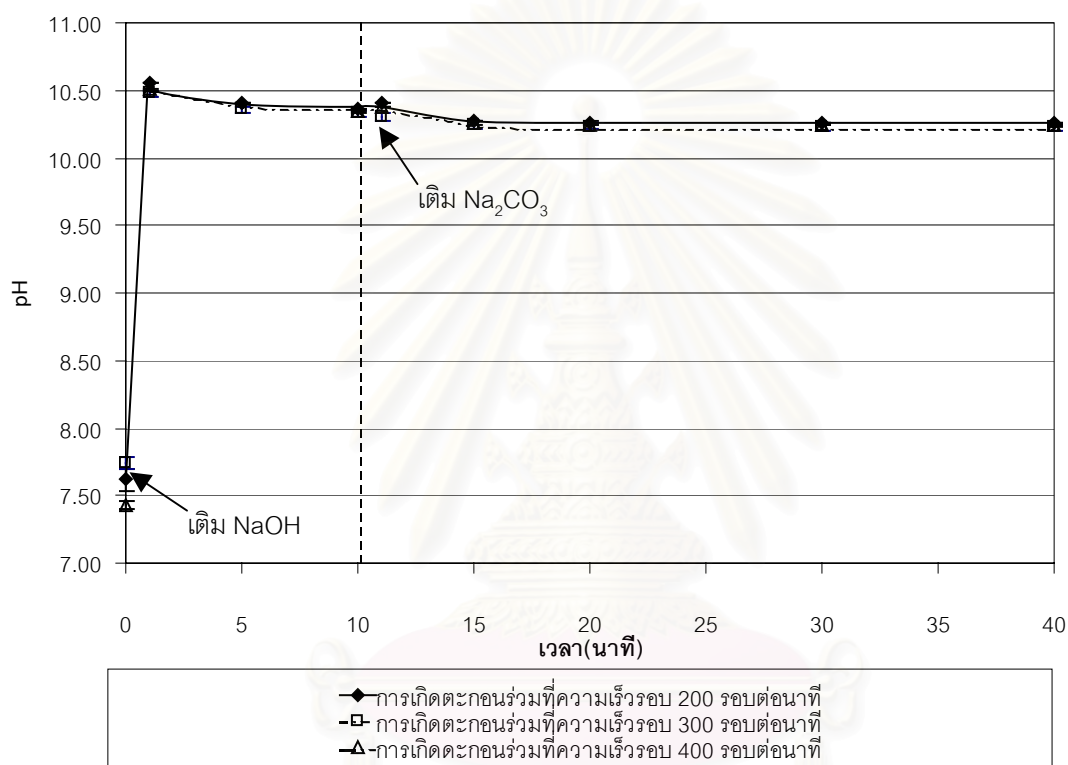
ก. ผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีผลต่อค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของการเกิดตะกอนตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมีค่า pH เป็นกลาง (ประมาณ 7-8) จากนั้นเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าสารละลายจะมีค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่า pH ของสารละลายจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที จะทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งพบว่าสารละลายจะมีค่า pH ลดลงเล็กน้อยและจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่หลังจากเริ่มทำปฏิกิริยาไปประมาณ 10 นาทีดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.41

เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายในทำนองเดียวกับผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นได้ว่า จากการกำหนดให้สารตั้งต้นมีค่าคงที่จะส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก ค่าคงที่ของสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่ถูก

ใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิกและไบคาร์บอเนตไอออนตามสมการที่ 4.11 และ 4.12 มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตามหลังจากการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 30 นาที ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันจะถูกปรับให้เท่ากันและเท่ากับ 11.1



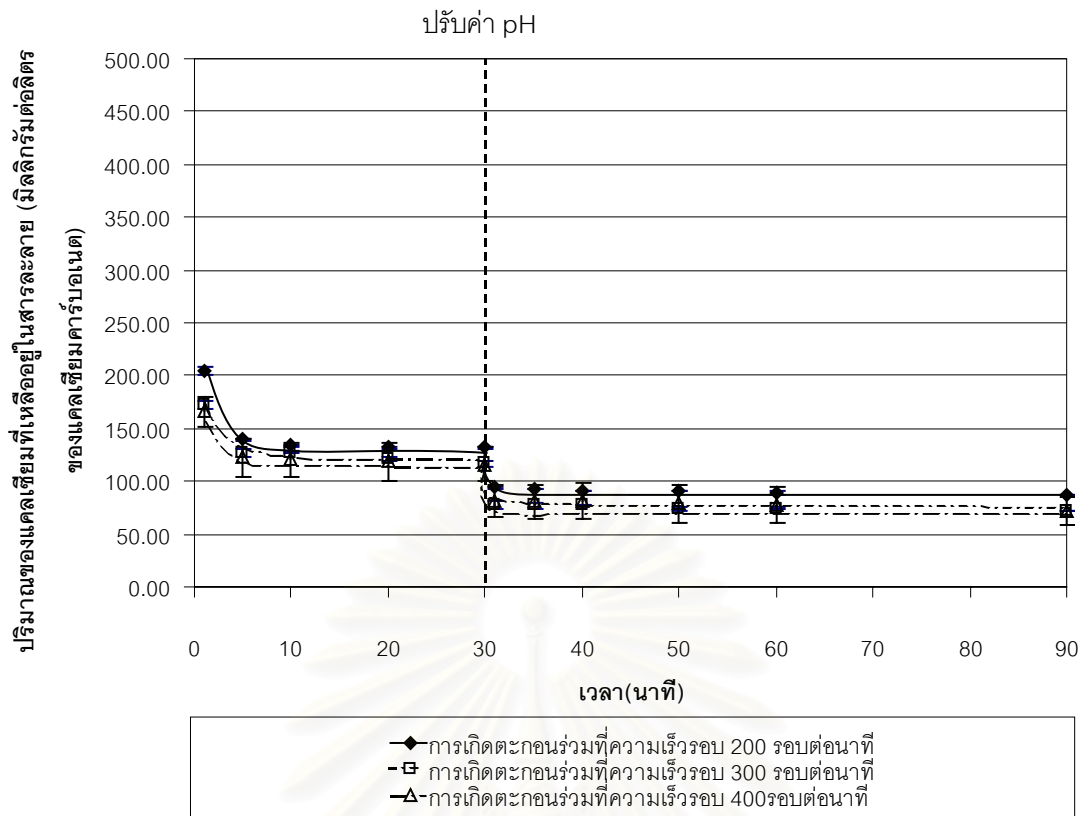
รูปที่ 4.41 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

ข. ผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีผลต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย

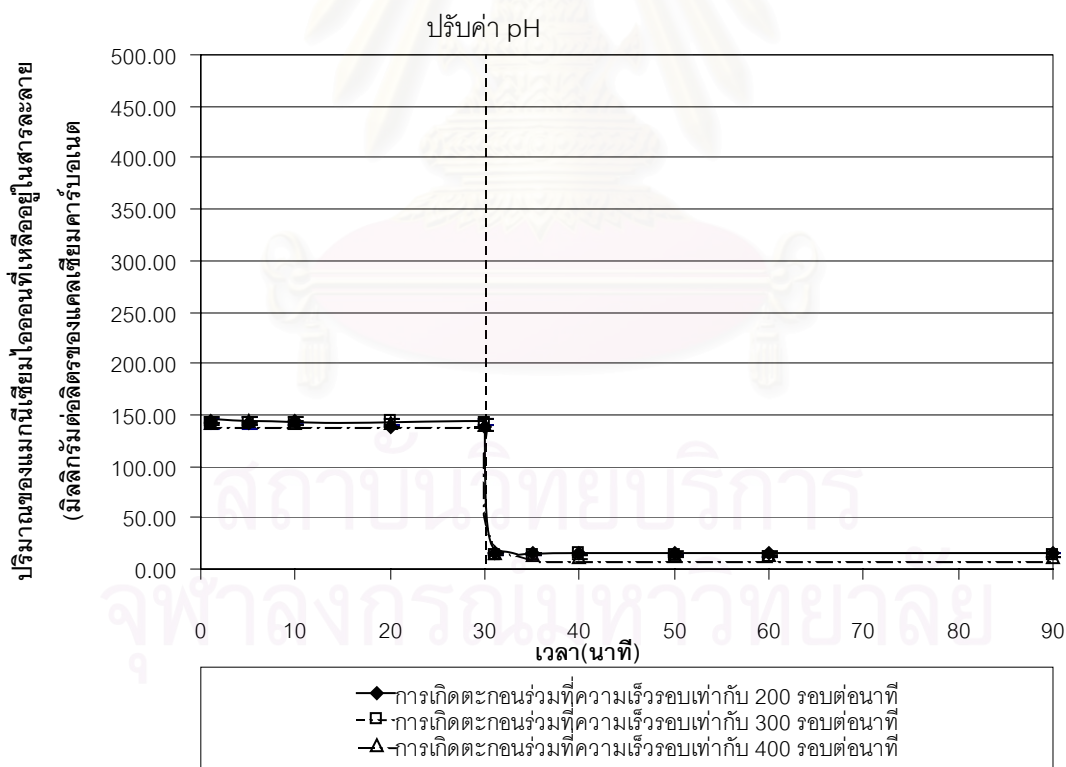
จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันโดยจะเริ่มทำการพิจารณาหลังจากเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไปแล้ว โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายตามเวลาของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันจะใกล้เคียงกันคือ ปริมาณของแคลเซียมไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นทำการพิจารณาและจะเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณนาที่ที่ 10 แต่ในกรณีของแมกนีเซียมไอออนพบว่าจะมีค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มทำการพิจารณาเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นแล้ว 10 นาที หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและจะเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งหนึ่งดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.42 ก. และ ข.

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันพบว่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าจากการพิจารณาปริมาณแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.9 จะพบว่าจากการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าคงที่ซึ่งจะมีผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกันนั้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าที่ใกล้เคียงกันด้วย และจากผลการทดลองในข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันพบว่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายในทำนองเดียวกันได้ว่า จากการพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.10 จะพบว่าจากการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าคงที่อันจะมีผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกันนั้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมีค่าใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองในหัวข้อ ก. ซึ่งให้เห็นว่าค่า pH



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.42 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

(ก) ปริมาณของแคลเซียม

(ข) ปริมาณของแมกนีเซียม

ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเหมือนกับช่วงแรกก่อนทำการปรับค่า pH ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

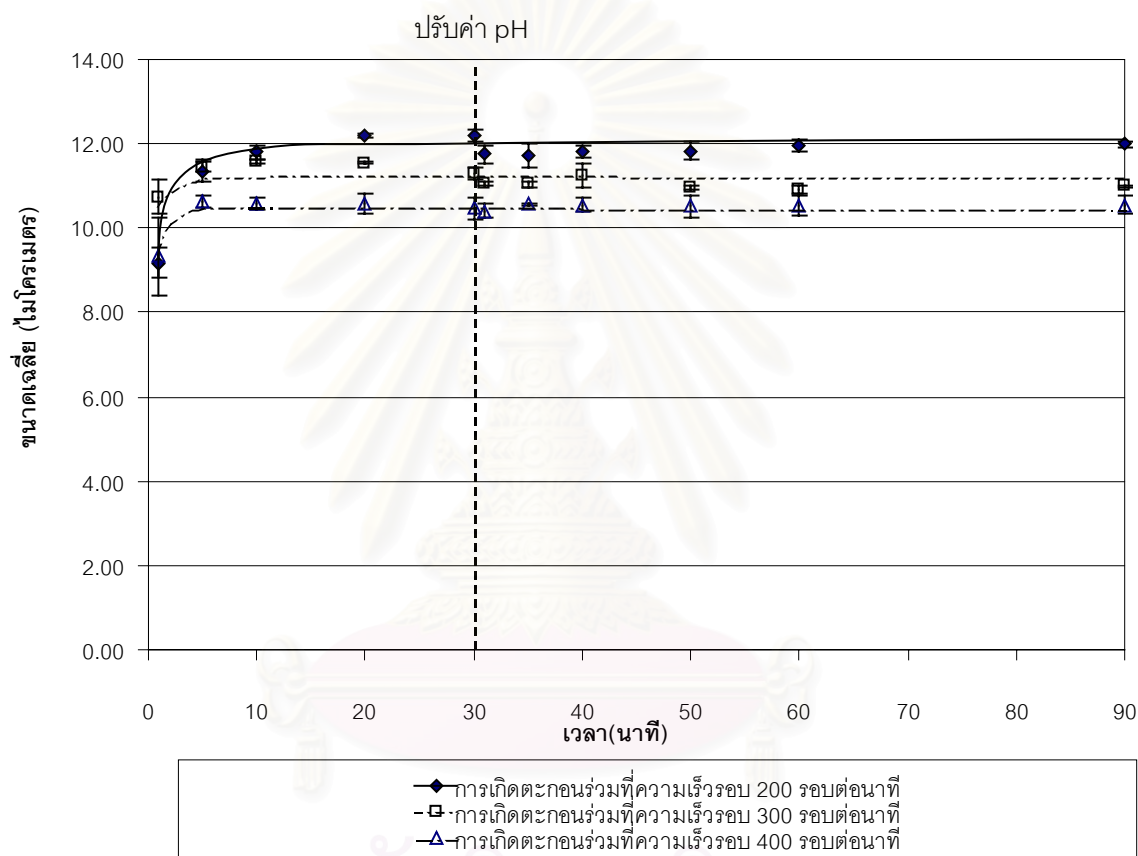
จากผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าเมื่อทำการควบคุมค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมให้มีค่าคงที่แล้วการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของการกวนจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. ผลของความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันมาทำการวัดขนาดของอนุภาคจะได้ผลดังรูปที่ 4.43 โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันตามเวลาจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ ในช่วงแรกของการเกิดตะกอนนั้นตะกอนยังคงมีขนาดเล็กและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยและเข้าสู่ค่าคงที่อย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนพบว่าขนาดของตะกอนยังคงไม่เปลี่ยนแปลงและจะมีค่าที่คงที่จนจบการทดลอง



