

ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของ
แคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์



นางสาว จุฑามาศ โชติพานิช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2899-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE COPRECIPITATION OF CALCIUM AND
MAGNESIUM IONS AS CALCIUM CARBONATE AND MAGNESIUM HYDROXIDE

Miss. Jutamart Chotipanich

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2899-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

โดย

นางสาว จุฑามาศ ไชติพานิช


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

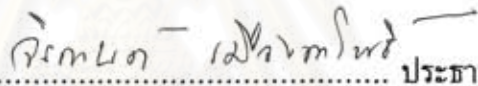
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์

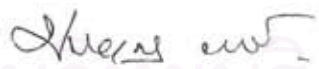
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

จุฬามาศ โชติพานิช : ผลของโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียม และแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE COPRECIPITATION OF CALCIUM AND MAGNESIUM IONS AS CALCIUM CARBONATE AND MAGNESIUM HYDROXIDE). อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์, 151 หน้า. ISBN 974-53-2899-5

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลการศึกษาพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลง และส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนและปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดของตะกอนร่วมจะมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้การตกตะกอนมีความเร็วลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น หากกำหนดค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์คงที่ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่สูงส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าต่ำลง ทำให้ปริมาณแคลเซียมคงเหลือในสารละลายมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณแมกนีเซียมในสารละลายลดต่ำลงแต่จะได้ตะกอนขนาดใหญ่และตกตะกอนเร็วขึ้น



สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....จุฬามาศ โชติพานิช.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4670268021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : EFFECT OF SODIUM CHLORIDE/CALCIUM CARBONATE/
MAGNESIUM HYDROXIDE/PRECIPITATION/SEDIMENTATION

JUTAMART CHOTIPANICH : EFFECT OF SODIUM CHLORIDE ON THE
COPRECIPITATION OF CALCIUM AND MAGNESIUM IONS AS CALCIUM
CARBONATE AND MAGNESIUM HYDROXIDE. THESIS ADVISOR : WIT
SOONTARANUN, Ph.D.,151 pp. ISBN : 974-53-2899-5

Effect of sodium chloride on the co-precipitation of calcium and magnesium ions as calcium carbonate and magnesium hydroxide was studied. It was found that the increase of sodium chloride concentration resulted in lower pH and higher residual calcium and magnesium ions. In addition, the size of co-precipitated crystal became smaller, resulting in slower sedimentation. If the sodium chloride concentration was kept constant, it was found that higher calcium proportion in co-precipitation led to lower pH and residual magnesium ion whereas the residual calcium ion became higher and larger crystals were formed resulting in faster sedimentation.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature..... จุตมาศ ชอติพานิช.....
Field of study...Chemical Engineering.....Advisor's signature..... Wit Soontaranun.....
Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และห้องปฏิบัติการเคมี และห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมีที่เอื้อเพื่อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมชีวเคมีที่ให้คำแนะนำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

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.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทำน้ำอ่อน.....	4
2.2 วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	4
2.2.1 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	4
2.2.2 กลไกการดูดจับไอออน.....	6
2.2.3 การล้างคืนประจุ.....	6
2.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน.....	7
2.3 การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน.....	8
2.3.1 สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต.....	9
2.3.2 สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	11
2.3.3 ปัจจัยที่มีต่อค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	12
2.4 การเกิดผลึก.....	15
2.4.1 ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด.....	15
2.4.2 การเกิดนิวเคลียส.....	16
2.4.3 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเพิ่มขนาดของผลึก.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต....	17

2.5.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	20
2.5.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	21
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2	วิธีการทดลอง.....	25
3.2.1	การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนขอแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	25
3.2.2	การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	28
3.2.3	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	29
3.2.4	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ....	30
3.2.5	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	31
3.2.6	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ.....	31
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	33
4.1	การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	33
4.1.1	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	33

4.1.2	การศึกษาผลของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างๆในการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%.....	44
4.2	การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	53
4.2.1	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์.....	53
4.2.2	การศึกษาผลของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่างๆในการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%.....	63
4.3	การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม.....	71
4.3.1	การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม.....	71
4.3.2	การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์6%.....	85
5	การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	95
6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	98
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	98
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	99
	รายการอ้างอิง.....	100
	ภาคผนวก.....	102
	ภาคผนวก ก. การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	103
	ภาคผนวก ข. วิธีการวิเคราะห์.....	116
	ภาคผนวก ค. วิธีการคำนวณความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	118
	ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดลอง.....	119
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าความสามารถในการละลายของสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน..... 8
3.1	ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่างกัน..... 32
4.1	ค่าความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์..... 62
5.1	การจำแนกคุณภาพน้ำ..... 96
ง.1	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 119
ง.2	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 120
ง.3	ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 121
ง.4	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 122
ง.5	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 123
ง.6	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน..... 124
ง.7	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน..... 125
ง.8	ค่าแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน..... 126
ง.9	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน..... 127
ง.10	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน..... 128
ง.11	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 129
ง.12	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน..... 130

ตารางที่	หน้า
ง.13 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน.....	131
ง.14 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียม คลอไรด์ต่างกัน.....	132
ง.15 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน.....	133
ง.16 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้ง ต้นต่างกัน.....	134
ง.17 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้น ของสารตั้งต้นต่างกัน.....	135
ง.18 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน.....	136
ง.19 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น ต่างกัน.....	137
ง.20 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน.....	138
ง.21 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน...	139
ง.22 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ต่างกัน.....	140
ง.23 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน.....	141
ง.24 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน.....	142
ง.25 ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ต่างกัน.....	143
ง.26 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ ตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน.....	144
ง.27 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียม ต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างกัน.....	145
ง.28 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของ แคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน.....	146

ตารางที่	หน้า
ง.29 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	147
ง.30 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	148
ง.31 ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	149
ง.32 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	150

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปร่างของเม็ดเรซิน.....	5
2.2	การควบอณูระหว่าง Styrene และ DVB.....	5
2.3	รูปแบบของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต.....	18
3.1	หลอดตกตะกอนที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3.2	รูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอน.....	26
4.1	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน.....	34
4.2	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน.....	37
4.3	ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน.....	38
4.4	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน.....	40
4.5	การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์) ก่อนและหลังปรับค่า pH.....	41
4.6	การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนและหลังปรับค่า pH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมคลอไรด์.....	42
4.7	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอน.....	43
4.8	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	45
4.9	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	46
4.10	ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต.....	47
4.11	ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH.....	48
4.12	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	49
4.13	การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน.....	50

รูปที่	หน้า
4.14	ผลของค่าความอึดตัววดยิ่งที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก..... 51
4.15	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน... 52
4.16	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 54
4.17	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 55
4.18	ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 56
4.19	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 58
4.20	การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์) ก่อนและหลังปรับค่า pH..... 59
4.21	การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังปรับค่า pH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมคลอไรด์..... 60
4.22	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์..... 61
4.23	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 64
4.24	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 65
4.25	ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 66
4.26	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 67
4.27	การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 69
4.28	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 70

รูปที่	หน้า
4.29	ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 72
4.30	ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 73
4.31	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 74
4.32	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 75
4.33	ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 78
4.34	ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 79
4.35	ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 80
4.36	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 81
4.37	การกระจายขนาดของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 82
4.38	การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน.... 83
4.39	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา..... 84
4.40	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน..... 85
4.41	ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 86
4.42	ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 87
4.43	ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 89
4.44	ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน..... 90

รูปที่		หน้า
4.45	การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน.....	91
4.46	ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนร่วมที่แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน.....	92
5.1	ระบบทำน้ำอ่อนและการล้างคืนประจุ.....	95
5.2	ค่าการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	97



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

C_T	=	ผลรวมความเข้มข้นของไอออน
D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
f_D	=	ค่าสัมประสิทธิ์แอดทิวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ± 2
f_M	=	ค่าสัมประสิทธิ์แอดทิวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ± 1
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s^2
I	=	ไอออนิกสเตรนจ์ท์
K_{a1}	=	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1
K_{a2}	=	ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 2
K_{sp}	=	ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอน
m	=	ความเข้มข้นของไอออน
R	=	เรซิน
SB	=	เรซินชนิดประจุลบ-ต่างแก่
SC	=	เรซินชนิดประจุบวก-กรดแก่
v_t	=	ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค
WB	=	เรซินชนิดประจุลบ-ต่างอ่อน
WC	=	เรซินชนิดประจุบวก-กรดอ่อน
z	=	ประจุไฟฟ้าของไอออน
ρ_p	=	ความหนาแน่นของอนุภาค
ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว
μ	=	ความหนืดของของเหลว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

โดยทั่วไปน้ำที่ได้อาจมาจากแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินมักมีสิ่งเจือปนซึ่งทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์และอาจก่อให้เกิดปัญหาเมื่อนำน้ำนั้นไปใช้ในการอุปโภคและทางอุตสาหกรรม ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพน้ำถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ กระบวนการผลิตน้ำอ่อนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Water Softening) จัดว่าเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรมทั่วไป แต่เนื่องจากกระบวนการนี้จะก่อให้เกิดน้ำเสียในขั้นตอนของกระบวนการคืนสภาพ (Regeneration) ของเรซินด้วยน้ำเกลือ (Brine Solution) โดยน้ำเสียในกระบวนการนี้จะประกอบไปด้วยเกลือของโซเดียม แคลเซียมและแมกนีเซียมคลอไรด์ละลายอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง การทิ้งน้ำเสียนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสภาพน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินในการเพาะปลูกพืชบางชนิดส่วนเกลือของแคลเซียมและแมกนีเซียมคลอไรด์ก็อาจสะสมในการเพิ่มค่าความกระด้างให้กับแหล่งน้ำตามธรรมชาติอีกด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อด้านอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นการสูญเสียเกลือโซเดียมคลอไรด์โดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นการแก้ปัญหาโดยทำการกำจัดไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมออกจากน้ำเสียและนำน้ำเกลือกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดของเสียและประหยัดค่าใช้จ่าย

วิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียประเภทนี้มักใช้กระบวนการทางเคมีโดยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) โดยการทำปฏิกิริยาการตกตะกอนของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนโดยใช้สารเคมีคือสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดตะกอนแยกออกมา อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำเสียที่จะทำการตกตะกอนมักมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ในปริมาณสูง เป็นผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปอันจะมีผลต่อการตกตะกอนของทั้งแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ดังนั้นเพื่อการศึกษาที่สามารถนำหลักการที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อกระบวนการเกิดตะกอนและการเกิดตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว

2. ศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยในกระบวนการเกิดตะกอนจะพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และในกระบวนการตกตะกอนจะพิจารณาถึงผลที่มีต่อความเร็วของการตกตะกอนโดยกำหนดให้ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ที่ 4% 6% และ 8%

3. สำหรับค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่กำหนด (ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นอยู่ในช่วง 6,000 – 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำเสียที่เกิดจากการฟื้นฟูสภาพเรซินและทำการทดลองที่สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง

4. ศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยกำหนดให้ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ที่ 4% 6% และ 8%

5. สำหรับค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่กำหนด (ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%) ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

ผลการศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถนำไปใช้พัฒนากระบวนการฟื้นฟูสภาพเรซินให้สามารถลดน้ำเสียและนำสารละลายเกลือกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทำน้ำอ่อน