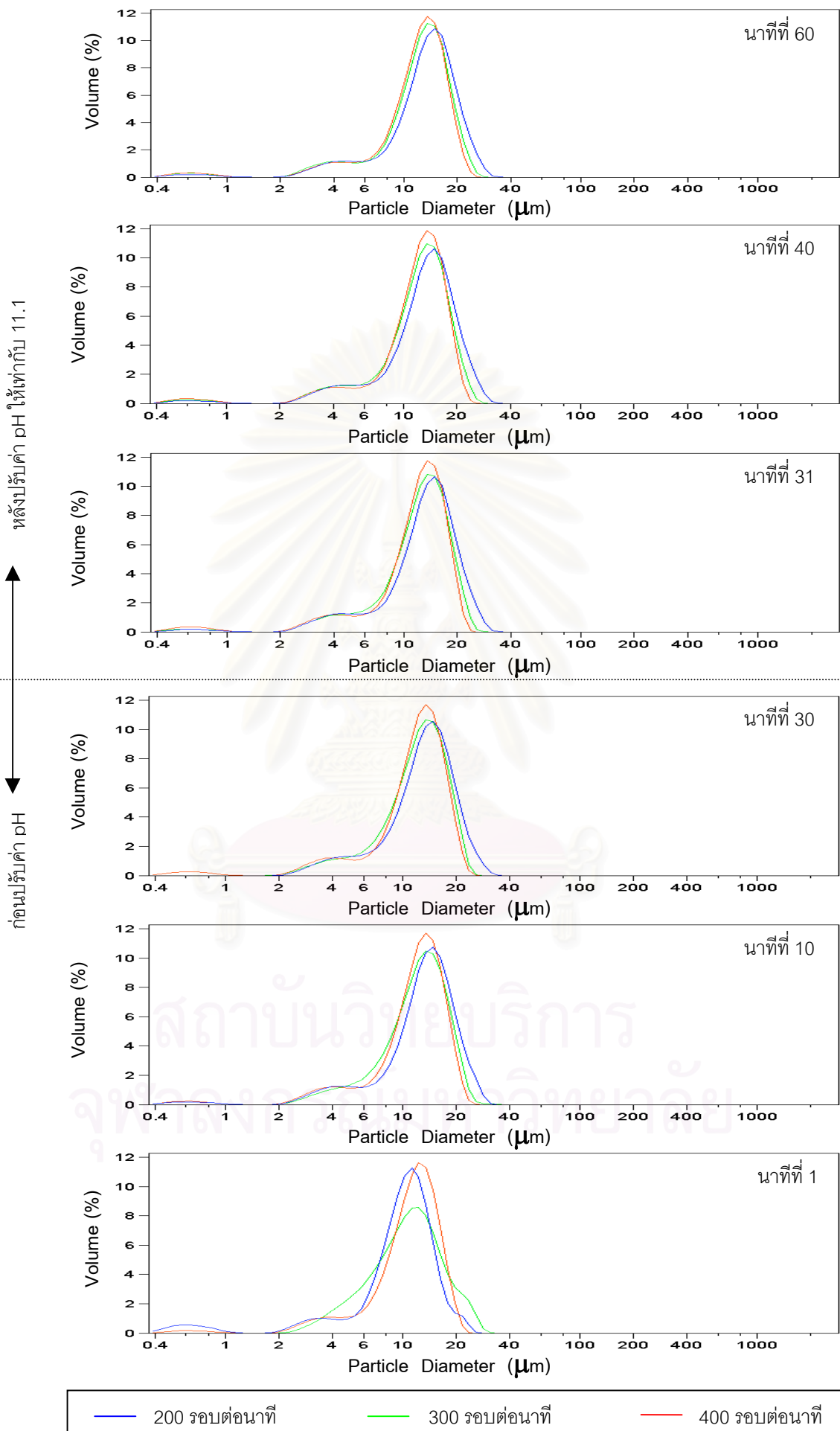
รูปที่ 4.43 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกัน

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันพบว่าขนาดของตะกอนร่วมจะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของการกวน ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟแสดงการกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่ความเร็วยรอบของการกวนต่างๆกันดังรูปที่ 4.44 โดยพบว่าเมื่อความเร็วยรอบของการกวนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการพิจารณารูปร่างลักษณะของตะกอนจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 1,000 เท่าดังรูปที่ 4.45 จากรูปพบว่าเมื่อความเร็วยรอบของการกวนมีค่าสูงขึ้นนั้นจะทำให้ผลึกของแคลเซียม

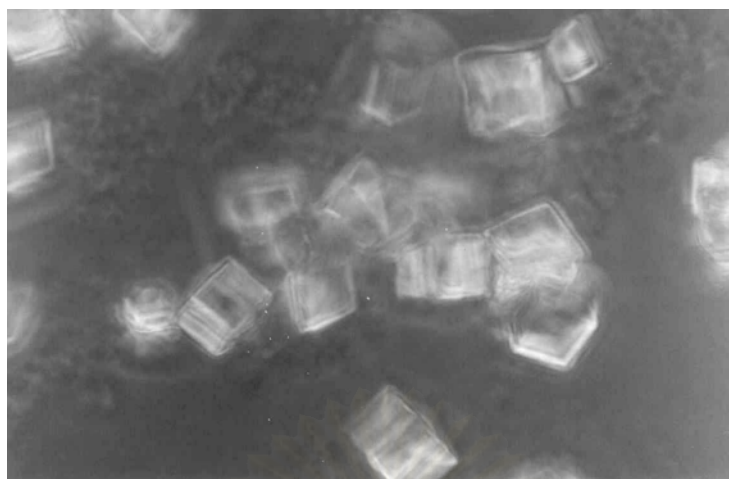
คาร์บอนเนตมีการรวมตัวกันที่ลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการกวนจะส่งผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอนเนตเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ผลึกจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันแล้วเกิดการเชื่อมของผลึกมีน้อย ผลึกของแคลเซียมคาร์บอนเนตจึงมีการรวมตัวกันที่ลดลง ส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดที่เล็กลง นอกจากนี้จากภาพถ่ายของตะกอนยังสังเกตได้ว่าผลึกเดี่ยวๆของแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ความเร็วรอบของการกวนสูงนั้นจะมีขนาดที่เล็กกว่าที่ความเร็วรอบของการกวนต่ำ ทั้งนี้อธิบายได้ว่าที่ความเร็วรอบของการกวนสูงนั้นจะทำให้การผสมกันของสารตั้งต้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความอึดตัวยิ่งยวดของสารละลายมีค่าสูง มีผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความอึดตัวยิ่งยวดจะถูกใช้ไปในการเพิ่มขนาดของผลึกอย่างรวดเร็วและความอึดตัวยิ่งยวดในสารละลายมีค่าลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มขนาดของผลึกลดลง ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็ก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

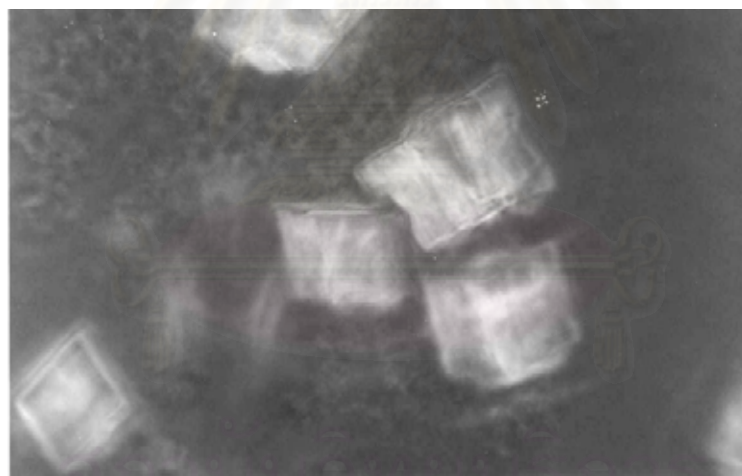


รูปที่ 4.44 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน



10 μm

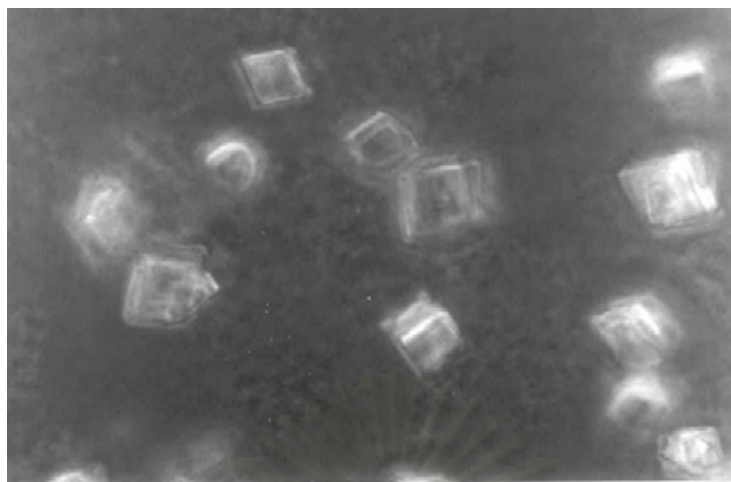
(ก)



10 μm

(ข)

รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน
 (ก) 200 รอบต่อนาที
 (ข) 300 รอบต่อนาที



10 μ m

(ค)

รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (ต่อ)
(ค) 400 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

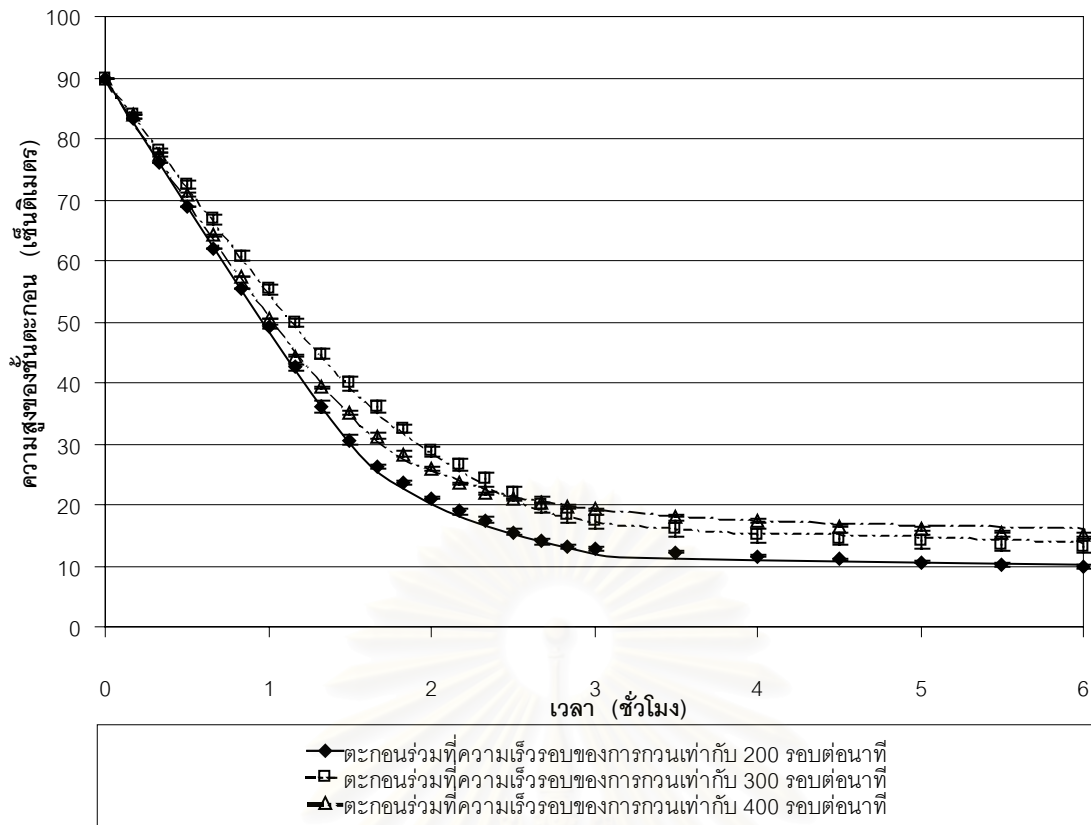
ง. ผลของความเร็วยรอบที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกันมาทำการวัดความเร็วของการตกตะกอนจะได้ผลดังรูปที่ 4.46 โดยพบว่าตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูง (300 และ 400 รอบต่อนาที) จะตกตะกอนได้ช้ากว่าตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนมีค่าต่ำ (200 รอบต่อนาที) ทั้งนี้เนื่องจากผลการศึกษาในหัวข้อ ค. ซึ่งให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงนั้นการรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลง ส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักน้อยซึ่งจะทำให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าน้อยตามไปด้วย

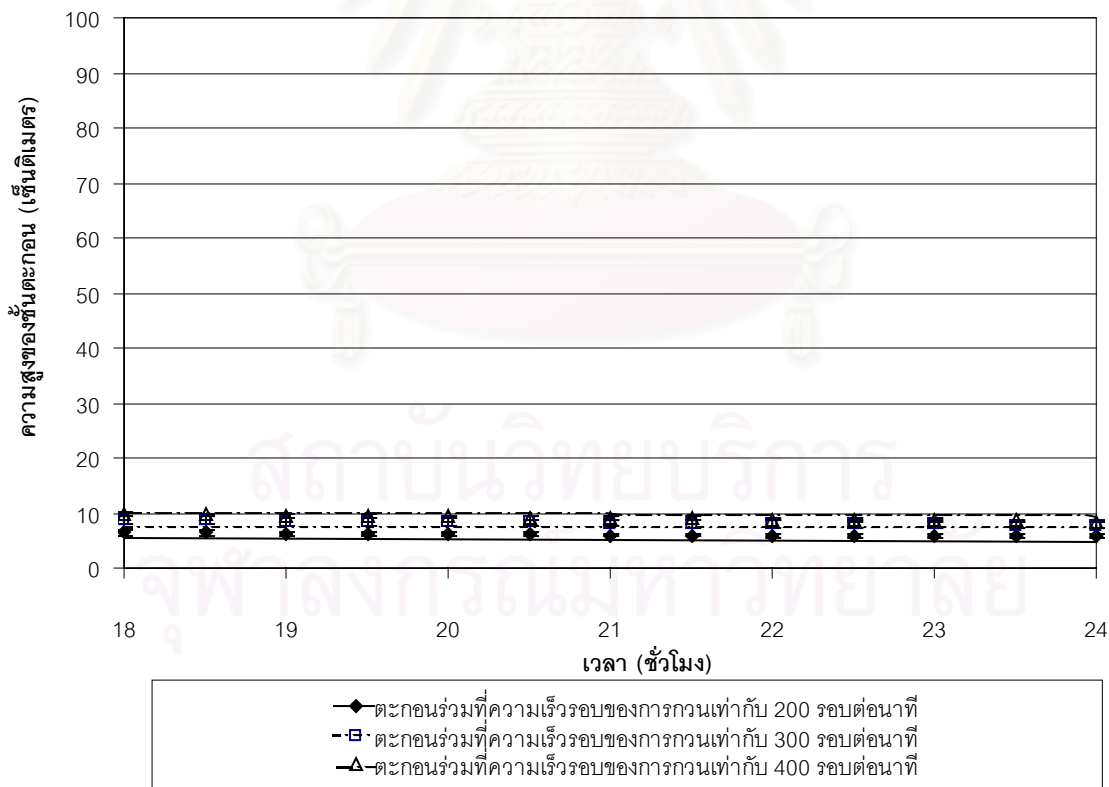
อย่างไรก็ตามจากรูปจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการกวนให้มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 400 รอบต่อนาที ความเร็วของการตกตะกอนกลับมีค่ามากกว่าตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทั้งๆที่ตะกอนมีขนาดเล็กกว่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าจากผลการทดลองในหัวข้อ ค. ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าสูงเท่ากับ 400 รอบต่อนาที จะส่งผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดนิวเคลียสที่สูงขึ้น และการเพิ่มความเร็วรอบของการกวนจะทำให้การเคลื่อนที่ของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตมีมากขึ้น ส่งผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเคลื่อนที่เข้าไปติดจับกับกลุ่มของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดีขึ้น ตะกอนร่วมจึงมีขนาดที่สม่ำเสมอตั้งจะสังเกตได้จากกราฟกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบต่างๆกันดังรูปที่ 4.44 ซึ่งพบว่าที่ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาทีนั้นตะกอนจะมีการกระจายของขนาดที่น้อยกว่าที่ความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 นาที ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้ตะกอนร่วมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้นด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาตรของชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมงพบว่าปริมาตรของชั้นตะกอนจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบของการกวนมีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วรอบของการกวนมีค่าต่ำนั้นตะกอนร่วมจะมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ส่งผลให้การกดอัดตัวของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาตรของชั้นตะกอนมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.46 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

(ก) การตกตะกอนในช่วง 6 ชั่วโมงแรก (ข) การตกตะกอนหลังจาก 18 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาถึงค่า pH ของการเกิดตะกอน ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอน พบว่าการเกิดตะกอนร่วมจะแตกต่างจากการเกิดตะกอนเพียงชนิดเดียวดังนี้

1. ความแตกต่างของแอนไอออนที่เป็นผลจากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในระบบของการเกิดตะกอนร่วมจะส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว ส่งผลให้ปริมาณของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีมากขึ้น ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าลดลงในทางกลับกันค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมซึ่งมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว จะเป็นผลให้ความสามารถในการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะหมดไปเมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้มีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นและความเร็วรอบของการกวนในกระบวนการเกิดตะกอนร่วม จะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย เนื่องจากการควบคุมค่าไอออนิกสเตรนจ์ของระบบให้คงที่ ซึ่งค่าไอออนิกสเตรนจ์ในระบบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกและสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าใกล้เคียงกัน ความสามารถในการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

2. ด้วยลักษณะโครงสร้างของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการดึงดูดกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ในระบบของการเกิดตะกอนร่วม ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการรวมตัวกับผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนร่วมตกตะกอนได้เร็วกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามการมีตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ในระบบจะขัดขวางการรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการรวมตัวกันเองที่น้อยลง ตะกอนร่วมจึงมีขนาดที่เล็กและมีน้ำหนักน้อยกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงส่ง

ผลให้ความเร็วของการตกตะกอนช้ากว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้การลดอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นและการเพิ่มความเร็วยรอบของการกวนในกระบวนการเกิดตะกอนร่วมจะลดโอกาสในการรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีการรวมตัวกันที่ลดลง ตะกอนร่วมจึงมีขนาดที่เล็กลงและมีความเร็วของการตกตะกอนลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของการกวนจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีการรวมตัวกันที่ดีขึ้น ทำให้ตะกอนร่วมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วยรอบของการกวนระหว่างกระบวนการเกิดตะกอนโดยจะใช้ความเร็วยรอบที่สูงในช่วงแรกของการเกิดตะกอนซึ่งจะมีผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีปริมาณมากขึ้น แล้วทำการลดความเร็วยรอบของการกวนลงซึ่งจะมีผลให้การรวมตัวระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น ด้วยกระบวนการดังกล่าวอาจทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะมีผลให้ความเร็วของการตกตะกอนสูงขึ้น

2. ทำการศึกษาผลของไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม โดยศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นและความเร็วยรอบของการกวนที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมในกรณีที่ไม่ทำการควบคุมค่าไอออนิกสเตรงท์

รายการอ้างอิง

1. Black, A.P. , and Christman, R.F. Electrophoretic studies of sludge particle produced in lime soda softening. Journal of the American Water Work Association 53 (1961): 737-747.
2. Brakalov, L.B. On the mechanism of magnesium hydroxide ripening. Chemical Engineering Science 40 (1985): 305-312.
3. Elmaleh, S., Yahi, H., and Coma, J. Suspended solids abatement by pH increase-upgrading of an oxidation pond effluent. Water Research 30 (1996): 2357-2362.
4. Foust, A.S., Wenzel, L.A., Clump, C.W., Maus, L.,and Anderson, L.B. Principle of Unit Operation. 2 nd ed. John Wiley & Sons, 1980.
5. Franke, J. and Mersmann, A. The influence of the operational condition on the precipitation process. Chemical Engineering Science Vol.51. No.11. (1995):1737-1753.
6. Gehm, H.W., and Bregman, J.I. Hanbook of Water Resource and Pollution Control. New York: Van Nostrand Reinhold, 1976.
7. Hostomsky, J., and Jones, A.G. Calcium carbonate crystallization, agglomeration and form during continuous precipitation from solution. Journal of Physics. D: Applied Physics 24 (1991) :165-170.
8. Kabasci, S., Althaus, W.,and Weinspach, P.M. Batch precipitation of Calcium Carbonate from highly supersaturated solutions. Chemical Engineering Research & Design 74(1996): 765-772.
9. Karsten, O. Ion Exchange Regeneration. *The United State Patent No. 3,977,968* ,1976.
10. Kitamura, M. Crystallization and transformation mechanism of calcium carbonate polymorphs and the effect of magnesium ion. Journal of Colloid and Interface Science 236 (2001): 318-327.
11. Leentvaar, J., and Rebhun, M. Effect of magnesium and calcium precipitation on coagulation-flocculation with Lime. Water Research 16 (1982) : 655-662.
12. Loewenthal, R.E., and Marais, G.V.R. Carbonate Chemistry of Aquatic Systems: Theory and Application. Michigan: Ann Arbor Science, 1976.
13. Markov, I.V. Crystal Growth for Beginners. London: World Scientific, 1995.

14. Maruscak, A., Baker, C.G.J., and Bergougnou, M.A. Calcium carbonate precipitation in a continuous stirred tank reactor. Canadian Journal of Chemical Engineering 49 (1971): 819.
15. Mullin, J. W., Murphy, J. D., Sohnel O., and Spoons G. Aging of precipitated magnesium hydroxide. Industrial & Engineering Chemistry Research 28 (1989): 1725-1730.
16. Peavy, H.S., Rowe, D.R., and Glous, G.T. Environmental Engineering. McGraw Hill, 1985.
17. Popper, K., Danville, Camirand, W.M., Albany, and Boyle, F.P. Regeneration of Ion Exchangers *The United State Patent No. 3,528,912*, 1970.
18. Rousseau, R.W. Handbook of Separation Proces Technology. John Wiley & Sons., 1987.
19. Sawyer, C.N., and McCarty, P.L. Chemistry for Environmental Engineering. Tokyo: McGraw Hill Kogakusha, 1978.
20. Snoeyink, V.L., and Jenkins, D. Water Chemistry. John Wiley & Son., 1987.
21. Sohnel, O., and Mullin, J.W. Agglomeration in batch precipitated suspensions. Particle Design Via Crystallization, AIChE Symposium Series Vol. 87. No.284.(1991):182-190.
22. Sudmalis, M., and Sheikholeslami, R. Coprecipitation of CaCO_3 and CaSO_4 Canadian Journal of Chemical Engineering 78 (February 2000): 21-31.
23. Tai, C.Y., and Chen, P.C. Nucleation ,agglomeration and crystal morphology of calcium carbonate. AIChE Journal Vol. 41. No.1. (January 1995) : 68-77.
24. Turek, M., and Gnot, W. Precipitation of Magnesium Hydroxide from Brine. Industrial & Engineering Chemistry Research 34 (1995) : 244 – 250.
25. Vuuren, L.R.J. van, Stander, G.J., Henzen, M.R., Meiring, P.G.J., and Blerk, S.H.V. van Advanced purification of sewage work effluent using a combined system of lime softening and flotation. Water Research 1 (1967): 463 – 474.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก.1.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียมและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 13.23 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

นอกจากนี้ในการทดลองยังมีการใช้สารละลายของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้

3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% โดยน้ำหนักจำนวน 83 มิลลิลิตร มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร

4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเตรียมจากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร

ก.1.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 18.297 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.2 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ก) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียมและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 13.23 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากกการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 8.82 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากกการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 4.41 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากกการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 3.18 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ข) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดการปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 12.198 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดการปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 4.8 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดการปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.2.2 ผลของความเร็วยวของการกวน

ก) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียมและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 13.23 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มี

ความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ข) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 18.297 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.06 โมลาร์ตามลำดับ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 8.82 กรัมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 6.099 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรจนมีปริมาตรเท่ากับ 250 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน

250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

ก.4 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

ก.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

วิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 3:1

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 13,500 และ 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.135 และ 0.045 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 9.923 กรัม และแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 4.574 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.27 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 7.155 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 1.8 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

2. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 2:1

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.06 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 8.82 กรัม และแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 6.099 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

3. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:1

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 9,000 และ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.09 และ 0.09 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 6.615 กรัมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 9.149 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 4.77 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

4. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:2

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 และ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.06 และ 0.12 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 4.41 กรัมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 12.198 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.12 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 3.18 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.48 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 4.8 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

5. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:3

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4,500 และ 13,500 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.045 และ 0.135 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน

3.308 กรัม และแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 13.273 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.09 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 2.385 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.54 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 5.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

ก.4.2 ผลของความเร็วยวของสารละลาย

วิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.06 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

วิธีการวิเคราะห์

ข.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารละลาย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 Atomic absorption spectrophotometer ของบริษัท Instrumentation Laboratory Inc. รุ่น IL 551

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2.1 แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด Analytical grade

2.2 แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท UNIVAR ชนิด Analytical grade

2.3 น้ำกลั่น

3. วิธีการทดลอง

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียมและแมกนีเซียมเพื่อใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) ในการวัดความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียมที่ใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) โดยทำการเตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้น 5 ค่าด้วยกันคือ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในขั้นแรกจะเตรียมสารละลายของแคลเซียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 0.36 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นจะนำสารละลายดังกล่าวมาจำนวน 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 มิลลิลิตรมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานของแคลเซียมที่มีความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ข. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียมที่ใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) โดยทำการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้น 5 ค่าด้วยกันคือ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในขั้นแรกจะเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 0.836 กรัมในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นจะนำสารละลายดังกล่าวมาจำนวน 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 มิลลิลิตรมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

2. นำสารละลายมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปทำการวัดความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer โดยวิธีการใช้เครื่องมือจะปฏิบัติตามคู่มือการใช้ ซึ่งค่าที่วัดได้จากเครื่องจะต้องนำมาคูณ 20 จึงจะเป็นค่าความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย เนื่องจากสารตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ได้ทำการเจือจาง 20 เท่า นอกจากนี้ค่าที่วัดได้จากเครื่องจะมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนหน่วยให้เป็นมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ค.

ข.2 การวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ยี่ห้อ Coulter รุ่น LS 230

2. วิธีการทดลอง

2.1 นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยเลือกใช้ อุปกรณ์การวัดขนาดแบบ Micro Volume Module และเลือกสมการที่ใช้คำนวณขนาดของอนุภาค เป็น Fraunhofer Model โดยวิธีการใช้เครื่องมือจะปฏิบัติตามคู่มือการใช้

2.2 ทำการบันทึกผลของการวิเคราะห์ที่ได้เป็นขนาดเฉลี่ยของอนุภาคและกราฟการกระจายขนาดของตะกอน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

วิธีการคำนวณความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่วัดได้จากเครื่อง Atomic Absorbtion Spectrophotometer จะอยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนหน่วยดังกล่าวให้อยู่ในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ (Sawyer และ McCarty, 1978)

$$\begin{aligned} & \text{ความเข้มข้นของไอออน (ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)} \\ &= \text{ความเข้มข้นของไอออน (ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times \frac{50}{\text{น้ำหนักเทียบเท่าของไอออน}} \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ น้ำหนักเทียบเท่าของไอออน} = \frac{\text{มวลอะตอม}}{\text{วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออน}}$$

ซึ่งในกรณีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 ดังนั้น

$$\text{น้ำหนักเทียบเท่าของแคลเซียมไอออนเท่ากับ} = \frac{40}{2} = 20$$

$$\text{น้ำหนักเทียบเท่าของแมกนีเซียมไอออนเท่ากับ} = \frac{24.3}{2} = 12.2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดลอง

ง.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.1 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

เวลา(นาที)	การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	7.68	7.7	7.69	7.8	7.9	7.85
1	8.63	9.13	8.88	10.6	10.64	10.62
5	7.99	8.1	8.05	10.43	10.48	10.46
10	7.97	8.08	8.03	10.37	10.42	10.40
20	7.95	8.07	8.01	10.33	10.37	10.35
30	7.95	8.05	8.00	10.31	10.35	10.33
31	11.12	11.14	11.13	11.12	11.13	11.13
35	11.17	11.16	11.17	11.13	11.15	11.14
40	11.18	11.16	11.17	11.13	11.15	11.14
50	11.18	11.16	11.17	11.13	11.14	11.14
60	11.18	11.16	11.17	11.13	11.14	11.14
90	11.18	11.16	11.17	11.13	11.12	11.13

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.2 ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
1	384.5	469	426.75	150.82	163.11	156.97
5	355.5	325.5	340.5	109.84	113.93	111.89
10	341.5	327	334.25	106.56	109.02	107.79
20	343	320	331.5	100.82	106.56	103.69
30	345.5	313.5	329.5	98.36	106.56	102.46
31	111.5	100	105.75	13.93	14.75	14.34
35	108	96	102	11.48	13.11	12.30
40	111	96.5	103.75	10.66	14.75	12.70
50	112	94.5	103.25	10.66	13.93	12.30
60	112.5	94.5	103.5	9.02	14.75	11.89
90	112	93	102.5	9.02	15.57	12.30

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.3 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
(ไมโครเมตร)

เวลา (นาที)	การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-
1	18.64	20.63	19.64	4.81	4.86	4.84
5	23.97	22.41	23.19	5.65	5.83	5.74
10	23.75	21.32	22.54	5.58	5.71	5.65
20	23.76	22.71	23.24	5.08	4.53	4.81
30	25.34	24.21	24.78	4.06	4.41	4.24
31	25.74	26.9	26.32	4.19	4.48	4.34
35	22.09	27.34	24.72	3.85	4.22	4.04
40	25.68	27.47	26.58	3.55	4.06	3.81
50	28.43	26.7	27.57	3.68	3.38	3.53
60	26.4	26.7	26.55	3.52	3.45	3.49
90	27.74	25.18	26.46	3.54	3.59	3.57

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตาราง ง.4 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (เซ็นติเมตร)

เวลา	การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			การตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90
10นาที	-	-	-	90	90	90
20นาที	-	-	-	89.9	89.9	89.9
30นาที	-	-	-	89.8	89.8	89.8
40นาที	-	-	-	89.7	89.8	89.75
50นาที	-	-	-	89.6	89.7	89.65
1ชั่วโมง	-	-	-	89.5	89.7	89.6
1ชั่วโมง10นาที	-	-	-	89.5	89.6	89.55
1ชั่วโมง20นาที	-	-	-	89.4	89.5	89.45
1ชั่วโมง30นาที	-	-	-	89.4	89.4	89.4
1ชั่วโมง40นาที	-	-	-	89.3	89.4	89.35
1ชั่วโมง50นาที	-	-	-	89.3	89.3	89.3
2ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	89.3	89.3	89.3
2ชั่วโมง10นาที	1.5	1.5	1.5	89.2	89.2	89.2
2ชั่วโมง20นาที	1.5	1.5	1.5	89.2	89.2	89.2
2ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	89.1	89.1	89.1
2ชั่วโมง40นาที	1.5	1.5	1.5	89.1	89.1	89.1
2ชั่วโมง50นาที	1.5	1.5	1.5	89	89	89
3ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	89	89	89
3ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	88.8	88.8	88.8
4ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	88.5	88.5	88.5
4ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	88.2	87.5	87.85
5ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	87.5	86.2	86.85
5ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	85.5	84.5	85
6ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	81.5	81.5	81.5
18ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	32.8	33.1	32.95
18ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	32.4	32.7	32.55
19ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	31.8	32.2	32
19ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	31.5	31.8	31.65
20ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	31.2	31.3	31.25
20ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	30.9	30.8	30.85
21ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	30.6	30.5	30.55
21ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	30.2	30.2	30.2
22ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29.8	29.8	29.8
22ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	29.5	29.5	29.5
23ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29.3	29.3	29.3
23ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	29.1	29.1	29.1
24ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29	28.9	28.95

*หมายเหตุ: การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นตะกอนได้อย่างชัดเจนในช่วง 2 ชั่วโมงแรก

ง.2 ผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ง.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้น

1) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.5 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน

เวลา(นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.68	7.7	7.69	7.7	7.76	7.73	7.86	7.77	7.82
1	8.63	9.13	8.88	9.44	9.4	9.42	9.85	9.82	9.84
5	7.99	8.1	8.05	8.28	8.4	8.34	9.4	9.43	9.42
10	7.97	8.08	8.03	8.26	8.36	8.31	8.55	8.54	8.55
20	7.95	8.07	8.01	8.23	8.34	8.29	8.55	8.5	8.53
30	7.95	8.05	8.00	8.22	8.34	8.28	8.55	8.49	8.52
31	11.12	11.14	11.13	11.13	11.12	11.13	11.13	11.13	11.13
35	11.17	11.16	11.17	11.16	11.19	11.18	11.18	11.18	11.18
40	11.18	11.16	11.17	11.16	11.19	11.18	11.2	11.19	11.20
50	11.18	11.16	11.17	11.16	11.19	11.18	11.2	11.2	11.20
60	11.18	11.16	11.17	11.16	11.18	11.17	11.2	11.2	11.20
90	11.18	11.16	11.17	11.15	11.18	11.17	11.2	11.2	11.20

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.6 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18000	18000	18000	12000	12000	12000	6,000	6,000	6,000
1	384.50	469	426.75	306.5	291.5	299	169.50	169	169.25
5	355.5	325.5	340.5	310	244	277	133.5	153.5	143.5
10	341.5	327	334.25	308.5	238	273.25	133	141	137
20	343	320.5	331.75	298.5	239	268.75	138	147	142.5
30	345.5	313.5	329.5	306.5	237.5	272	133.5	151	142.25
31	111.5	100	105.75	121	82	101.5	41	44	42.5
35	108	96	102	126.5	80.5	103.5	39	42.5	40.75
40	111	96.5	103.75	125.5	82	103.75	38.5	42	40.25
50	112	94.5	103.25	120	83	101.5	38.5	44	41.25
60	112.5	94.5	103.5	119	81	100	39.5	42.5	41
90	112	93	102.5	115	79	97	37.5	41	39.25

* หมายเหตุ: หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.7 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น
ต่าง ๆ กัน (ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	18.64	20.63	19.64	21.73	23.93	22.83	27.64	31.6	29.62
5	23.97	22.41	23.19	25.59	29.15	27.37	35.93	40.09	38.01
10	23.75	21.32	22.54	25.76	29.59	27.68	36.68	39.93	38.31
20	23.76	22.71	23.24	23.14	29.26	26.20	36.84	38.53	37.69
30	25.24	24.21	24.73	22.56	33.44	28.00	37.53	37.29	37.41
31	25.74	26.9	26.32	29.62	31.97	30.80	34.01	37.41	35.71
35	22.29	27.34	24.82	30.22	31.54	30.88	34.01	35.95	34.98
40	25.68	27.47	26.58	30.51	33.14	31.83	34.35	37.97	36.16
50	28.43	26.7	27.57	28.62	32.72	30.67	35.42	37.11	36.27
60	26.4	26.7	26.55	28.8	32.97	30.89	34.85	37.3	36.08
90	27.74	25.18	26.46	27.28	31.02	29.15	36.05	35.85	35.95

* หมายเหตุ: หลังจากนาฬิกาที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ๘.8 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (เซ็นติเมตร)

เวลา	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง10นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง20นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง30นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง40นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง50นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
2ชั่วโมง10นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
2ชั่วโมง20นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
2ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
2ชั่วโมง40นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
2ชั่วโมง50นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
3ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
3ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
4ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
4ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
5ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
5ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
6ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
18ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
18ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
19ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
19ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
20ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
20ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
21ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
21ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
22ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
22ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
23ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
23ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5
24ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5

*หมายเหตุ: การตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นตะกอนได้อย่างชัดเจนในช่วง 2 ชั่วโมงแรก

2) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.9 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.8	7.9	7.85	7.62	7.82	7.72	7.88	7.8	7.84
1	10.6	10.64	10.62	10.51	10.55	10.53	10.5	10.53	10.52
5	10.43	10.48	10.46	10.4	10.43	10.42	10.4	10.44	10.42
10	10.37	10.42	10.40	10.35	10.4	10.38	10.34	10.42	10.38
20	10.33	10.37	10.35	10.32	10.34	10.33	10.32	10.39	10.36
30	10.31	10.35	10.33	10.31	10.32	10.32	10.31	10.38	10.35
31	11.12	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13
35	11.13	11.15	11.14	11.15	11.16	11.16	11.16	11.15	11.16
40	11.13	11.15	11.14	11.16	11.16	11.16	11.16	11.15	11.16
50	11.13	11.14	11.14	11.15	11.16	11.16	11.16	11.16	11.16
60	11.13	11.14	11.14	11.15	11.16	11.16	11.16	11.15	11.16
90	11.13	11.12	11.13	11.15	11.14	11.15	11.16	11.13	11.15

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.10 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18000	18000	18000	12000	12000	12000	6,000	6,000	6,000
1	150.82	163.11	156.97	125.41	129.51	127.46	95.90	85.25	90.57
5	109.84	113.93	111.89	99.18	106.56	102.87	81.97	68.03	75.00
10	106.56	109.02	107.79	97.54	103.28	100.41	81.97	63.93	72.95
20	100.82	106.56	103.69	91.80	98.36	95.08	80.33	63.11	71.72
30	98.36	106.56	102.46	91.80	101.64	96.72	80.33	62.30	71.31
31	13.93	14.75	14.34	12.30	13.11	12.70	11.48	9.84	10.66
35	11.48	13.11	12.30	12.30	12.30	12.30	10.66	9.84	10.25
40	10.66	14.75	12.70	13.93	13.11	13.52	10.66	9.02	9.84
50	10.66	13.93	12.30	12.30	13.11	12.70	9.02	9.02	9.02
60	9.02	14.75	11.89	12.30	12.30	12.30	9.02	9.84	9.43
90	9.02	15.57	12.30	12.30	11.48	11.89	12.30	9.02	10.66

* หมายเหตุ: หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.11 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้ง
ต้นต่าง ๆ กัน (ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	4.81	4.86	4.84	5.45	4.54	5.00	5.72	5.14	5.43
5	5.65	5.83	5.74	6.21	6	6.11	6.65	5.34	6.00
10	5.58	5.71	5.65	6.25	5.8	6.03	5.77	5.78	5.78
20	5.08	4.53	4.81	6.66	5.54	6.10	5.91	5.53	5.72
30	4.06	4.41	4.24	5.7	5.49	5.60	5.43	5.63	5.53
31	4.19	4.48	4.34	5.79	5.84	5.82	5.59	5.29	5.44
35	3.85	4.22	4.04	5.77	5.43	5.60	5.22	5.36	5.29
40	3.55	4.06	3.81	5.59	4.65	5.12	5.25	5.17	5.21
50	3.68	3.38	3.53	5.2	4.21	4.71	4.63	4.86	4.75
60	3.52	3.45	3.49	4.51	3.78	4.15	4.08	4.56	4.32
90	3.54	3.59	3.57	3.55	3.39	3.47	4.15	4.04	4.10

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.12 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (เซ็นติเมตร)

เวลา	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90.0	90	90	90.0	90	90	90.0	90	90
10นาที	90.0	90	90	89.9	89.9	89.9	89.0	88.5	88.75
20นาที	89.9	89.9	89.9	89.8	89.8	89.8	87.0	86.3	86.65
30นาที	89.8	89.8	89.8	89.8	89.6	89.7	84.6	84	84.3
40นาที	89.7	89.8	89.75	89.7	89.5	89.6	82.6	81.7	82.15
50นาที	89.6	89.7	89.65	89.6	89.4	89.5	80.5	79.2	79.85
1ชั่วโมง	89.5	89.7	89.6	89.5	89.3	89.4	78.5	76.9	77.7
1ชั่วโมง10นาที	89.5	89.6	89.55	89.4	89.1	89.25	75.5	74	74.75
1ชั่วโมง20นาที	89.4	89.5	89.45	89.3	88.8	89.05	73.0	71.2	72.1
1ชั่วโมง30นาที	89.4	89.4	89.4	88.8	88.2	88.5	70.0	68.8	69.4
1ชั่วโมง40นาที	89.3	89.4	89.35	88.2	87.6	87.9	67.6	65.8	66.7
1ชั่วโมง50นาที	89.3	89.3	89.3	87.0	86.5	86.75	64.9	63	63.95
2ชั่วโมง	89.3	89.3	89.3	86.0	85.4	85.7	61.7	60	60.85
2ชั่วโมง10นาที	89.2	89.2	89.2	84.8	84	84.4	59.3	57.3	58.3
2ชั่วโมง20นาที	89.2	89.2	89.2	83.5	82.5	83	56.3	54.2	55.25
2ชั่วโมง30นาที	89.1	89.1	89.1	82.0	81.2	81.6	53.3	51.5	52.4
2ชั่วโมง40นาที	89.1	89.1	89.1	80.5	78	79.25	50.4	49.1	49.75
2ชั่วโมง50นาที	89.0	89	89	78.8	77	77.9	47.5	45.9	46.7
3ชั่วโมง	89.0	89	89	77.5	76	76.75	44.9	43	43.95
3ชั่วโมง30นาที	88.8	88.8	88.8	72.0	70.5	71.25	36.8	34.8	35.8
4ชั่วโมง	88.5	88.5	88.5	67.5	66	66.75	31.5	30.2	30.85
4ชั่วโมง30นาที	88.2	87.5	87.85	62.0	60.5	61.25	26.7	25.5	26.1
5ชั่วโมง	87.5	86.2	86.85	55.5	55	55.25	23.8	22	22.9
5ชั่วโมง30นาที	85.5	84.5	85	49.5	49.2	49.35	21.8	20	20.9
6ชั่วโมง	81.5	81.5	81.5	43.5	44.2	43.85	20.7	18.8	19.75
18ชั่วโมง	32.5	33.1	32.8	22.0	20.8	21.4	13.4	12.4	12.9
18ชั่วโมง30นาที	32.4	32.4	32.4	21.5	20.5	21	13.2	12.2	12.7
19ชั่วโมง	31.8	32.2	32	21.3	20.3	20.8	13.0	12	12.5
19ชั่วโมง30นาที	31.5	31.8	31.65	21.0	20	20.5	12.9	11.9	12.4
20ชั่วโมง	31.2	31.3	31.25	20.8	19.8	20.3	12.8	11.8	12.3
20ชั่วโมง30นาที	30.9	30.8	30.85	20.5	19.6	20.05	12.6	11.7	12.15
21ชั่วโมง	30.6	30.5	30.55	20.2	19.5	19.85	12.5	11.5	12
21ชั่วโมง30นาที	30.2	30.2	30.2	20.0	19.3	19.65	12.4	11.5	11.95
22ชั่วโมง	29.8	29.8	29.8	19.8	19.1	19.45	12.3	11.3	11.8
22ชั่วโมง30นาที	29.5	29.5	29.5	19.6	19	19.3	12.2	11.2	11.7
23ชั่วโมง	29.3	29.3	29.3	19.4	18.9	19.15	12.0	11.1	11.55
23ชั่วโมง30นาที	29.1	29.1	29.1	19.2	18.8	19	11.9	11	11.45
24ชั่วโมง	29.0	28.9	28.95	19.0	18.7	18.85	11.8	10.9	11.35

ง.2.2 ผลของความเร็วยรอบของการกวน

1) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วยรอบเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.13 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วยรอบของการกวนต่าง ๆ กัน

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.7	7.83	7.77	7.68	7.7	7.69	7.7	7.65	7.68
1	9.4	8.88	9.14	8.63	9.13	8.88	9.26	8.8	9.03
5	8.05	8.14	8.10	7.99	8.1	8.05	8.33	8.23	8.28
10	7.98	8.1	8.04	7.97	8.08	8.03	8.3	8.21	8.26
20	7.95	8.08	8.02	7.95	8.07	8.01	8.28	8.2	8.24
30	7.91	8.07	7.99	7.95	8.05	8.00	8.27	8.19	8.23
31	11.11	11.14	11.13	11.12	11.14	11.13	11.12	11.12	11.12
35	11.13	11.16	11.15	11.17	11.16	11.17	11.14	11.17	11.16
40	11.14	11.18	11.16	11.18	11.16	11.17	11.14	11.18	11.16
50	11.15	11.18	11.17	11.18	11.16	11.17	11.13	11.18	11.16
60	11.15	11.18	11.17	11.18	11.16	11.17	11.13	11.19	11.16
90	11.13	11.18	11.16	11.18	11.16	11.17	11.11	11.18	11.15

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.14 ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน
แคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
1	415	461	438	384.5	469	426.75	398.5	457	427.75
5	397	387.5	392.25	355.5	325.5	340.5	370	378.5	374.25
10	378	383	380.5	341.5	327	334.25	375	370.5	372.75
20	386.5	386	386.25	343	320	331.5	365.5	365	365.25
30	381.5	381.5	381.5	345.5	313.5	329.5	372	353.5	362.75
31	150.5	141.5	146	111.5	100	105.75	157	130.5	143.75
35	145.5	136.5	141	108	96	102	148.5	125.5	137
40	151	137	144	111	96.5	103.75	152.5	125	138.75
50	144	136	140	112	94.5	103.25	141	123.5	132.25
60	141.5	131.5	136.5	112.5	94.5	103.5	139.5	122.5	131
90	142.5	133	137.75	112	93	102.5	140	123.5	131.75

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.15 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการ
กวนต่างๆกัน (ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	19.97	19.4	19.69	19.43	20.63	20.03	16.32	18.87	17.60
5	24.44	23.2	23.82	25.24	22.41	23.83	18.31	19.14	18.73
10	23.87	22.06	22.97	25.15	21.32	23.24	18.09	18.83	18.46
20	22.94	24.34	23.64	25.09	22.71	23.90	18.32	18.64	18.48
30	24.12	24.69	24.41	26.84	24.21	25.53	18.15	17.75	17.95
31	32.11	31.11	31.61	26.86	26.9	26.88	22.58	22.55	22.57
35	32.3	30.96	31.63	23.43	27.34	25.39	21.68	22.63	22.16
40	33.11	30.14	31.63	27.01	27.47	27.24	22.38	23.03	22.71
50	31.04	30.84	30.94	29.77	26.7	28.24	23.4	23.02	23.21
60	32	29.98	30.99	27.57	26.7	27.14	22.81	22.01	22.41
90	31.12	30.31	30.72	28.51	25.18	26.85	22.21	22.11	22.16

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.16 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (เซ็นติเมตร)

เวลา	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง10นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง20นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง30นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง40นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1ชั่วโมง50นาที	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2ชั่วโมง10นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2ชั่วโมง20นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2ชั่วโมง40นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
2ชั่วโมง50นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
3ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
3ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
4ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
4ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
5ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
5ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
6ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
18ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
18ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
19ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
19ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
20ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
20ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
21ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
21ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
22ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
22ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
23ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
23ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
24ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

*หมายเหตุ: การตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นตะกอนได้อย่างชัดเจนในช่วง 2 ชั่วโมงแรก

2) กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่น กวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.17 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวน ต่างๆกัน

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.95	7.8	7.88	7.8	7.9	7.85	7.9	7.9	7.9
1	10.6	10.62	10.61	10.6	10.64	10.62	10.71	10.64	10.68
5	10.45	10.43	10.44	10.43	10.48	10.46	10.51	10.45	10.48
10	10.38	10.36	10.37	10.37	10.42	10.4	10.45	10.39	10.42
20	10.31	10.32	10.32	10.33	10.37	10.35	10.38	10.33	10.36
30	10.3	10.3	10.3	10.31	10.35	10.33	10.35	10.31	10.33
31	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.13	11.12	11.13
35	11.11	11.12	11.12	11.13	11.15	11.14	11.13	11.12	11.13
40	11.11	11.11	11.11	11.13	11.15	11.14	11.12	11.11	11.12
50	11.1	11.1	11.1	11.13	11.14	11.14	11.11	11.1	11.11
60	11.1	11.1	11.1	11.13	11.14	11.14	11.1	11.09	11.1
90	11.07	11.08	11.08	11.13	11.12	11.13	11.07	11.07	11.07