ความกระด้างในน้ำเกิดจากปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีหน่วยวัดเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยทั่วไปน้ำใช้ของโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นน้ำดิบที่ได้จากแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งมีความกระด้างสูง หากทำการจ่ายน้ำดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยตรงอาจก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของระบบท่อและอุปกรณ์เนื่องจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวของแคลเซียมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์กับไฮดรอกไซด์ที่มีประจุลบในน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดไฮดรอกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมออก

การกำจัดความกระด้างของน้ำ มีการพัฒนากระบวนการที่แตกต่างกัน ดังนี้

- การตกตะกอน โดยใช้สารเคมี (Chemical Precipitation)
- ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis)
- การแลกเปลี่ยนประจุ โดยใช้เรซิน (Ion Exchange Resin)

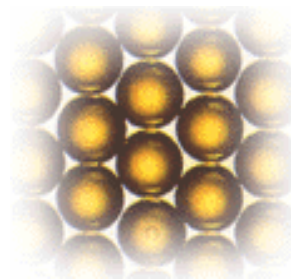
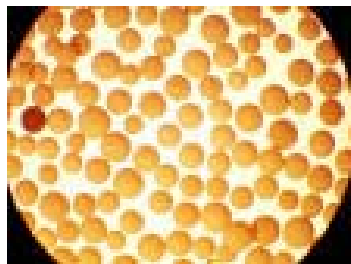
ปัจจุบันการกำจัดความกระด้างของน้ำนิยมใช้การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion Exchange Resin) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีเมื่อเทียบกับต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก

2.2 วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

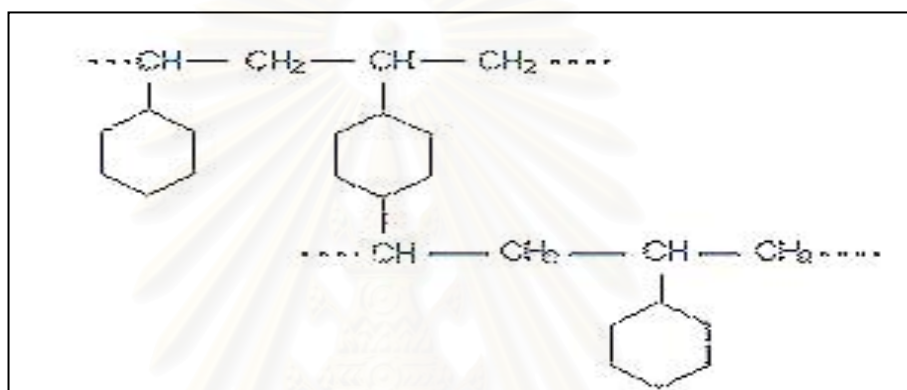
เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนจากวัสดุที่เป็นของแข็งกับไอออนชนิดต่างๆในสารละลายเป็นได้ทั้งแบบกะหรือแบบต่อเนื่อง ในกระบวนการแบบกะเม็ดเรซินจะถูกกวนในสารละลายจนปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลงจากนั้นเรซินจะถูกแยกออกฟื้นฟูประสิทธิภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนในกระบวนการแบบต่อเนื่องเม็ดเรซินจะถูกบรรจุไว้ในถังทรงกระบอกแล้วให้น้ำที่จะบำบัดไหลผ่านชั้นเรซิน เมื่อเรซินดูดจับไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียมไว้เต็มแล้วจึงทำการฟื้นฟูสภาพภายในถังเดียวกัน

2.2.1 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินมีเม็ดค่อนข้างกลมเกิดจากการควบแน่นระหว่างสไตรีน (Styrene) โดย Divinylbenzene (DVB) เป็นตัวจับระหว่างโพลีสไตรีนเรียกว่า Crosslinkage เรซินมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือโครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า (Functional Group)



รูปที่ 2.1 รูปร่างของเม็ดเรซิน



รูปที่ 2.2 การควบอมระหว่าง Styrene และ DVB

ในปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. ชนิดประจุบวก-กรดแก่ ตัวย่อ SC (Strong Acid Cation) มีหมู่ไอออนประจำตัวคือ $-\text{SO}_3^-$ เรซินชนิดนี้มีการใช้งานมากที่สุดในจำพวกเรซินประจุบวกซึ่งถ้าใช้ในการกำจัดไอออนประจุบวกเรียกว่าเป็นวัฏจักรไฮโดรเจน (Hydrogen Cycle) ถ้าจับไอออนของความกระด้างเพื่อทำน้ำอ่อนแต่เพียงอย่างเดียวเรียกว่าวัฏจักรโซเดียม (Sodium Cycle)
2. ชนิดประจุบวก-กรดอ่อน ตัวย่อ WC (Weak Acid Cation) มีหมู่ไอออนประจำตัวคือ $-\text{COO}^-$ ไม่สามารถจับไอออนประจุบวกของเกลืออนินทรีย์แต่แลกเปลี่ยนไอออนกับต่างโซดาไฟหรือเกลือของกรดอ่อนได้และมีข้อเสียคือปลดปล่อยไอออนที่จับไว้ได้ง่าย
3. ชนิดประจุลบ-ด่างแก่ ตัวย่อ SB (Strong Base Anion) มีหมู่ไอออนประจำตัวคือ $-\text{NR}_3^+$ จะมีปฏิกิริยาแตกตัวได้ที่ pH ทุกช่วงโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปคลอไรด์ (R-NCl) ทั้งนี้เพราะมีเสถียรภาพสูงกว่าในการใช้งานต้องใช้ในรูป R-NOH จึงต้องฟื้นฟูประสิทธิภาพด้วยโซดาไฟก่อน

4. ชนิดประจุลบ-ต่างอ่อน ตัวอย่าง WB (Weak Base Anion) มีหมู่ไอออนประจำตัวคือ $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$ เรซินชนิดนี้ใช้จับไอออนประจุลบของกรดแก่

โดยทั่วไปโครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกันแต่จะแตกต่างกันที่หมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ในที่นี้เราจะกล่าวถึงเฉพาะเรซินประจุบวกซึ่งเป็นประเภทที่ใช้ในกระบวนการทำน้ำอ่อน โดยทั่วไปเรซินประจุบวกในกระบวนการทำน้ำอ่อนนิยมใช้เรซินประจุบวกแบบสารโซเดียม (Sodium Cation Resin) ในเรซินประจุบวกประเภทนี้จะมีหมู่ไอออนเป็นสาร Sulfonic (SO_3^-) รวมตัวกับสารโซเดียมอยู่ในรูป SO_3Na เพื่อการเขียนสมการเคมีจะใช้ R เป็นสัญลักษณ์แทนเรซินจึงสามารถเขียนเป็น RNa_2 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินชนิดนี้คือ



2.2.2 กลไกการดูดจับไอออน

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออนคือลำดับความยากง่ายในการถูกจับของไอออน (Ion Selectivity) ของเรซิน สำหรับไอออนประจุบวกสามารถแสดงได้ดังนี้ $Fe^{3+} > Al^{3+} > Pb^{2+} > Ba^{2+} > Sr^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > H^+ > Li^+$ (ลำดับก่อนหน้าหมายถึงจะถูกจับก่อนเมื่อเปรียบเทียบกับไอออนที่อยู่หลัง)

2.2.3 การล้างคืนประจุ

โดยปกติแล้วโซเดียมที่ยึดเกาะที่ผิวของเรซินจะถูกแทนที่ด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในน้ำกระด้างได้ง่ายตาม Ion Selectivity ที่กล่าวถึงข้างต้นเมื่อต้องการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพจะต้องให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ จึงต้องใช้น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นและมีเกลือในปริมาณมาก เพราะจะทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมไอออนมากกว่าไอออนของความกระด้างหลายเท่า จึงทำให้ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนผันกลับได้ ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ดีที่สุดคือเข้มข้น 10% การล้างเรซินด้วยน้ำเกลือจะทำให้เรซินกลับสู่สภาพเดิมตามสมการ



2.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

- ปริมาณรีเจนเนอแรนท์ (ระดับรีเจนเนอแรชั่น)

การใช้รีเจนเนอแรนท์ปริมาณมาก ๆ จะได้อำนาจแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าการใช้ปริมาณน้อย แต่อัตราการเพิ่มปริมาณรีเจนเนอแรนท์สูงกว่าอัตราการเพิ่มอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจึงต้องกำหนดปริมาณรีเจนเนอแรนท์

- ความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนท์

ในการฟื้นคืนอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนให้กลับคืนมาดีที่สุดต้องมีความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนท์ที่เหมาะสม การใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้เรซินจะหดตัวจนเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโซเดียมเข้าสู่ช่องว่างภายในเรซิน แต่ถ้าความเข้มข้นต่ำเกินไปก็จะมีปริมาณโซเดียมไม่เพียงพอที่จะแทนที่แคลเซียมและแมกนีเซียมได้

- เวลาสัมผัสระหว่างรีเจนเนอแรนท์และเรซิน

คือระยะเวลาที่เรซินเริ่มได้สัมผัสกับรีเจนเนอแรนท์ไปถึงเวลาที่เริ่มทำการชะล้าง โดยต้องคำนึงถึงอัตราการไหลรีเจนเนอแรนท์ที่เหมาะสมในการทำรีเจนเนอแรชั่นเพื่อสามารถควบคุมการกระจายรีเจนเนอแรนท์ให้ได้อย่างสม่ำเสมอ

- ความลึกของชั้นเรซิน

มีความสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนไม่มากเนื่องจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

- แร่ธาตุในน้ำดิบ

ความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำดิบมีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ซึ่งหากน้ำดิบมีโซเดียมไอออนค่อนข้างมากอาจทำให้อำนาจในการกำจัดความกระด้างของเรซินลดลง เนื่องจากโซเดียมไอออนจะแย่งตำแหน่งบนเรซินกับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ดังนั้นการจัดความกระด้างทำได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีการรั่วของความกระด้าง

ทั้งนี้จากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาต้องขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบการทำน้ำอ่อน แต่ปัจจัยหลักที่จะทำการศึกษาเพื่อให้เห็นผลโดยรวมคือค่าความเข้มข้นของรีเจนเนอแรนท์

2.3 การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน

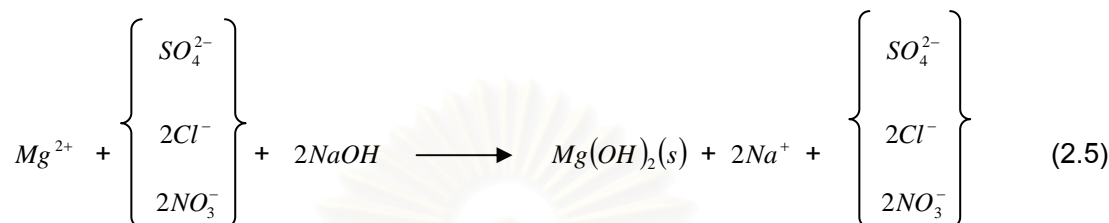
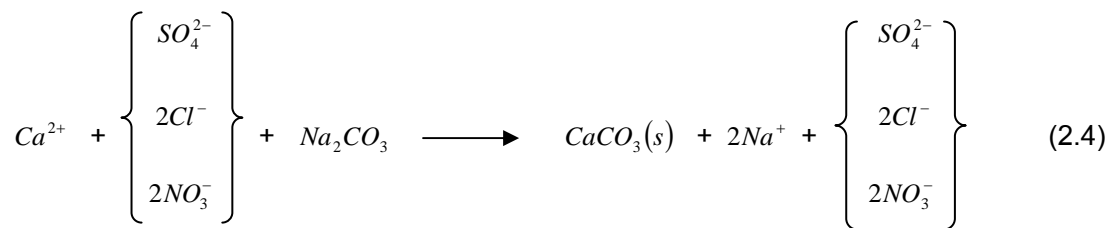
การลดค่าความกระด้าง (แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน) โดยวิธีการเติมสารเคมี นั้นเป็นการใช้ปฏิกิริยาให้เกิดการตกตะกอนออกมา (Precipitation) ซึ่งเป็นการอาศัยความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยของสารต่างๆ ให้ตกตะกอนหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว ดังนั้นค่าความสามารถในการละลายจึงเป็นปัจจัยหลักในการเลือกรูปแบบการตกตะกอน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบของแคลเซียมแมกนีเซียมไอออนที่ใช้ในการลดค่าความกระด้าง (Peavy และคณะ, 1985)

สารประกอบ	สูตรทางเคมี	ค่าการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 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

ค่าความสามารถในการละลายน้อยที่สุดสำหรับสารประกอบของแคลเซียมคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และสำหรับสารประกอบของแมกนีเซียมคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) การกำจัดแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนออกจากสารละลายจึงใช้หลักการเปลี่ยนรูปไอออนให้อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีค่าความสามารถในการละลายต่ำดังที่กล่าวในขั้นต้น

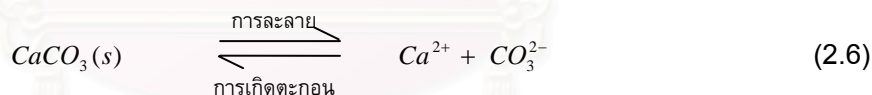
โดยปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถแสดงได้ดังนี้



เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสมดุลการละลายของตะกอน ดังนั้นเราจะกล่าวถึงสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

2.3.1 สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อนำสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงกว่าค่าการละลายมาละลายน้ำพบว่าจะเกิดภาวะสมดุลกันระหว่างกระบวนการละลายหรือการแตกตัวของสารประกอบไปเป็นไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ กับกระบวนการรวมตัวของไอออนกลายเป็นสารประกอบหรือของแข็งทำให้ความเข้มข้นของสารคงที่ สามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาได้ดังนี้



ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$K_{sp}(CaCO_3) = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \quad (2.7)$$

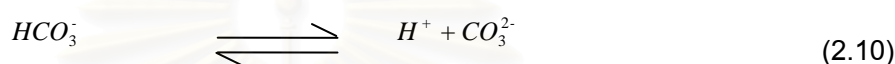
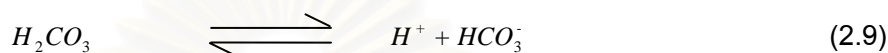
เมื่อ $K_{sp}(CaCO_3)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่า $10^{-8.34}$ ที่ $25^\circ C$ (Snoeyink และ Jenkins, 1987)

เมื่อ $[Ca^{2+}], [CO_3^{2-}]$ คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมและคาร์บอเนตไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

จากสมการที่ 2.7 สามารถคำนวณปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เกิดจากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตได้จาก

$$[Ca^{2+}] = \frac{K_{sp}(CaCO_3)}{[CO_3^{2-}]} \quad (2.8)$$

ความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ที่สมดุลในสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกดังนี้ (Snoeyink และ Jenkins, 1987)



เมื่อ K_{a1}, K_{a2} คือ ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่ $25^\circ C$ ตามลำดับ

โดยที่

$$K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (2.11)$$

$$K_{a2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (2.12)$$

ซึ่งผลรวมของความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลเท่ากับ C_T และมีสมการดังนี้

$$C_T = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.11 2.12 และ 2.13 จะสามารถคำนวณความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกได้ว่า

$$[H_2CO_3] = \frac{C_T [H^+]^2}{([H^+]^2 + K_{a1} [H^+] + K_{a1} K_{a2})} \quad (2.14)$$

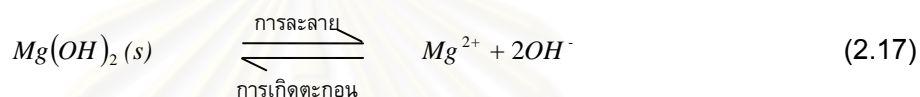
$$[HCO_3^-] = \frac{C_T K_{a1} [H^+]}{([H^+]^2 + K_{a1} [H^+] + K_{a1} K_{a2})} \quad (2.15)$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{C_T K_{a1} K_{a2}}{([H^+]^2 + K_{a1}[H^+] + K_{a1}K_{a2})} \quad (2.16)$$

จากสมการดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดจะเปลี่ยนแปลงตามค่า pH ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่า pH ของสารละลายจะส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายลดลง

2.3.2 สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมีดังนี้



โดยมีสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์คือ

$$K_{sp}(Mg(OH)_2) = [Mg^{2+}][OH^-]^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ $K_{sp}(Mg(OH)_2)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $10^{-10.7}$ ที่ $25^\circ C$ (Snoeyink และ Jenkins , 1987)

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

จากสมการที่ 2.18 สามารถคำนวณปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เกิดจากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้จาก

$$[Mg^{2+}] = \frac{K_{sp}(Mg(OH)_2)}{[OH^-]^2} \quad (2.19)$$

และจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของน้ำ (K_w)

$$K_w = [H^+][OH^-] \quad (2.20)$$

จากสมการ 2.19 และ 2.20 จะได้

$$[Mg^{2+}] = \frac{K_{sp}}{[OH^-]} \quad (2.21)$$

แปลงสมการที่ 2.21 ให้อยู่ในรูปลอการิธึมฟังก์ชันจะได้ว่า

$$\log[Mg^{2+}] = \log K_{sp} - 2 \log K_w - 2pH \quad (2.22)$$

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก. อุณหภูมิ

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

$$pK_{sp}(CaCO_3) = 0.01183T + 8.03 \quad (2.23)$$

$$pK_{sp}(Mg(OH)_2) = 0.0175T + 9.97 \quad (2.24)$$

เมื่อ $pK_{sp} = -\log[K_{sp}]$
 T คือ อุณหภูมิในหน่วย °C; (0 – 80 °C)

จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า pK_{sp} ของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือค่า K_{sp} มีค่าลดลงซึ่งหมายความว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ข. ความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในสารละลาย

ความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในสารละลายหรือค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) เป็นค่าที่ได้จากการวัดซึ่งหน่วยในการวัดค่าการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

สำหรับน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าการนำไฟฟ้าเป็นศูนย์แต่เมื่อน้ำนั้นมีเกลือละลายอยู่เกลือเหล่านี้จะแตกตัวเป็นประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ซึ่งประจุบวกและลบที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้สารละลายที่มีเกลือที่แตกตัวได้มีค่าการนำไฟฟ้า

(Electric Conductivity) ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำแต่ทั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าบอกให้ทราบถึงปริมาณเกลือที่ละลายโดยรวมอยู่ในสารละลายไม่สามารถแยกชนิดของเกลือได้

ความแรงของไอออน (Ionic Strength) เป็นค่าที่ใช้ประเมินระดับกิจกรรมหรือปฏิกิริยาทางเคมีของไอออนต่างๆในสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) \sum (m_i z_i^2) \quad (2.20)$$

เมื่อ I = ความแรงไอออน
 m_i = ความเข้มข้นของไอออน
 z_i = ประจุของไอออนในสารละลาย

สำหรับไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ z_i ในสารละลายที่มีค่าไอออนิกสเตตรงท์เท่ากับ I สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนในสารละลายกับแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไอออนในสารละลาย โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (activity coefficient) ได้จากสมการ Davies Equation ดังนี้ (Loewenthal และ Marais, 1976)

$$\log f_i = 0.5z_i^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.2I \right) \quad \text{เมื่อ } I < 0.5 \text{ โมลาร์} \quad (2.21)$$

จากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (สมการที่ 2.7) จะแสดงสมการโดยคำนึงถึงผลของค่าไอออนิกสเตตรงท์ได้ว่า

$$K_{sp}(\text{CaCO}_3) = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.22)$$

$$= f_D[\text{Ca}^{2+}] \times f_D[\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.23)$$

เมื่อ f_D คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุ ± 2

จัดรูปสมการที่ 2.23 ใหม่จะได้ว่า

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_{sp}(\text{CaCO}_3)}{f_D^2} = K'_{sp}(\text{CaCO}_3) \quad (2.24)$$

เมื่อ $K_{sp}(CaCO_3)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายที่รวมผลของไอออนิกสเตรงท์

ในทำนองเดียวกันจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (สมการที่ 2.19) จะสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยคำนึงถึงผลของค่าไอออนิกสเตรงท์ได้ว่า

$$K_{sp}(Mg(OH)_2) = [Mg^{2+}][OH^-] \quad (2.25)$$

$$= f_D [Mg^{2+}] \times f_m^2 [OH^-]^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ f_m คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุ ± 1

จัดรูปสมการที่ 2.26 ใหม่จะได้ว่า

$$[Mg^{2+}][OH^-] = \frac{K_{sp}(Mg(OH)_2)}{f_D f_m^2} = K'_{sp}(Mg(OH)_2) \quad (2.27)$$

เมื่อ $K'_{sp}(Mg(OH)_2)$ คือ ค่าคงที่สมดุลการละลายที่รวมผลของไอออนิกสเตรงท์

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_m และ f_D) จะมีค่าลดลงเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากสมการที่ 2.24 และ 2.27 จะได้ว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากขึ้น นั่นคือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายได้เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายยังมีผลต่อสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกโดยจะส่งผลให้ค่าคงที่ของสมดุลเปลี่ยนแปลงดังนี้

จากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 (สมการที่ 2.9 และ 2.10) จะสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยคำนึงถึงผลของค่าไอออนิกสเตรงท์ดังนี้

$$K_{a1} = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(H_2CO_3)} = \frac{f_m [H^+] \times f_m [HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (2.28)$$

$$K_{a2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{f_m [H^+] \times f_D [CO_3^{2-}]}{f_m [HCO_3^-]} \quad (2.29)$$

จัดรูปสมการที่ 2.28 และ 2.29 ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = \frac{K_{a1}}{f_m^2} = K'_{a1} \quad (2.30)$$

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{K_{a2}}{f_D} = K'_{a2} \quad (2.31)$$

เมื่อ K'_{a1} และ K'_{a2} คือค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่รวมผลของค่าไอออนิกสเตรงท์ไว้

เนื่องจากค่าไอออนิกสเตรงท์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_m และ f_D) มีค่าลดลงดังนั้นจากสมการที่ 2.30 และ 2.31 จะได้ว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น

2.4 การเกิดผลึก

กระบวนการเกิดผลึกเป็นกระบวนการเกิดอนุภาคของแข็งในสารละลายที่เป็นของเหลวโดยที่ตัวถูกละลายภายในของเหลวจะถูกทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่ามากกว่าค่าการละลายของตัวเอง ตัวถูกละลายก็จะรวมตัวเกิดเป็นอนุภาคของแข็งขึ้นมา กระบวนการเกิดผลึกจะประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอนคือการเกิดนิวเคลียสใหม่ (nucleation) และการเพิ่มขนาดของผลึก (crystal growth) โดยกระบวนการเกิดนิวเคลียสใหม่จะเกิดขึ้นก่อนจากนั้นกระบวนการเพิ่มขนาดของผลึกจึงเกิดตามมา ปัจจัยสำคัญในการผลึกตันทั้งสองขั้นตอนก็คือค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด

2.4.1 ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด

ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลายเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดที่ผลึกเกิดขึ้นกับสารละลายอิ่มตัวที่อยู่ในภาวะสมดุลกับผลึก สำหรับกระบวนการเกิดตะกอนสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดจะเกิดเนื่องจากการเติมสารตกตะกอน (precipitant) ลงไปซึ่งจะทำให้ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าที่สูงมากในเวลาอันรวดเร็ว

2.4.2 การเกิดนิวเคลียส

การเกิดนิวเคลียสอนุภาคของแข็งในสารละลายจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ก. การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิ (Primary nucleation)

การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิเป็นการเกิดอนุภาคใหม่ในสารละลายที่ไม่มีอนุภาคของแข็งนั้นอยู่และเป็นผลจากความอึดตัวยิ่งยวดเพียงอย่างเดียวซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ โฮโมจีเนียสนิวคลีเอชัน (homogeneous nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสภายใต้สภาวะที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดลอม เช่นผนังของภาชนะหรืออนุภาคของแข็งของสารชนิดอื่นอีกประเภทหนึ่งคือ เฮเทอโรจีเนียสนิวคลีเอชัน (heterogeneous nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสที่ได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดลอมซึ่งอาจจะมีผลเร่งให้อัตราการเกิดนิวเคลียสเร็วขึ้น

ข. การเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิ (Secondary nucleation)

การเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิจะเกิดจากผลึกเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยจะเกิดจากการชนกันระหว่างผลึกกับผลึกด้วยกันเองหรือระหว่างผลึกกับผนังของภาชนะหรือใบพัดซึ่งจะทำให้นิวเคลียสบนผิวของผลึกที่กำลังเพิ่มขนาดหลุดออกแล้วไปรวมตัวกันเป็นผลึกใหม่ขึ้นมา เรียกการเกิดนิวเคลียสแบบนี้ได้อีกอย่างว่า contact nucleation หรือ collision breeding

2.4.3 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเพิ่มขนาดของผลึก

ก. อัตราการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Rate)

อัตราการเกิดนิวเคลียสจะเป็นผลรวมของอัตราการเกิดนิวเคลียสที่เกิดจากการเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยทั้งสองแบบจะขึ้นอยู่กับค่าความอึดตัวยิ่งยวด การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิเป็นกระบวนการที่ต้องการค่าความอึดตัวยิ่งยวดสูงและอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลกับค่าความอึดตัวยิ่งยวด ซึ่งจะทำให้เมื่อความอึดตัวยิ่งยวดเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดนิวเคลียสจะเปลี่ยนไปอย่างมาก ส่วนนิวเคลียสแบบทุติยภูมิจะมีอิทธิพลที่เด่นชัดในช่วงที่ค่าความอึดตัวยิ่งยวดมีค่าต่ำ เนื่องจากอัตราการเกิดนิวเคลียสดังกล่าวเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความอึดตัวยิ่งยวด นอกจากนี้อัตราการเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมียังขึ้นกับพลังงานที่เกิดจากการชนกันของผลึกซึ่งจะขึ้นอยู่กับมวลของผลึกที่ชนกันและความเร็วรอบของใบพัด

ข. อัตราการเพิ่มขนาดของผลึก (Growth Rate)

การเพิ่มขนาดของผลึกเป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังพื้นผิวที่กำลังเพิ่มขนาดของผลึกโดยวิธีแพร่ผ่านของเหลวและเมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเคลื่อนที่ถึงผิวของผลึกจะเกิดการจัดเรียงตัวกับบนผิวของผลึกซึ่งทั้งสองขั้นตอนจะเกิดขึ้นในสารละลายที่มีความอิ่มตัวยังยวดเท่านั้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

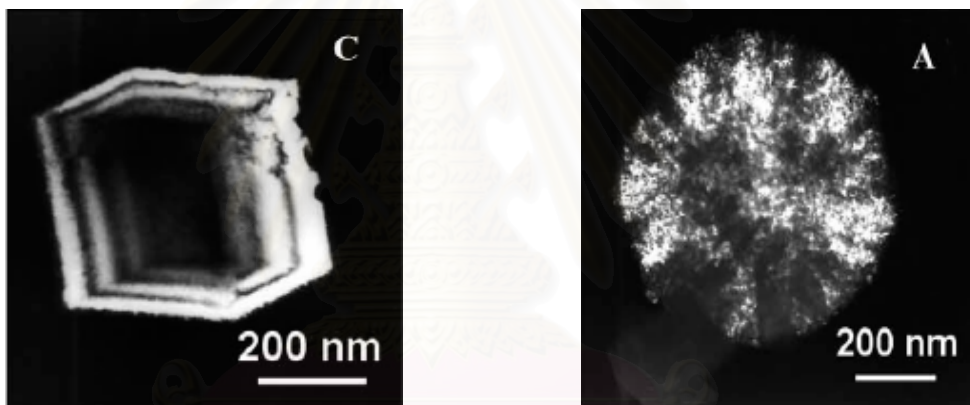
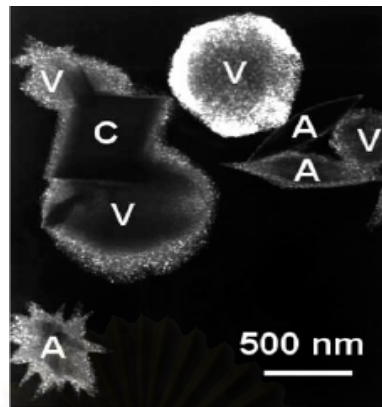
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีโครงสร้างและขนาดของผลึกแตกต่างกันตามสภาวะของการเกิดตะกอนโดยสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ก. ลักษณะของผลึก

โดยทั่วไปผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ

1. แคลไซต์ (calcite) ผลึกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหกหน้า หรือเรียกว่า rhombohedron
2. อะราโกไนท์ (aragonite) ผลึกเป็นแท่งปริซึมหรือแท่งพีรามิดคู่ หรือเรียกว่า orthorhombic มักจะเกิดการรวมตัวกันลักษณะคล้ายดอกกุหลาบ
3. วาเทอไรท์ (vaterite) ผลึกเป็นทรงกลม

ลักษณะของผลึกที่เกิดจะขึ้นอยู่กับสภาวะระหว่างการเกิดตะกอนได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือค่าความอิ่มตัวยังยวดของสารละลาย ค่า pH ของการเกิดตะกอน และอุณหภูมิ โดยปกติถ้าสารตั้งต้นมีค่าความเข้มข้นสูงหรือค่าความอิ่มตัวยังยวดสูงมักจะเกิดผลึกแบบวาเทอไรท์ ในขณะที่แคลไซต์จะเกิดในสารละลายที่สารตั้งต้นมีค่าความเข้มข้นหรือค่าความอิ่มตัวยังยวดต่ำกว่า (Tai และ Chen, 1995; Kabasci และ คณะ, 1996; Kitamura, 2001) นอกจากนี้ผลึกแบบวาเทอไรท์จะเกิดในสารละลายที่มีค่า pH สูง (pH > 9.5) ขณะที่ผลึกแบบแคลไซต์จะเกิดในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า (pH ~ 8.5) (Hostomsky และ Jones, 1991) ผลึกแบบแคลไซต์และวาเทอไรท์จะเกิดขึ้นในสารละลายที่มีอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) ในขณะที่ผลึกแบบอะราโกไนท์จะเกิดในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (ประมาณ 90°C) (Wray และ Daniels, 1957; Kabasci และ คณะ, 1996; Kobe และ คณะ, 2002) โดยผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งสามแบบแสดงดังรูปที่ 2.3



C : calcite , A : aragonite , V : vaterite

รูปที่ 2.3 รูปแบบของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอน

Maruscak และคณะ (1971) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง สารละลายแคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ ได้แก่

- ค่า pH โดยสภาวะทั่วไปอนุภาคในสารละลายจะมีประจุไฟฟ้าและมักมีประจุเป็นกลางโดยถูกล้อมรอบด้วยประจุตรงข้ามสัญลักษณ์ของประจุไฟฟ้าก็ขึ้นอยู่กับค่า pH ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตามแรงผลักระหว่างอนุภาคและการรวมตัวกัน
- ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือค่าความอึดตัวยิ่งยวดที่เพิ่มขึ้นตามหลักการของการเกิดตะกอนที่มี กระบวนการรวมตัวกันมีความสำคัญในการควบคุมการเพิ่มขนาดของผลึกได้ว่า ค่าความอึดตัวยิ่งยวดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้นและส่งผลให้ปริมาณอนุภาคในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคสูงขึ้นและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคมีขนาดใหญ่
- อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของตะกอนใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ดีและมีอัตราการรวมตัวกันมากขึ้น
- เวลา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคน้อยมาก ซึ่งให้เห็นว่ากระบวนการเพิ่มขนาดของอนุภาคจะรวดเร็วในช่วงต้นของกระบวนการเกิดตะกอน การที่ขนาดเพิ่มอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง แต่เวลาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความแข็งแรงของตะกอนโดยอนุภาคของตัวถูกละลายจะเข้าไปเกาะบนผิวของตะกอนซึ่งจะช่วยยึดอนุภาคที่รวมตัวกันอยู่อย่างหลวม ๆ ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

จากงานวิจัยของ Kabasci และคณะ (1996) และ Kitamura (2001) พบว่าเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงขึ้น ขนาดของอนุภาคจะเล็กลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงนั้นเมื่อมีปฏิกิริยาการเกิดตะกอนจะทำให้สารละลายมีค่าความอึดตัวยิ่งยวดที่สูงส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้น ส่งผลให้ในสารละลายมีอนุภาคเป็นจำนวนมากและความอึดตัวยิ่งยวดจะถูกใช้ไปในการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว เมื่อความอึดตัวยิ่งยวดในสารละลายมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการเพิ่มขนาดของอนุภาคลดลงอนุภาคจึงมีขนาดเล็ก

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโครงสร้างของผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนและขนาดของตะกอนเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยดังนี้

ก. ลักษณะของผลึก

ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนจะมีการรวมตัวของผลึกแบบปฐมภูมิ (Primary Crystal) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแผ่นบางๆ (hexagonal thin plate) หรือเรียกว่าบรูไซต์ (brucite) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 ± 3.5 nm รวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นทรงกลมเรียกว่าผลึกแบบทุติยภูมิ (secondary crystal) (Mullin และคณะ, 1989; Turek และ Gnot, 1995; Brakalov, 1985)

นอกจากนี้ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ โดยจะเกิดการดูดน้ำไว้บนผิวของผลึก (lyosorption) ซึ่งเมื่อผลึกเหล่านี้เกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ ภายในรูพรุนของผลึกที่เกาะตัวกันจะมีการเก็บน้ำไว้ ส่งผลให้ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความหนาแน่นต่ำและทำให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าต่ำ (Turek และ Gnot, 1995)

ข. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอน

Mullin และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 25°C พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ เวลา ความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้

- เวลา ขนาดของผลึกมีแนวโน้มเล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นภายในช่วงต้นของกระบวนการโดย 60-70% ของขนาดอนุภาคที่ลดลงจะเกิดภายในระยะเวลาครึ่งชั่วโมงแรกของการเกิดตะกอน นั่นคือการรวมตัวกันของอนุภาคเกิดอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและอาจมีขนาดใหญ่สุด และเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการแตกตัวของอนุภาค (deagglomeration) แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งขนาดของอนุภาคจะมีค่าคงที่เนื่องจากอัตราการรวมตัวกันและการแตกตัวของอนุภาคมีค่าเท่ากัน

- ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นขนาดเริ่มต้นของอนุภาคจะเพิ่มเนื่องจากการรวมตัวกันสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปขนาดของอนุภาคจะมีค่าลดลงจนคงที่ซึ่งขนาดสุดท้ายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ไชยพันธ์ุ แห่งทอง (2002) ได้ทำการศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะต่ำกว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการกำจัดแมกนีเซียมไอออนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดแคลเซียมไอออน เนื่องจากความสามารถในการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อทำการทดลองตกตะกอนพบว่าในกรณีของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะตกตะกอนได้รวดเร็วกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากการรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง แต่เนื่องจากตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีคุณสมบัติในการเกาะกลุ่มกันทำให้ไม่สามารถเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน ส่วนตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติในการเกาะกลุ่มกันแม้อนุภาคจะมีขนาดต่างกันก็จะตกตะกอนด้วยความเร็วที่เท่ากัน เนื่องจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นต่ำเพราะมีคุณสมบัติในการดูดจับน้ำ (lyosorption) โดยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ของไฮดรอกไซด์จะรวมตัวกับน้ำส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนต่ำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตกตะกอนร่วมพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว เนื่องจากในระบบของการเกิดตะกอนร่วมจะมีตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ด้วยกัน ไฮดรอกไซด์ไอออนบางส่วนจะถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) เกิดเป็นคาร์บอเนตไอออนส่งผลให้ระบบเสถียร ดังนั้นการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นแต่เมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมและการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีค่าเท่ากันแล้วพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายพบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่ามากกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว เนื่องจากในระบบของการเกิดตะกอนร่วมไฮดรอกไซด์ไอออนส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปในการ

เปลี่ยนกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ในสารละลายให้กลายเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนลดลงนั่นคือตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายเพิ่มขึ้นทำให้แมกนีเซียมไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทำการปรับ pH ของเกิดตะกอนร่วมและการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าเท่ากันพบว่าปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน

งานวิจัยของ Leentvaar และ Rebhun (1982) และ Elmaleh และคณะ (1996) เกี่ยวกับ การกำจัดอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยในน้ำเสียพบว่ากำจัดอนุภาคของแข็งจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเป็นเบสให้กับระบบ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้นโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ลงไปซึ่งตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคของแข็งทำให้มีการตกตะกอนที่เร็วขึ้นและแยกอนุภาคของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้เกิดกลไก sweep coagulation ทำให้อนุภาคของแข็งขนาดใหญ่รวมตัวกันง่ายขึ้น และยังเป็นสารเพิ่มน้ำหนัก (weighting agent) ให้กับอนุภาคที่รวมตัวกันโดยจะเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคที่รวมตัวกันทำให้การตกตะกอนเร็วขึ้น ในขณะที่ตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการดูดจับกับอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กเกิดกลไก adsorption coagulation เนื่องจากโครงสร้างของตะกอนจะประกอบไปด้วยพื้นที่ผิวที่สามารถดูดจับกับอนุภาคได้เป็นจำนวนมากและพื้นผิวของตะกอนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกจะดูดจับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าลบ ทำให้ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวช่วยในการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประสิทธิภาพ ประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีกล่าวในงานวิจัยของ Black และ Christman (1961) ซึ่งทำการศึกษาประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำน้ำอ่อน โดยพบว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ในขณะที่อนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกตลอดช่วง pH ที่ทำการศึกษา ในงานวิจัยของ Vuuren และคณะ (1967) ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดอนุภาคของแข็งในน้ำเสียโดยเทคนิค lime softening floatation โดยเติมสารละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือน้ำปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ลงไป ซึ่งน้ำปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตของแมกนีเซียม ($Mg(HCO_3)_2$) ในสารละลายเกิดเป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะช่วยดูดจับกับอนุภาคของแข็งที่อยู่ในสารละลายทำให้สามารถแยกอนุภาคของแข็งได้ง่ายขึ้น กระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นซึ่งจะมีลักษณะละเอียดและการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียวปกติจะใช้เวลานานในการตกตะกอนให้สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามตะกอน

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในระบบจะช่วยให้การกำจัดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตง่ายขึ้นเนื่องจากโครงสร้างพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมในการดูดจับกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายให้มาอยู่รวมกันทำให้สามารถแยกได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงผลกระทบจากการเกิดตะกอนร่วมของสารประกอบ 2 ชนิดที่มีผลให้คุณสมบัติของตะกอนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงไป เช่นจากงานวิจัยของ Sudmalis และ Sheikholeslami (2000) กล่าวถึงผลกระทบจากการเกิดตะกอนร่วมที่มีต่อความสามารถในการละลายของตะกอน ลักษณะโครงสร้างของตะกอนและความแข็งแรงของตะกอน จากการเกิดตะกอนร่วมของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งพบว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะแตกต่างไปจากการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแต่จะใกล้เคียงกับการเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟต จากภาพถ่ายของตะกอนร่วมพบว่าตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกยึดเหนี่ยวให้ติดกันโดยมีตะกอนแคลเซียมซัลเฟตเป็นตัวเชื่อมและยังทำให้ผลึกของตะกอนทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง เมื่อพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างตะกอนพบว่าผลึกที่รวมตัวกันของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากกว่าผลึกที่รวมตัวกันของแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งรวมตัวกันอยู่อย่างหลวมๆ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างของตะกอนร่วมจะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมซัลเฟตแต่จะน้อยลงเมื่อเทียบกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในทำนองเดียวกัน Chong และ Sheikholeslami (2001) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่มีต่อการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลให้สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด Analytical grade
2. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ของบริษัท UNIVAR ชนิด Analytical grade
3. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ของบริษัท UNIVAR ชนิด Analytical grade
4. โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮดรัส (Na_2CO_3) ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด Analytical grade
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของบริษัท MERCK ชนิด Analytical grade
6. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% โดยน้ำหนัก ของบริษัท MERCK ชนิด Analytical grade
7. น้ำ DI

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังปฏิกรณ์ (Reactor)

ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.2 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตรพร้อมติดบัพเฟิล 4 ใบทำจากอะคริลิกมีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร และของเหลวภายในถังจะถูกปั่นกวาดด้วยใบพัดแบบ 2 ใบ (dual-blade paddle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 เซนติเมตร ทำมาจากพอลิพรอพิลีนซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยมอเตอร์พร้อมปรับความเร็วรอบได้ ได้ถังปฏิกรณ์ทำการเจาะรูติดวาล์วเพื่อใช้ในการเปิดเก็บสารตัวอย่าง

2. หลอดตกตะกอน (Sedimentation tube)

เป็นหลอดรูปทรงกระบอกทำจากอะคริลิก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร ความสูง 100 เซนติเมตรพร้อมติดสเกลวัดระดับ รูปแบบของหลอดตกตะกอนแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลอดตกตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

3. Atomic Absorption Spectrophotometer ของบริษัท Instrumentation laboratory Inc. รุ่น IL 551
4. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ของ Coulter รุ่น LS 230
5. pH meter ของ HANNA รุ่น HI 8424
6. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
7. กล้องจุลทรรศน์ ของ OLYMPUS รุ่น BH-2
8. เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง ของ OHAUS
9. กระดาษกรอง WHATMAN เบอร์ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
10. นาฬิกาจับเวลา (ความละเอียด 0.01 วินาที)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.1.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีเตรียมสารละลายจากภาคผนวก ก) หลังจากนั้นจะเริ่มทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอน โดยนำสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตที่เตรียมไว้ผสมกันในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้ง pH meter และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ซึ่งรูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบการทดลองกระบวนการเกิดตะกอน

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH และ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายและเก็บตัวอย่างสารจำนวน 10 มิลลิลิตร ที่เวลา 1 5 10 20 และ 30 นาทีตามลำดับ จากนั้นจะทำการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 11.1 (ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อทำการควบคุมค่า pH ของการเกิดตะกอนแต่ละการทดลองให้มีค่าเท่ากัน) โดยหยดสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ลงไป (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก) จนสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 11.1 จึงหยุดเติมนั้นจะทำการวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายและเก็บตัวอย่างต่อที่เวลา 31 35 40 50 60 และ 90 นาทีตามลำดับ สารตัวอย่างที่เก็บได้ทั้งหมดจะถูกนำไปกรองทันทีด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 ซึ่งสารละลายที่กรองได้จะถูกเก็บไว้ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่เติมสารละลายของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 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 จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาขนาดของตะกอนด้วย

เครื่องวัดอนุภาค (Particle Size Analyzer) (วิธีการวิเคราะห์หัตถ์ในภาคผนวก ข)

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่างและเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้ว นำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ จากนั้น จะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยจะวัดความสูงของชั้นตะกอนทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่เริ่มทำการตกตะกอนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนถึงที่เวลา 12 ชั่วโมงโดยทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนทุกๆครึ่งชั่วโมง นำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน

3.2.1.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก) หลังจากนั้นจะทดลองกระบวนการเกิดตะกอนโดยนำสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ผสมกันในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้ง pH meter และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของการเกิดตะกอนและเก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ซึ่งวิธีการทดลองดังกล่าวจะทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เริ่มต้นทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนอีกครั้งหนึ่ง โดยสารตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยวิธีการวิเคราะห์จะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มต้นทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่างและเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้วนำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ จากนั้นจะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งวิธีการวัดจะกระทำเหมือนกระบวนการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน

3.2.2 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก) กระบวนการเกิดตะกอน

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

เริ่มทำการจับเวลาโดยจะทำการวัดค่า pH และค่าการนำไฟฟ้าของการเกิดตะกอนและเก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เหลืออยู่ในสารละลายซึ่งวิธีการทดลองดังกล่าวจะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

เริ่มต้นทำการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนอีกครั้ง โดยสารตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะกระทำเหมือนในกรณีกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

ข) กระบวนการตกตะกอน

เริ่มต้นทำการทดลองเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนเพียงแต่จะไม่ทำการเก็บสารตัวอย่างและเมื่อทำการกวนจนถึงนาทีที่ 60 จะหยุดทำการกวนแล้วนำสารละลายในถังปฏิกรณ์ไปเทลงในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นจะทำการวัดความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งวิธีการวัดจะกระทำเหมือนกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อศึกษาความเร็วของการตกตะกอน

3.2.3 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาสำหรับแต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ คือ 4% 6% และ 8% (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) ส่วนความเข้มข้นของแคลเซียมในสารตั้งต้นกำหนดที่ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ข. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาสำหรับแต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ คือ 4% 6% และ 8% (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) ส่วนความเข้มข้นของแมกนีเซียมในสารตั้งต้นกำหนดที่ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.4 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นต่าง ๆ

ก. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตโดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ คือ 6% (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมในสารตั้งต้นมีค่า 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ข. กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นในกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ คือ 6% (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่า 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และทำการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบของการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

3.2.5 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดตะกอน และตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยในการทดลองเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา (วิธีการเตรียมสารละลายดูในภาคผนวก ก) และกำหนดให้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ คือ 4% 6% และ 8% (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

3.2.6 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดตะกอน และตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยจะทำการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6% โดยควบคุมความเข้มข้นรวมของระบบไว้ที่ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันคือ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 และทำการปั่นกววนด้วยความเร็วรอบของการกววนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ซึ่งความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่มีอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่าง ๆ กันแสดงได้ตามตารางที่ 3.1 (วิธีการเตรียมสารดูในภาคผนวก ก) โดยวิธีทำการทดลองจะทำเหมือนกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่างกัน

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การศึกษาอิทธิพลของโซเดียมคลอไรด์ต่อการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม โดยทั้งสามส่วนจะทำการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองตามสภาวะต่างๆที่กำหนดไว้

4.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการทดลองตามสภาวะที่กำหนดต่างๆสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่หนึ่งทำการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยนำสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา ส่วนที่สองทำการศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ในสภาวะที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นแตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์กำหนดเป็น 6% แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอนซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

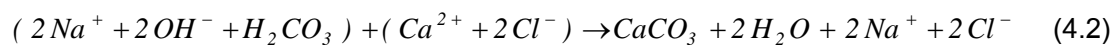
4.1.1 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

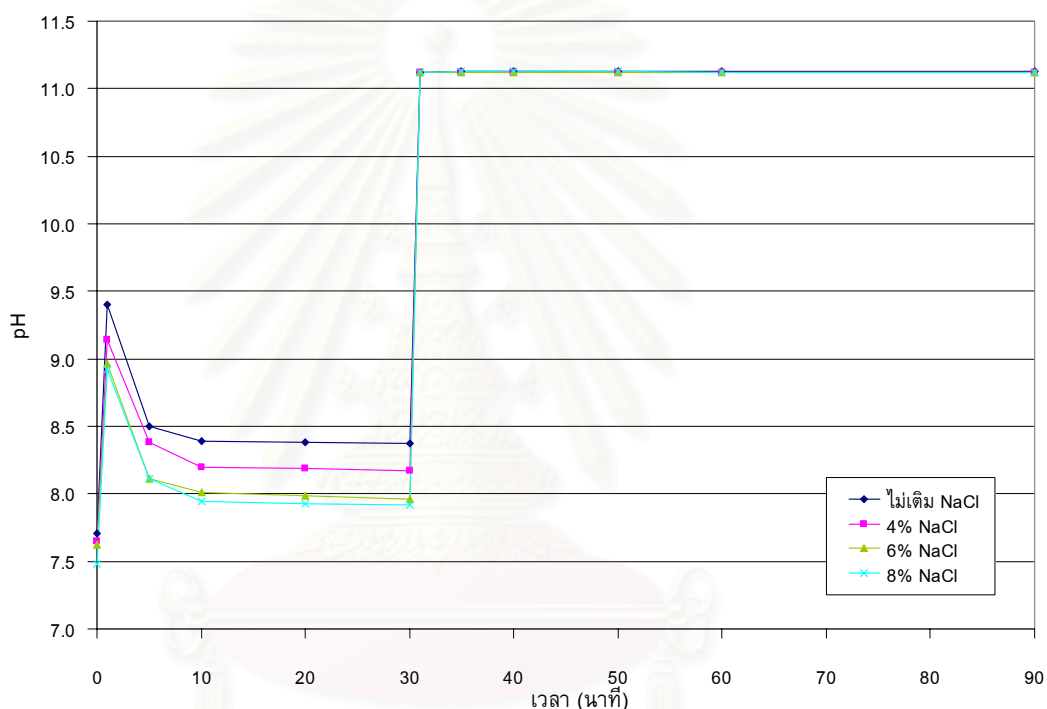
จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าก่อนเริ่มทำปฏิกิริยานั้นสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์จะมีค่า pH เป็นกลางเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปพบว่าค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถอธิบายได้จากการแตกตัวของ Na_2CO_3 ในน้ำดังสมการ (Chibowski และคณะ, 2003)



เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดขึ้นในระบบส่งผลให้ค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนในระบบ



จากสมการที่ 4.2 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นในระบบส่งผลให้ค่า pH ในระบบลดลงเนื่องจากเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นประมาณเวลาที่ 10 ค่า pH จะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลดังแสดงจากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

นอกจากนี้ค่า pH ที่สมดุลของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะพิจารณาได้จากสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกในระบบ ซึ่งมีสมการดังนี้ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)



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

$$\text{โดย } K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (4.5)$$

$$K_{a2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (4.6)$$

อย่างไรก็ตามสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูง ค่าคงที่สมดุลจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (activity coefficient, f_i) ดังสมการ (Loewenthal และ Marais, 1976)

$$(x) = f_i [x] \quad (4.7)$$

เมื่อ (x) คือ ค่า active concentration ของไอออน i
 $[x]$ คือ ค่า molar concentration ของไอออน i
 f_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออน i

$$\log f_i = -0.5 Z^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.2 I \right) \quad \text{เมื่อ } I < 0.5 \text{ โมลาร์} \quad (4.8)$$

เมื่อ I คือ ค่าไอออนิกสเตรงท์ (โมลาร์)
 Z คือ ประจุไอออนในสารละลาย

ค่าไอออนิกสเตรงท์ (I) หรือความแรงของไอออนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปฏิกิริยาทางเคมีของไอออนต่างๆในสารละลายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้มากขึ้น ค่าไอออนิกสเตรงท์ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ดังนั้นจากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 สามารถเขียนสมการใหม่โดยคำนึงถึงผลของค่าไอออนิกสเตรงท์ได้ดังนี้

$$K_{a1} = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = \frac{f_m [H^+] \times f_m [HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \quad (4.9)$$

$$K_{a2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{f_m [H^+] \times f_d [CO_3^{2-}]}{f_m [HCO_3^-]} \quad (4.10)$$

เมื่อ f_m, f_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ 1 และ 2 จักรูปสมการ 4.8 และ 4.9 ใหม่จะได้

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = \frac{K_{a1}}{f_m^2} = K'_{a1} \quad (4.11)$$

$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{K_{a2}}{f_d} = K'_{a2} \quad (4.12)$$

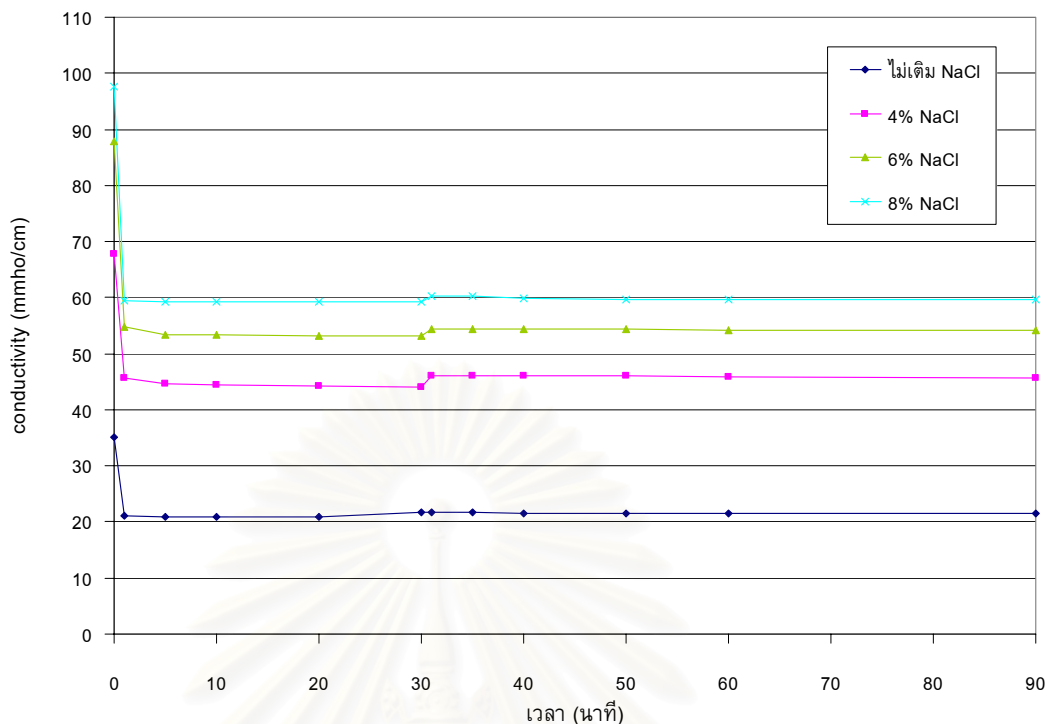
เมื่อ K'_{a1}, K'_{a2} คือ ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 (รวมผลของไอออนิกสเตรงท์)

เนื่องจากค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีมีค่าลดลงดังนั้นจากสมการที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกมีการแตกตัวให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายมีค่าต่ำลงดังนั้นจากผลการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันตามรูปที่ 4.1 จึงพบว่าค่า pH ของสารละลายต่ำลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์หรือค่าไอออนิกสเตรงท์นั่นเอง

ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (รูปที่ 4.2) พบว่าเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งไม่ละลายน้ำส่งผลให้ปริมาณไอออนในสารละลายลดลง

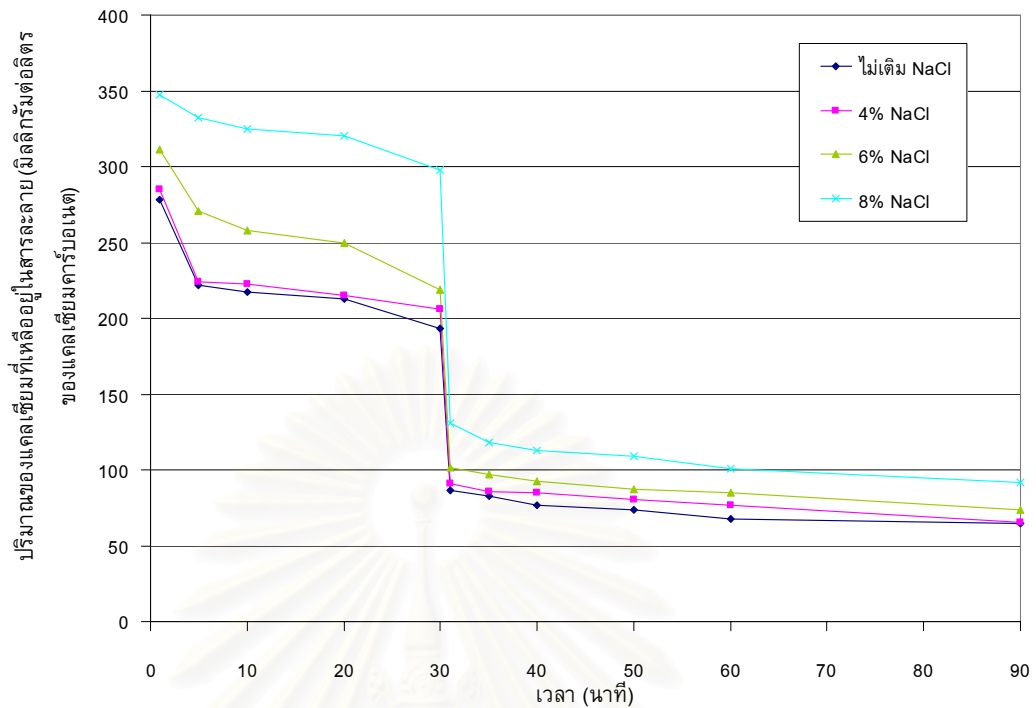
และเมื่อพิจารณาระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ปริมาณไอออนในสารละลายมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ค่า conductivity มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.2 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

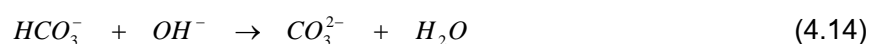
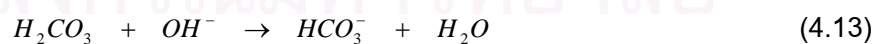
ค. ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน พบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีปริมาณของแคลเซียมไอออนลดลงอย่างรวดเร็ว (จาก 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 200 – 300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ประมาณนาที่ที่ 10 จนกระทั่งมีการปรับค่า pH ของสารละลายในนาที่ที่ 30 ปริมาณของแคลเซียมจะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งผลแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

จากรูป 4.3 จะพบว่าในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาปริมาณของแคลเซียมไอออนในสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในการเกิดตะกอนระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้เท่ากับ 11.1 โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีปริมาณลดลงต่อไปอีก เนื่องจากการเติมไฮดรอกไซด์ไอออนลงไปทำให้ระบบสมดุลเดิมของระบบโดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) ที่อยู่ในสารละลายเกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ตามสมการที่ 4.13 และ 4.14 (Chibowski และคณะ, 2003)



ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่ามากขึ้นทำให้ระบบเสียสมดุลและต้องปรับให้เข้าสู่สมดุลใหม่ในทิศทางที่ลดปริมาณคาร์บอเนตไอออนลงดังสมการที่

4.15 นั่นคือจะเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายลดลง



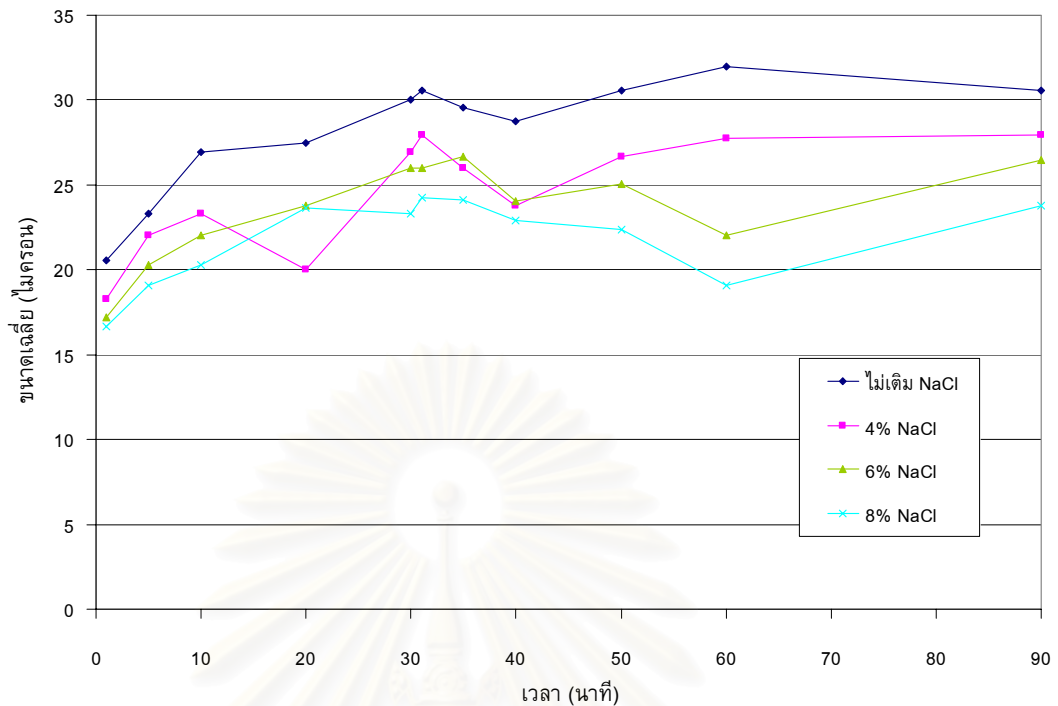
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนต่างกันจะพบว่า ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารตั้งต้นจะทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลงและส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าลดลง (จากหัวข้อ ก) ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตตามความสัมพันธ์

$$[\text{Ca}^{2+}] = \frac{K_{sp}(\text{CaCO}_3)}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (4.16)$$

จึงได้ส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าสูงขึ้น

ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

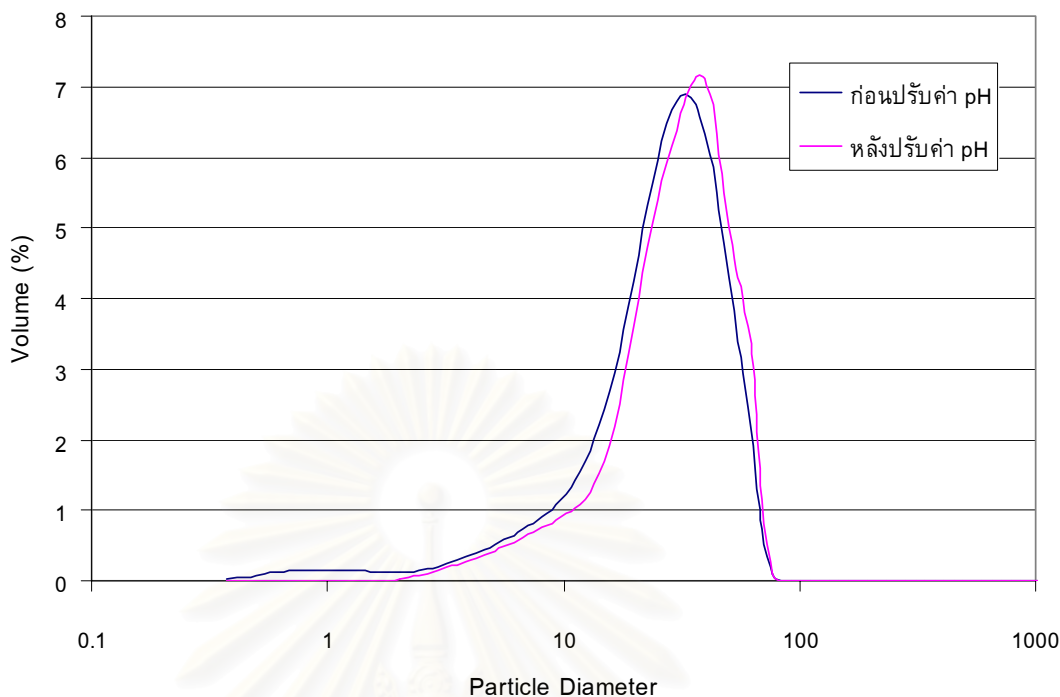
จากการนำตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดดังนี้คือ ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงเริ่มต้นจะมีขนาดเล็กจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า crystal growth และการรวมตัวกันของผลึก (agglomeration) ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเกิดตะกอนประกอบด้วย 2 ขั้นตอนพื้นฐานคือ nucleation และ crystal growth ซึ่งกระบวนการ nucleation จะเกิดขึ้นก่อนจากนั้นจึงจะเกิดกระบวนการเพิ่มขนาดของตะกอน (crystal growth) โดยทั่วไปอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดตะกอนหรือผลึกมักจะเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Mullin, 1991) หลังจากนั้นอนุภาคของตะกอนจะมีขนาดคงที่เนื่องจากเกิดสภาวะสมดุลกันระหว่างการรวมตัวกันของผลึกและการแตกตัวของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

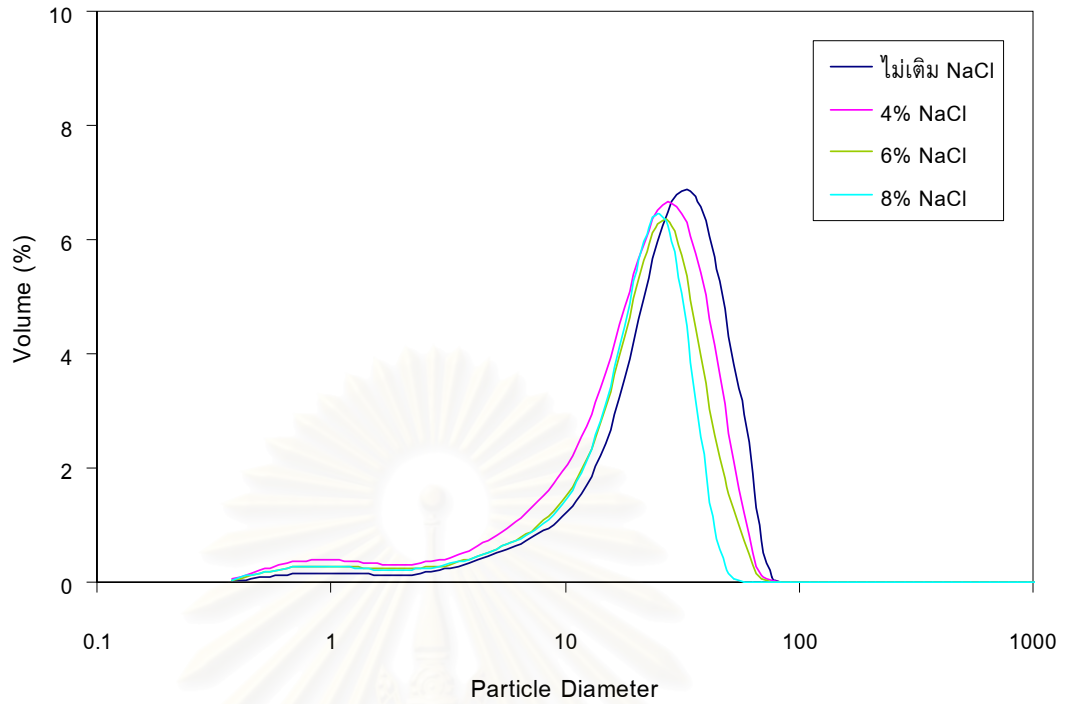
หลังจากนาที่ที่ 30 เมื่อทำการปรับค่า pH ให้สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้การเพิ่มค่า pH ส่งผลให้ความแรงของประจุไฟฟ้าของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นประจุลบลดลง (Black และ Chrisman, 1961) ทำให้การรวมตัวกันของอนุภาคเป็นไปได้ง่ายขึ้นส่งผลให้อนุภาคเล็กๆ มีการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ นอกจากนี้การปรับค่า pH ให้สูงขึ้นส่งผลต่อค่าการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตในทิศทางที่ทำให้เกิดตะกอนมากขึ้นอีกด้วย สามารถแสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคก่อนและหลังการปรับค่า pH โดยในที่นี้กำหนดให้การกระจายตัวของอนุภาคก่อนการปรับค่า pH คือ นาที่ที่ 30 และการกระจายตัวของอนุภาคหลังการปรับค่า pH คือ นาที่ที่ 60 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

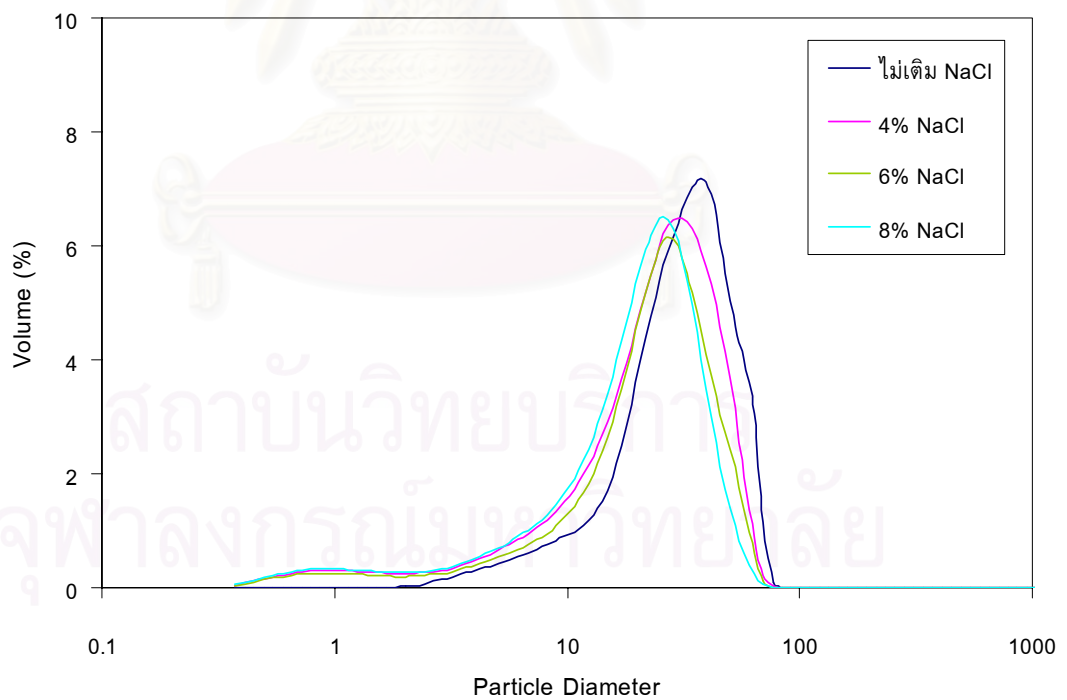


รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ไม่เติม NaCl) ก่อนและหลังปรับค่า pH

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ต่างกัน พบว่าขนาดของตะกอนมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และหากพิจารณารูปการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ กันดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่ความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์มีค่าสูงขึ้นนั้นตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นจากรูปแสดงการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์สูงจะไม่มีพื้นที่กราฟการกระจายตัวในช่วงอนุภาคขนาดใหญ่ อธิบายได้ว่าที่ความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์สูงจะส่งผลให้การรวมตัวกันของผลึกลดน้อยลงเนื่องจากประจุของ Na^+ และ Cl^- ที่เกิดจากการแตกตัวของไฮดรอกไซด์จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ca^{2+} และ CO_3^{2-} (Murray, 2001) ทำให้การเกิดตะกอนน้อยลงและเมื่อตะกอนมีปริมาณน้อยการชนกันของอนุภาคเพื่อเกิดเป็นการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก



ก่อนปรับค่า pH (ที่เวลา 30 นาที)

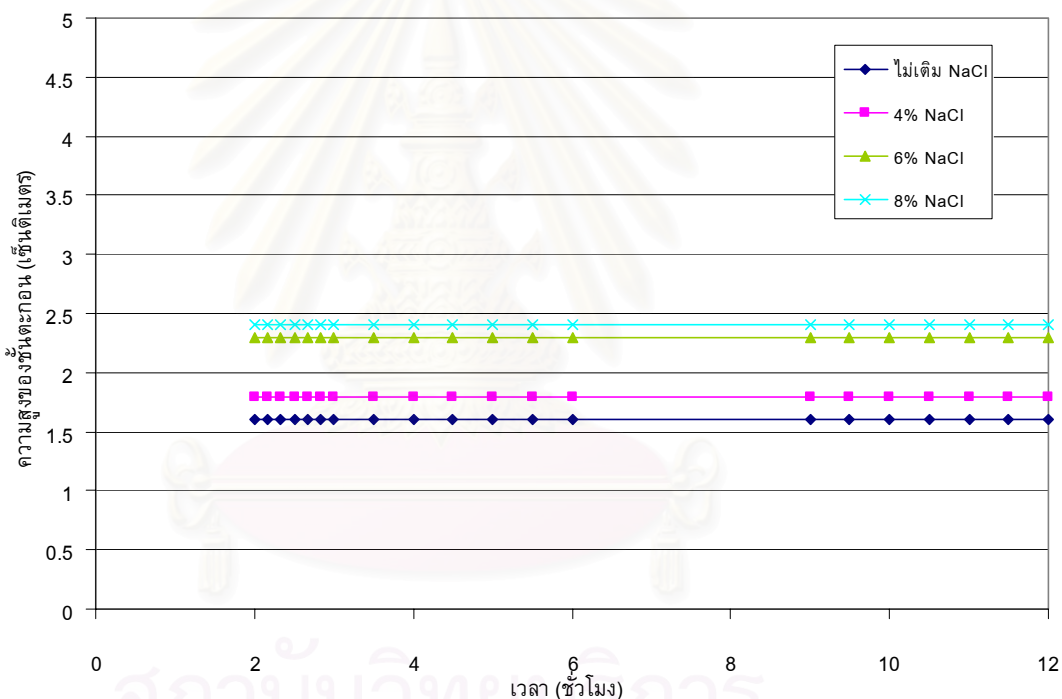


หลังปรับค่า pH (ที่เวลา 60 นาที)

รูปที่ 4.6 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนและหลังปรับค่า pH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมคลอไรด์

จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้เพื่อทำการวัดความเร็วของการตกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนแล้วทำการวัดความสูงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนกับของเหลวใสจะได้ว่ากระบวนการตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจะค่อนข้างเร็ว เนื่องจากผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตมีการรวมตัวขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงจึงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าสูง ตลอดช่วงแรกของการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถสังเกตชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายขนาดของตะกอนค่อนข้างกว้างทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตกตะกอนได้เร็วส่วนอนุภาคขนาดเล็กต้องใช้เวลามากกว่าในการตกตะกอนดังนั้นจึงบันทึกผลได้เมื่อการตกตะกอนสมบูรณ์ผลแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน (ณ เวลาของการตกตะกอนสมบูรณ์)

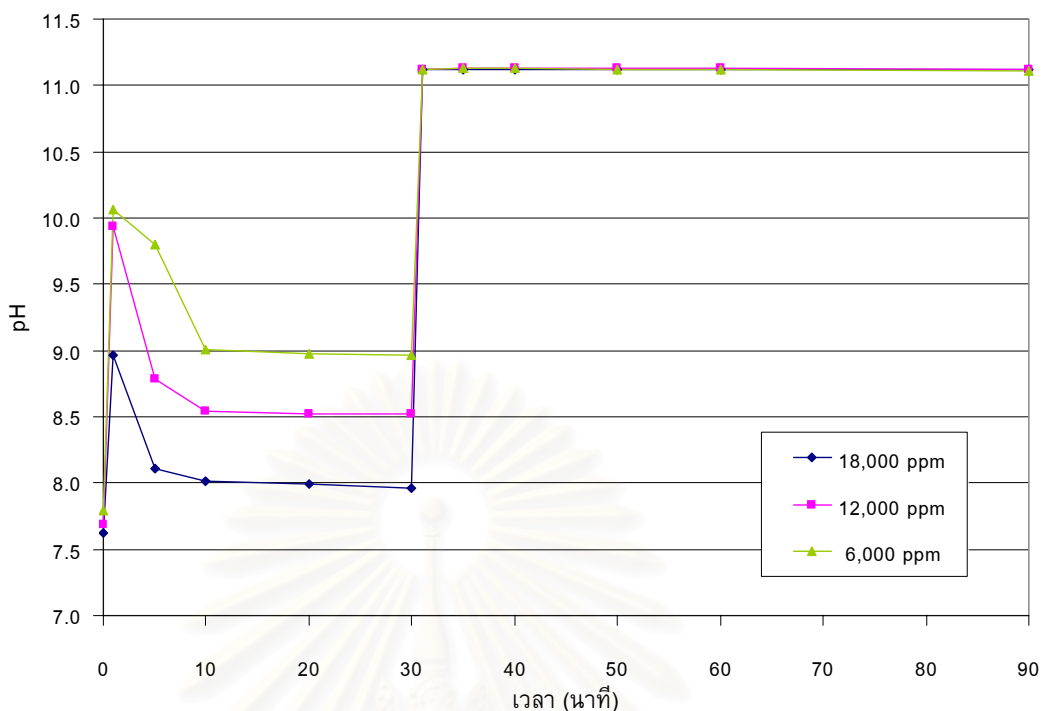
แม้ว่าในกรณีที่เพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ก็ยังคงพบว่าความเร็วของการตกตะกอนในกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงและไม่สามารถสังเกตชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงการตกตะกอนที่ระยะเวลาของการตกตะกอนสมบูรณ์ของการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันจะได้ว่าที่ระยะเวลา 120 นาทีการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ไม่ทำ

การเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะตกตะกอนโดยสมบูรณ์ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 1.6 เซ็นติเมตร การตกตะกอนเมื่อเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4%, 6% และ 8% จะตกตะกอนโดยสมบูรณ์ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 1.8 เซ็นติเมตร, 2.3 เซ็นติเมตร และ 2.4 เซ็นติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นขนาดของตะกอนจะมีขนาดเล็กลงตามอธิบายในหัวข้อ 4.1.1ง ดังนั้นตะกอนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจึงค่อนข้างลอยตัวในการตกตะกอนประกอบกับที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเป็นสภาวะที่มีประจุไฟฟ้าสูงดังนั้นแรงกระทำระหว่างอนุภาคจะค่อนข้างสูง ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่ออยู่ในสภาวะที่ส่งผลให้เกิดการรวมตัวน้อย (Maruscak และคณะ, 1971) จึงค่อนข้างกระจายตัวส่งผลให้ระดับความสูงของชั้นตะกอนมีค่ามาก เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกอนของทั้ง 4 กรณีที่นอนกันอยู่ในหลอดตกตะกอนจะไม่เห็นถึงความแตกต่างมากนักจากระดับความสูงของตะกอนที่ทำการวัดได้แม้จะมีค่าแตกต่างกันแต่ลักษณะการนอนกันของตะกอนที่ไม่ทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะค่อนข้างอัดตัวแน่นกว่าในกรณีอื่นๆ และกรณีที่มีการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 8% จะสังเกตเห็นว่าลักษณะตะกอนค่อนข้างลอยตัวดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบในเชิงปริมาณของตะกอนจึงไม่สามารถเห็นได้ชัดเจนถึงปริมาณตะกอนที่แตกต่างกัน

4.1.2 การศึกษาผลของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%

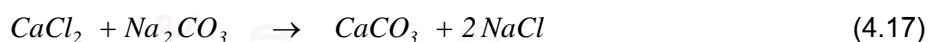
ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า pH จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงใน 4.1.1ก คือก่อนเริ่มทำปฏิกิริยานั้นสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์จะมีค่า pH เป็นกลางเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไปพบว่าค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและค่า pH จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งแสดงได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า pH ของสารละลายจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นพิจารณาจากปฏิกิริยาเคมีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต