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.18 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน (มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
1	178.69	161.48	170.08	150.82	163.11	156.97	163.93	154.10	159.02
5	128.69	131.97	130.33	109.84	113.93	111.89	122.95	134.43	128.69
10	126.23	130.33	128.28	106.56	109.02	107.79	118.85	127.05	122.95
20	118.85	122.13	120.49	100.82	106.56	103.69	118.85	121.31	120.08
30	119.67	121.31	120.49	98.36	106.56	102.46	114.75	118.85	116.80
31	13.93	17.21	15.57	13.93	14.75	14.34	12.30	16.39	14.34
35	15.57	14.75	15.16	11.48	13.11	12.30	13.11	15.57	14.34
40	14.75	13.93	14.34	10.66	14.75	12.70	12.30	14.75	13.52
50	15.57	16.39	15.98	10.66	13.93	12.30	13.93	14.75	14.34
60	15.57	14.75	15.16	9.02	14.75	11.89	11.48	16.39	13.93
90	14.75	14.75	14.75	9.02	15.57	12.30	13.11	14.75	13.93

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.19 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการ
กวนต่างๆกัน (ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	4.9	4.32	4.61	4.81	4.86	4.84	5.79	5.06	5.43
5	5.96	5.65	5.81	5.65	5.83	5.74	5.98	6.26	6.12
10	5.48	4.8	5.14	5.58	5.71	5.65	5.84	5.63	5.74
20	5.9	5.24	5.57	5.08	4.53	4.81	3.53	3.83	3.68
30	6.41	5.74	6.08	4.06	4.41	4.24	3.05	3.21	3.13
31	6.67	6.03	6.35	4.19	4.48	4.34	3.31	3.53	3.42
35	6.3	5.51	5.91	3.85	4.22	4.04	3.21	3.33	3.27
40	6.13	5.66	5.90	3.55	4.056	3.80	3.43	3.28	3.36
50	5.92	5.46	5.69	3.68	3.38	3.53	3.75	3.77	3.76
60	5.33	4.94	5.14	3.52	3.45	3.49	3.46	3.24	3.35
90	4.04	4.43	4.24	3.54	3.59	3.57	3.61	3.53	3.57

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.20 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (เซ็นติเมตร)

เวลา	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาที	89.9	89.9	89.9	90	90	90	89.9	89.9	89.9
20นาที	89.8	89.8	89.8	89.9	89.9	89.9	89.8	89.8	89.8
30นาที	89.7	90	89.85	89.8	89.8	89.8	89.7	89.7	89.7
40นาที	89.7	89.6	89.65	89.7	89.8	89.75	89.6	89.6	89.6
50นาที	89.6	89.5	89.55	89.6	89.7	89.65	89.5	89.6	89.55
1ชั่วโมง	89.5	89.4	89.45	89.5	89.7	89.6	89.5	89.5	89.5
1ชั่วโมง10นาที	89.5	89.4	89.45	89.5	89.6	89.55	89.4	89.4	89.4
1ชั่วโมง20นาที	89.4	89.3	89.35	89.4	89.5	89.45	89.3	89.4	89.35
1ชั่วโมง30นาที	89.1	89.1	89.1	89.4	89.4	89.4	89.3	89.3	89.3
1ชั่วโมง40นาที	88.8	88.8	88.8	89.3	89.4	89.35	89.2	89.2	89.2
1ชั่วโมง50นาที	88.4	88	88.2	89.3	89.3	89.3	89.1	89.1	89.1
2ชั่วโมง	87.6	87	87.3	89.3	89.3	89.3	88.9	89	88.95
2ชั่วโมง10นาที	86.7	86	86.35	89.2	89.2	89.2	88.9	88.9	88.9
2ชั่วโมง20นาที	85.8	85.1	85.45	89.2	89.2	89.2	88.8	88.8	88.8
2ชั่วโมง30นาที	84.8	84	84.4	89.1	89.1	89.1	88.7	88.7	88.7
2ชั่วโมง40นาที	83.7	82.8	83.25	89.1	89.1	89.1	88.6	88.5	88.55
2ชั่วโมง50นาที	82.5	81.5	82	89	89	89	88.6	88.4	88.5
3ชั่วโมง	81.5	80	80.75	89	89	89	88.5	88.2	88.35
3ชั่วโมง30นาที	77.8	75.6	76.7	88.8	88.8	88.8	88	87	87.5
4ชั่วโมง	73.5	71.6	72.55	88.5	88.5	88.5	86	84	85
4ชั่วโมง30นาที	69.8	67.4	68.6	88.2	87.5	87.85	83.5	81	82.25
5ชั่วโมง	65.8	63	64.4	87.5	86.2	86.85	81	77.8	79.4
5ชั่วโมง30นาที	61.6	58	59.8	85.5	84.5	85	77.8	74.5	76.15
6ชั่วโมง	57.6	53	55.3	81.5	81.5	81.5	74.5	71	72.75
18ชั่วโมง	26.5	25.9	26.2	32.8	33.1	32.95	38.5	37.3	37.9
18ชั่วโมง30นาที	26.2	25.5	25.85	32.4	32.7	32.55	38	36.8	37.4
19ชั่วโมง	25.8	25.2	25.5	31.8	32.2	32	37.5	36.3	36.9
19ชั่วโมง30นาที	25.5	24.9	25.2	31.5	31.8	31.65	37	35.8	36.4
20ชั่วโมง	25.2	24.5	24.85	31.2	31.3	31.25	36.5	35.3	35.9
20ชั่วโมง30นาที	24.9	24.2	24.55	30.9	30.8	30.85	36	34.8	35.4
21ชั่วโมง	24.6	23.9	24.25	30.6	30.5	30.55	35.6	34.3	34.95
21ชั่วโมง30นาที	24.4	23.6	24	30.2	30.2	30.2	35.2	33.8	34.5
22ชั่วโมง	24.2	23.4	23.8	29.8	29.8	29.8	34.8	33.4	34.1
22ชั่วโมง30นาที	24	23.2	23.6	29.5	29.5	29.5	34.4	33	33.7
23ชั่วโมง	23.8	23	23.4	29.3	29.3	29.3	34.1	32.7	33.4
23ชั่วโมง30นาที	23.6	22.8	23.2	29.1	29.1	29.1	33.8	32.3	33.05
24ชั่วโมง	23.4	22.6	23	29	28.9	28.95	33.5	31.9	32.7

ง.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว

ตารางที่ ง.21 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนร่วม

เวลา(นาที)	การเกิดตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนต			การเกิดตะกอน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์			การเกิดตะกอนร่วม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.68	7.7	7.69	7.8	7.9	7.85	7.7	7.78	7.74
							หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์		
1	-	-	-	-	-	-	10.5	10.45	10.48
5	-	-	-	-	-	-	10.38	10.34	10.36
10	-	-	-	-	-	-	10.35	10.31	10.33
							หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต		
1	8.63	9.13	8.88	10.6	10.64	10.62	10.33	10.27	10.30
5	7.99	8.1	8.05	10.43	10.48	10.46	10.28	10.22	10.25
10	7.97	8.08	8.03	10.37	10.42	10.40	10.26	10.21	10.24
20	7.95	8.07	8.01	10.33	10.37	10.35	10.25	10.2	10.23
30	7.95	8.05	8.00	10.31	10.35	10.33	10.25	10.2	10.23
31	11.12	11.14	11.13	11.12	11.13	11.13	11.14	11.11	11.13
35	11.17	11.16	11.17	11.13	11.15	11.14	11.15	11.12	11.14
40	11.18	11.16	11.17	11.13	11.15	11.14	11.15	11.12	11.14
50	11.18	11.16	11.17	11.13	11.14	11.14	11.15	11.12	11.14
60	11.18	11.16	11.17	11.13	11.14	11.14	11.14	11.11	11.13
90	11.18	11.16	11.17	11.13	11.12	11.13	11.13	11.1	11.12

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.22 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและการเกิดตะกอนร่วม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	การเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			การเกิดตะกอนร่วม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18000	18000	18000	12000	12000	12000
1	384.5	469	426.75	168.5	177	172.75
5	355.5	325.5	340.5	122.5	130	126.25
10	341.5	327	334.25	129	126	127.5
20	343	320	331.5	119.5	124	121.75
30	345.5	313.5	329.5	114	120	117
31	111.5	100	105.75	73	80.5	76.75
35	108	96	102	74	80	77
40	111	96.5	103.75	77	78.5	77.75
50	112	94.5	103.25	72	75.5	73.75
60	112.5	94.5	103.5	74	75	74.5
90	112	93	102.5	72	72.5	72.25

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.23 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และการเกิดตะกอนร่วม (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	การเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์			การเกิดตะกอนร่วม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	6,000	6,000	6,000
1	150.82	163.11	156.97	136.89	146.72	141.80
5	109.84	113.93	111.89	136.07	148.36	142.21
10	106.56	109.02	107.79	140.98	141.80	141.39
20	100.82	106.56	103.69	140.98	146.72	143.85
30	98.36	106.56	102.46	140.16	145.08	142.62
31	13.93	14.75	14.34	14.75	13.93	14.34
35	11.48	13.11	12.30	14.75	13.11	13.93
40	10.66	14.75	12.70	16.39	15.57	15.98
50	10.66	13.93	12.30	13.93	13.93	13.93
60	9.02	14.75	11.89	12.30	12.30	12.30
90	9.02	15.57	12.30	14.75	11.48	13.11

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.24 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และ ตะกอนรวม (ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์			ตะกอนรวม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	18.64	20.63	19.64	4.81	4.86	4.84	10.34	11.13	10.74
5	23.97	22.41	23.19	5.65	5.83	5.74	11.58	11.33	11.46
10	23.75	21.32	22.54	5.58	5.71	5.65	11.51	11.65	11.58
20	23.76	22.71	23.24	5.08	4.53	4.81	11.51	11.56	11.54
30	25.34	24.21	24.78	4.06	4.41	4.24	11.46	11.13	11.30
31	25.74	26.9	26.32	4.19	4.48	4.34	11.11	10.99	11.05
35	22.29	27.34	24.82	3.85	4.22	4.04	11.12	10.95	11.04
40	25.68	27.47	26.58	3.55	4.06	3.81	10.98	11.51	11.25
50	28.43	26.7	27.57	3.68	3.38	3.53	10.9	11.01	10.96
60	26.4	26.7	26.55	3.52	3.45	3.49	11.01	10.8	10.91
90	27.74	25.18	26.46	3.54	3.59	3.57	11.03	10.98	11.01

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.25 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วม (เซ็นติเมตร)

เวลา	ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต			ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์			ตะกอนร่วม		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาที	-	-	-	90	90	90	84	83.9	83.95
20นาที	-	-	-	89.9	89.9	89.9	78.2	77.7	77.95
30นาที	-	-	-	89.8	89.8	89.8	73	71.7	72.35
40นาที	-	-	-	89.7	89.8	89.75	67.5	66	66.75
50นาที	-	-	-	89.6	89.7	89.65	61.5	60	60.75
1ชั่วโมง	-	-	-	89.5	89.7	89.6	56	54.5	55.25
1ชั่วโมง10นาที	-	-	-	89.5	89.6	89.55	50.5	49.2	49.85
1ชั่วโมง20นาที	-	-	-	89.4	89.5	89.45	45.5	44	44.75
1ชั่วโมง30นาที	-	-	-	89.4	89.4	89.4	41	38.8	39.9
1ชั่วโมง40นาที	-	-	-	89.3	89.4	89.35	37	35	36
1ชั่วโมง50นาที	-	-	-	89.3	89.3	89.3	33	31.7	32.35
2ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	89.3	89.3	89.3	29.5	28	28.75
2ชั่วโมง10นาที	1.5	1.5	1.5	89.2	89.2	89.2	27.4	25.5	26.45
2ชั่วโมง20นาที	1.5	1.5	1.5	89.2	89.2	89.2	25.2	23	24.1
2ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	89.1	89.1	89.1	23	21	22
2ชั่วโมง40นาที	1.5	1.5	1.5	89.1	89.1	89.1	21.2	18.8	20
2ชั่วโมง50นาที	1.5	1.5	1.5	89	89	89	19.5	17	18.25
3ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	89	89	89	18.5	16	17.25
3ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	88.8	88.8	88.8	17.4	14.8	16.1
4ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	88.5	88.5	88.5	16.2	13.9	15.05
4ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	88.2	87.5	87.85	15.5	13.3	14.4
5ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	87.5	86.2	86.85	15.1	12.8	13.95
5ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	85.5	84.5	85	14.7	12.4	13.55
6ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	81.5	81.5	81.5	14.4	12	13.2
18ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	32.8	33.1	32.95	9.6	8	8.8
18ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	32.4	32.7	32.55	9.4	7.9	8.65
19ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	31.8	32.2	32	9.2	7.8	8.5
19ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	31.5	31.8	31.65	9.1	7.7	8.4
20ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	31.2	31.3	31.25	9	7.6	8.3
20ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	30.9	30.8	30.85	8.9	7.6	8.25
21ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	30.6	30.5	30.55	8.8	7.5	8.15
21ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	30.2	30.2	30.2	8.7	7.4	8.05
22ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29.8	29.8	29.8	8.7	7.3	8
22ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	29.5	29.5	29.5	8.6	7.3	7.95
23ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29.3	29.3	29.3	8.6	7.2	7.9
23ชั่วโมง30นาที	1.5	1.5	1.5	29.1	29.1	29.1	8.5	7.1	7.8
24ชั่วโมง	1.5	1.5	1.5	29	28.9	28.95	8.4	7.1	7.75

*หมายเหตุ: การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถสังเกตเห็นชั้นตะกอนได้อย่างชัดเจนในช่วง 2 ชั่วโมงแรก

ง.4 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

ง.4.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 ตามลำดับและปั่นกววนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.26 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	Ca:Mg=3:1			Ca:Mg=2:1			Ca:Mg=1:1			Ca:Mg=1:2			Ca:Mg=1:3		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.54	7.7	7.62	7.7	7.78	7.74	7.45	7.65	7.55	7.57	7.8	7.69	7.85	7.76	7.81
หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์															
1	10.56	10.48	10.52	10.5	10.45	10.48	10.55	10.5	10.53	10.5	10.5	10.50	10.56	10.54	10.55
5	10.44	10.37	10.41	10.38	10.34	10.36	10.38	10.34	10.36	10.33	10.33	10.33	10.35	10.35	10.35
10	10.41	10.34	10.38	10.35	10.31	10.33	10.34	10.3	10.32	10.28	10.29	10.29	10.34	10.3	10.32
หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต															
1	10.38	10.25	10.32	10.33	10.27	10.30	10.43	10.31	10.37	10.39	10.35	10.37	10.45	10.37	10.41
5	10.29	10.23	10.26	10.28	10.22	10.25	10.3	10.25	10.28	10.3	10.3	10.30	10.37	10.32	10.35
10	10.28	10.23	10.26	10.26	10.21	10.24	10.29	10.25	10.27	10.29	10.29	10.29	10.36	10.3	10.33
20	10.28	10.22	10.25	10.25	10.2	10.23	10.29	10.25	10.27	10.29	10.29	10.29	10.36	10.29	10.33
30	10.28	10.22	10.25	10.25	10.2	10.23	10.28	10.24	10.26	10.28	10.28	10.28	10.36	10.29	10.33
31	11.13	11.12	11.13	11.14	11.11	11.13	11.13	11.12	11.13	11.13	11.1	11.12	11.14	11.11	11.13
35	11.13	11.12	11.13	11.15	11.12	11.14	11.12	11.13	11.13	11.13	11.11	11.12	11.14	11.11	11.13
40	11.13	11.12	11.13	11.15	11.12	11.14	11.12	11.13	11.13	11.13	11.11	11.12	11.13	11.1	11.12
50	11.13	11.12	11.13	11.15	11.12	11.14	11.11	11.13	11.12	11.11	11.1	11.11	11.13	11.09	11.11
60	11.12	11.12	11.12	11.14	11.11	11.13	11.1	11.13	11.12	11.11	11.1	11.11	11.12	11.09	11.11
90	11.1	11.09	11.10	11.13	11.1	11.12	11.07	11.12	11.10	11.07	11.08	11.08	11.09	11.05	11.07

*หมายเหตุ: หลังจากนาทิตี่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.27 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างกัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา (นาที)	Ca:Mg=3:1			Ca:Mg=2:1			Ca:Mg=1:1			Ca:Mg=1:2			Ca:Mg=1:3		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	13,500	13,500	13,500	12,000	12,000	12,000	9,000	9,000	9,000	6,000	6,000	6,000	4,500	4,500	4,500
1	206.00	171.00	188.50	168.50	177.00	172.75	151.50	136.00	143.75	126.00	129.50	127.75	141.00	115.50	128.25
5	121.50	125.50	123.50	122.50	130.00	126.25	110.50	102.50	106.50	96.50	97.50	97.00	105.50	97.50	101.50
10	117.00	125.50	121.25	129.00	126.00	127.50	109.50	100.00	104.75	98.00	100.00	99.00	96.00	92.00	94.00
20	121.50	120.50	121.00	119.50	124.00	121.75	109.00	99.00	104.00	92.50	94.50	93.50	98.00	93.00	95.50
30	120.00	121.00	120.50	114.00	120.00	117.00	106.00	96.00	101.00	90.50	92.50	91.50	96.00	92.00	94.00
31	81.00	80.00	80.50	73.00	80.50	76.75	65.50	55.50	60.50	57.50	55.50	56.50	50.50	54.50	52.50
35	80.00	77.50	78.75	74.00	80.00	77.00	65.00	55.50	60.25	52.00	55.00	53.50	51.00	47.50	49.25
40	77.50	79.00	78.25	77.00	78.50	77.75	60.50	56.00	58.25	53.50	53.50	53.50	51.00	48.00	49.50
50	73.50	79.50	76.50	72.00	75.50	73.75	61.50	54.00	57.75	52.50	54.50	53.50	46.00	48.00	47.00
60	74.00	77.00	75.50	74.00	75.00	74.50	61.50	54.50	58.00	49.50	52.50	51.00	47.00	48.00	47.50
90	70.50	77.50	74.00	72.00	72.50	72.25	62.00	53.50	57.75	49.50	48.00	48.75	45.00	46.00	45.50

*หมายเหตุ: หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.28 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา (นาที)	Ca:Mg=3:1			Ca:Mg=2:1			Ca:Mg=1:1			Ca:Mg=1:2			Ca:Mg=1:3		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	4,500	4,500	4,500	6,000	6,000	6,000	9,000	9,000	9,000	12,000	12,000	12,000	18,000	18,000	18,000
1	129.51	140.16	134.84	136.89	146.72	141.80	142.62	134.43	138.52	141.80	139.34	140.57	120.49	139.34	129.92
5	127.05	142.62	134.84	136.07	148.36	142.21	134.43	134.43	134.43	131.15	134.43	132.79	111.48	128.69	120.08
10	122.95	143.44	133.20	140.98	141.80	141.39	135.25	132.79	134.02	134.43	136.89	135.66	115.57	133.61	124.59
20	124.59	143.44	134.02	140.98	146.72	143.85	135.25	139.34	137.30	127.87	131.15	129.51	115.57	131.15	123.36
30	124.59	143.44	134.02	140.16	145.08	142.62	132.79	136.89	134.84	129.51	136.89	133.20	113.11	128.69	120.90
31	13.93	13.11	13.52	14.75	13.93	14.34	15.57	12.30	13.93	15.57	16.39	15.98	14.75	17.21	15.98
35	13.11	11.48	12.30	14.75	13.11	13.93	13.93	13.11	13.52	16.39	18.03	17.21	14.75	15.57	15.16
40	13.93	11.48	12.70	16.39	15.57	15.98	13.93	11.48	12.70	15.57	17.21	16.39	15.57	16.39	15.98
50	14.75	11.48	13.11	13.93	13.93	13.93	13.11	10.66	11.89	13.93	15.57	14.75	16.39	17.21	16.80
60	13.93	13.11	13.52	12.30	12.30	12.30	13.11	11.48	12.30	13.11	16.39	14.75	16.39	15.57	15.98
90	13.93	14.75	14.34	14.75	11.48	13.11	11.48	10.66	11.07	15.57	18.03	16.80	14.75	17.21	15.98

* หมายเหตุ: หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.29 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ไมโครเมตร)

เวลา (นาท)	Ca:Mg=3:1			Ca:Mg=2:1			Ca:Mg=1:1			Ca:Mg=1:2			Ca:Mg=1:3		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	10.75	11	10.88	10.34	11.13	10.74	10.09	8.02	9.06	7.75	7.37	7.56	7.21	7.8	7.51
5	12.22	12.15	12.19	11.58	11.33	11.46	10.66	11.03	10.85	9.74	10.05	9.90	9.26	8.97	9.12
10	12.22	11.77	12.00	11.51	11.65	11.58	10.71	11.09	10.90	9.56	10.09	9.83	8.77	8.96	8.87
20	11.76	11.68	11.72	11.51	11.56	11.54	10.24	11.04	10.64	9.47	9.58	9.53	8.95	8.65	8.80
30	11.88	11.88	11.88	11.46	11.13	11.30	10.15	10.8	10.48	9.82	9.32	9.57	8.88	8.56	8.72
31	11.66	11.69	11.68	11.11	10.99	11.05	10.23	10.7	10.47	9.38	9.51	9.45	8.81	8.73	8.77
35	11.87	11.73	11.80	11.12	10.95	11.04	10.09	10.89	10.49	9.77	9.35	9.56	8.9	8.53	8.72
40	11.85	11.73	11.79	10.98	11.51	11.25	10.68	10.49	10.59	9.24	8.84	9.04	8.45	8.44	8.45
50	11.74	11.75	11.75	10.9	11.01	10.96	10.93	10.68	10.81	9.26	8.86	9.06	8.03	8.26	8.15
60	11.82	11.68	11.75	11.01	10.8	10.91	10.51	10.71	10.61	9.21	8.76	8.99	8.01	8.29	8.15
90	11.88	11.83	11.86	11.03	10.98	11.01	10.77	10.99	10.88	9.24	8.81	9.03	8.06	8.34	8.20

* หมายเหตุ: หลังจากนาทที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1



ตารางที่ ง.30 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
ตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียม
ในสารตั้งต้นต่างๆกัน (เซ็นติเมตร)

เวลา (นาทีก)	Ca:Mg=3:1			Ca:Mg=2:1			Ca:Mg=1:1			Ca:Mg=1:2			Ca:Mg=1:3		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาทีก	76	74.7	75.35	84	83.9	83.95	89.6	89.6	89.6	89.8	89.7	89.75	89.9	89.9	89.9
20นาทีก	62	61.5	61.75	78.2	77.7	77.95	88.5	88.5	88.5	89.6	89.5	89.55	89.8	89.8	89.8
30นาทีก	50.2	50.6	50.4	73	71.7	72.35	86	85.8	85.9	89.5	89.4	89.45	89.7	89.7	89.7
40นาทีก	40.2	41	40.6	67.5	66	66.75	83.7	83.2	83.45	89.3	89.3	89.3	89.6	89.6	89.6
50นาทีก	33.2	33.3	33.25	61.5	60	60.75	80.4	80.4	80.4	88.2	89.1	88.65	89.5	89.5	89.5
1ชั่วโมง	28.3	27.8	28.05	56	54.5	55.25	78.3	77	77.65	87.2	88.3	87.75	89.4	89.4	89.4
1ชั่วโมง10นาทีก	24.6	24.1	24.35	50.5	49.2	49.85	75.9	74.4	75.15	85.7	86.5	86.1	89.2	89.3	89.25
1ชั่วโมง20นาทีก	21.3	21.4	21.35	45.5	44	44.75	72.8	70.8	71.8	84.2	84.5	84.35	88.7	88.9	88.8
1ชั่วโมง30นาทีก	18.8	18.7	18.75	41	38.8	39.9	69.6	67.5	68.55	82.3	82.6	82.45	87.6	87.7	87.65
1ชั่วโมง40นาทีก	16.5	16.5	16.5	37	35	36	66.6	64.6	65.6	80.4	80.9	80.65	85.7	85.9	85.8
1ชั่วโมง50นาทีก	15.4	14.9	15.15	33	31.7	32.35	63.1	61.3	62.2	78.5	78.8	78.65	83.7	84.5	84.1
2ชั่วโมง	14.7	14.2	14.45	29.5	28	28.75	59.5	57.5	58.5	76.8	76.9	76.85	82.3	82.7	82.5
2ชั่วโมง10นาทีก	14.3	13.5	13.9	27.4	25.5	26.45	55.6	53.2	54.4	74.4	74.9	74.65	80.4	81	80.7
2ชั่วโมง20นาทีก	13.9	13.1	13.5	25.2	23	24.1	52.8	50	51.4	72.5	73	72.75	78.7	79	78.85
2ชั่วโมง30นาทีก	13.6	12.7	13.15	23	21	22	49	46.2	47.6	70.1	70.8	70.45	76.8	77	76.9
2ชั่วโมง40นาทีก	13.2	12.4	12.8	21.2	18.8	20	46	43.5	44.75	67.5	68.9	68.2	75	75.2	75.1
2ชั่วโมง50นาทีก	12.9	12	12.45	19.5	17	18.25	43.3	40	41.65	64.9	66.9	65.9	72.8	73.3	73.05
3ชั่วโมง	12.7	11.8	12.25	18.5	16	17.25	40.3	37.9	39.1	62.4	65	63.7	71.2	71.3	71.25
3ชั่วโมง30นาทีก	12.2	11.1	11.65	17.4	14.8	16.1	33.7	31.3	32.5	54.5	59	56.75	65.7	65.1	65.4
4ชั่วโมง	11.6	10.5	11.05	16.2	13.9	15.05	28.2	26.8	27.5	47	53.4	50.2	59.9	59	59.45
4ชั่วโมง30นาทีก	11	10.1	10.55	15.5	13.3	14.4	25.6	24.8	25.2	39.4	47.3	43.35	53.8	52.7	53.25
5ชั่วโมง	10.6	9.8	10.2	15.1	12.8	13.95	24.8	24	24.4	32.5	41.5	37	47.5	46	46.75
5ชั่วโมง30นาทีก	10.2	9.3	9.75	14.7	12.4	13.55	24.3	23	23.65	30.5	37	33.75	41.6	40.5	41.05
6ชั่วโมง	10	8.9	9.45	14.4	12	13.2	23.9	21.9	22.9	29.3	33.8	31.55	37	36	36.5
18ชั่วโมง	6.2	5.4	5.8	9.6	8	8.8	15	14.2	14.6	18.9	21.7	20.3	22.2	22.3	22.25
18ชั่วโมง30นาทีก	6.1	5.3	5.7	9.4	7.9	8.65	14.9	14	14.45	18.7	21.5	20.1	21.9	22	21.95
19ชั่วโมง	6	5.2	5.6	9.2	7.8	8.5	14.7	13.9	14.3	18.4	21.1	19.75	21.7	21.7	21.7
19ชั่วโมง30นาทีก	6	5.1	5.55	9.1	7.7	8.4	14.5	13.8	14.15	18.2	20.9	19.55	21.5	21.5	21.5
20ชั่วโมง	5.9	5	5.45	9	7.6	8.3	14.4	13.6	14	17.9	20.7	19.3	21.3	21.2	21.25
20ชั่วโมง30นาทีก	5.9	5	5.45	8.9	7.6	8.25	14.3	13.5	13.9	17.7	20.5	19.1	21	21	21
21ชั่วโมง	5.8	4.9	5.35	8.8	7.5	8.15	14.2	13.4	13.8	17.5	20.3	18.9	20.8	20.8	20.8
21ชั่วโมง30นาทีก	5.7	4.8	5.25	8.7	7.4	8.05	14.1	13.3	13.7	17.2	20	18.6	20.6	20.6	20.6
22ชั่วโมง	5.6	4.8	5.2	8.7	7.3	8	13.9	13.2	13.55	17	19.9	18.45	20.4	20.4	20.4
22ชั่วโมง30นาทีก	5.6	4.7	5.15	8.6	7.3	7.95	13.8	13.1	13.45	17	19.7	18.35	20.2	20.3	20.25
23ชั่วโมง	5.5	4.6	5.05	8.6	7.2	7.9	13.7	13	13.35	16.9	19.5	18.2	20	20.1	20.05
23ชั่วโมง30นาทีก	5.5	4.6	5.05	8.5	7.1	7.8	13.5	12.8	13.15	16.7	19.3	18	19.8	19.9	19.85
24ชั่วโมง	5.4	4.5	4.95	8.4	7.1	7.75	13.3	12.8	13.05	16.5	19.1	17.8	19.6	19.7	19.65

ง.4.2 ผลของความเร็วรอบของการกวน

ผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตและปั่นกวนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 200 300 และ 400 รอบต่อนาทีตามลำดับ

ตารางที่ ง.31 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	7.7	7.54	7.62	7.7	7.78	7.74	7.46	7.4	7.43
หลังจากเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์									
1	10.55	10.55	10.55	10.5	10.45	10.48	10.5	10.51	10.51
5	10.4	10.4	10.40	10.38	10.34	10.36	10.37	10.37	10.37
10	10.36	10.37	10.37	10.35	10.31	10.33	10.34	10.35	10.35
หลังจากเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต									
1	10.4	10.4	10.40	10.33	10.27	10.30	10.38	10.38	10.38
5	10.28	10.27	10.28	10.28	10.22	10.25	10.27	10.25	10.26
10	10.26	10.27	10.27	10.26	10.21	10.24	10.25	10.25	10.25
20	10.26	10.26	10.26	10.25	10.2	10.23	10.25	10.24	10.25
30	10.26	10.26	10.26	10.25	10.2	10.23	10.25	10.23	10.24
31	11.12	11.12	11.12	11.14	11.11	11.13	11.12	11.12	11.12
35	11.12	11.12	11.12	11.15	11.12	11.14	11.12	11.12	11.12
40	11.12	11.12	11.12	11.15	11.12	11.14	11.12	11.12	11.12
50	11.11	11.11	11.11	11.15	11.12	11.14	11.1	11.1	11.10
60	11.1	11.11	11.11	11.14	11.11	11.13	11.1	11.1	11.10
90	11.08	11.08	11.08	11.13	11.1	11.12	11.06	11.07	11.07

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.32 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเร็วรอบของการกวนต่าง ๆ กัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
1	201.00	209.00	205.00	168.50	177.00	172.75	151.50	180.00	165.75
5	141.00	137.50	139.25	122.50	130.00	126.25	104.50	140.50	122.50
10	134.00	133.50	133.75	129.00	126.00	127.50	104.50	136.50	120.50
20	130.00	133.50	131.75	119.50	124.00	121.75	101.00	136.50	118.75
30	133.50	131.00	132.25	114.00	120.00	117.00	100.00	132.00	116.00
31	94.50	93.50	94.00	73.00	80.50	76.75	66.00	97.00	81.50
35	92.00	92.50	92.25	74.00	80.00	77.00	64.50	96.50	80.50
40	90.00	90.00	90.00	77.00	78.50	77.75	63.50	99.00	81.25
50	90.50	91.00	90.75	72.00	75.50	73.75	61.50	96.50	79.00
60	87.50	91.00	89.25	74.00	75.00	74.50	61.50	94.00	77.75
90	87.50	87.00	87.25	72.00	72.50	72.25	58.50	85.50	72.00

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.33 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่
ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
1	147.54	141.80	144.67	136.89	146.72	141.80	140.98	142.62	141.80
5	142.62	140.98	141.80	136.07	148.36	142.21	140.98	147.54	144.26
10	147.54	140.98	144.26	140.98	141.80	141.39	140.98	143.44	142.21
20	139.34	137.70	138.52	140.98	146.72	143.85	137.70	146.72	142.21
30	140.16	134.43	137.30	140.16	145.08	142.62	134.43	145.08	139.75
31	14.75	15.57	15.16	14.75	13.93	14.34	13.11	16.39	14.75
35	15.57	16.39	15.98	14.75	13.11	13.93	13.93	14.75	14.34
40	13.93	15.57	14.75	16.39	15.57	15.98	13.11	10.66	11.89
50	12.30	17.21	14.75	13.93	13.93	13.93	12.30	13.11	12.70
60	13.11	17.21	15.16	12.30	12.30	12.30	12.30	14.75	13.52
90	15.57	16.39	15.98	14.75	11.48	13.11	12.30	12.30	12.30

* หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1



ตารางที่ ง.34 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน
(ไมโครเมตร)

เวลา(นาที)	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	8.82	9.52	9.17	10.34	11.13	10.74	10.25	8.41	9.33
5	11.09	11.64	11.37	11.58	11.33	11.46	10.75	10.48	10.62
10	11.95	11.64	11.80	11.51	11.65	11.58	10.74	10.46	10.60
20	12.23	12.14	12.19	11.51	11.56	11.54	10.81	10.35	10.58
30	12.36	12.05	12.21	11.46	11.13	11.30	10.73	10.22	10.48
31	11.98	11.54	11.76	11.11	10.99	11.05	10.57	10.26	10.42
35	12.02	11.42	11.72	11.12	10.95	11.04	10.58	10.55	10.57
40	11.98	11.66	11.82	10.98	11.51	11.25	10.71	10.4	10.56
50	12.04	11.64	11.84	10.9	11.01	10.96	10.79	10.26	10.53
60	12.09	11.8	11.95	11.01	10.8	10.91	10.77	10.3	10.54
90	12.07	11.91	11.99	11.03	10.98	11.01	10.75	10.35	10.55

*หมายเหตุ: หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.35 ความสูงชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอน
รวมที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของการกวนต่างๆกัน (เซ็นติเมตร)

เวลา	200 รอบต่อนาที			300 รอบต่อนาที			400 รอบต่อนาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10นาที	83.2	83.3	83.25	84	83.9	83.95	84.3	83.8	84.05
20นาที	76	76.1	76.05	78.2	77.7	77.95	77.8	77.2	77.5
30นาที	69	69	69	73	71.7	72.35	71.2	70.6	70.9
40นาที	62	62	62	67.5	66	66.75	64.2	64	64.1
50นาที	55.4	55.5	55.45	61.5	60	60.75	57.4	57.3	57.35
1ชั่วโมง	49	49.5	49.25	56	54.5	55.25	50.5	50.5	50.5
1ชั่วโมง10นาที	42	43	42.5	50.5	49.2	49.85	44.2	44.6	44.4
1ชั่วโมง20นาที	35	37.2	36.1	45.5	44	44.75	38.9	39.5	39.2
1ชั่วโมง30นาที	29.8	31.5	30.65	41	38.8	39.9	34.8	35.3	35.05
1ชั่วโมง40นาที	26	26.7	26.35	37	35	36	30.8	31.8	31.3
1ชั่วโมง50นาที	23.4	23.8	23.6	33	31.7	32.35	27.8	28.9	28.35
2ชั่วโมง	21	21.2	21.1	29.5	28	28.75	25.6	26.2	25.9
2ชั่วโมง10นาที	18.5	19.5	19	27.4	25.5	26.45	23.2	23.7	23.45
2ชั่วโมง20นาที	17	18	17.5	25.2	23	24.1	21.8	21.9	21.85
2ชั่วโมง30นาที	15	16	15.5	23	21	22	20.9	20.8	20.85
2ชั่วโมง40นาที	13.5	14.5	14	21.2	18.8	20	20.4	20.2	20.3
2ชั่วโมง50นาที	12.8	13.5	13.15	19.5	17	18.25	19.9	19.6	19.75
3ชั่วโมง	12.5	13	12.75	18.5	16	17.25	19.4	19	19.2
3ชั่วโมง30นาที	12	12.4	12.2	17.4	14.8	16.1	18.4	17.9	18.15
4ชั่วโมง	11.4	11.8	11.6	16.2	13.9	15.05	17.6	16.9	17.25
4ชั่วโมง30นาที	10.9	11.3	11.1	15.5	13.3	14.4	16.8	16.3	16.55
5ชั่วโมง	10.4	10.8	10.6	15.1	12.8	13.95	16.3	15.7	16
5ชั่วโมง30นาที	10	10.5	10.25	14.7	12.4	13.55	15.8	15.3	15.55
6ชั่วโมง	9.6	10.2	9.9	14.4	12	13.2	15.4	14.8	15.1
18ชั่วโมง	6	6.9	6.45	9.6	8	8.8	10.1	9.5	9.8
18ชั่วโมง30นาที	6	6.8	6.4	9.4	7.9	8.65	10	9.4	9.7
19ชั่วโมง	5.9	6.7	6.3	9.2	7.8	8.5	9.9	9.2	9.55
19ชั่วโมง30นาที	5.9	6.6	6.25	9.1	7.7	8.4	9.7	9.1	9.4
20ชั่วโมง	5.8	6.5	6.15	9	7.6	8.3	9.6	9	9.3
20ชั่วโมง30นาที	5.8	6.4	6.1	8.9	7.6	8.25	9.5	8.9	9.2
21ชั่วโมง	5.7	6.3	6	8.8	7.5	8.15	9.4	8.8	9.1
21ชั่วโมง30นาที	5.7	6.3	6	8.7	7.4	8.05	9.3	8.7	9
22ชั่วโมง	5.6	6.2	5.9	8.7	7.3	8	9.2	8.6	8.9
22ชั่วโมง30นาที	5.5	6.2	5.85	8.6	7.3	7.95	9.1	8.5	8.8
23ชั่วโมง	5.5	6.1	5.8	8.6	7.2	7.9	9	8.4	8.7
23ชั่วโมง30นาที	5.4	6.1	5.75	8.5	7.1	7.8	8.9	8.3	8.6
24ชั่วโมง	5.4	6.1	5.75	8.4	7.1	7.75	8.8	8.2	8.5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ไชยพันธ์ แท่งทอง เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม 2523 ที่ อ.เมือง จ.ปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย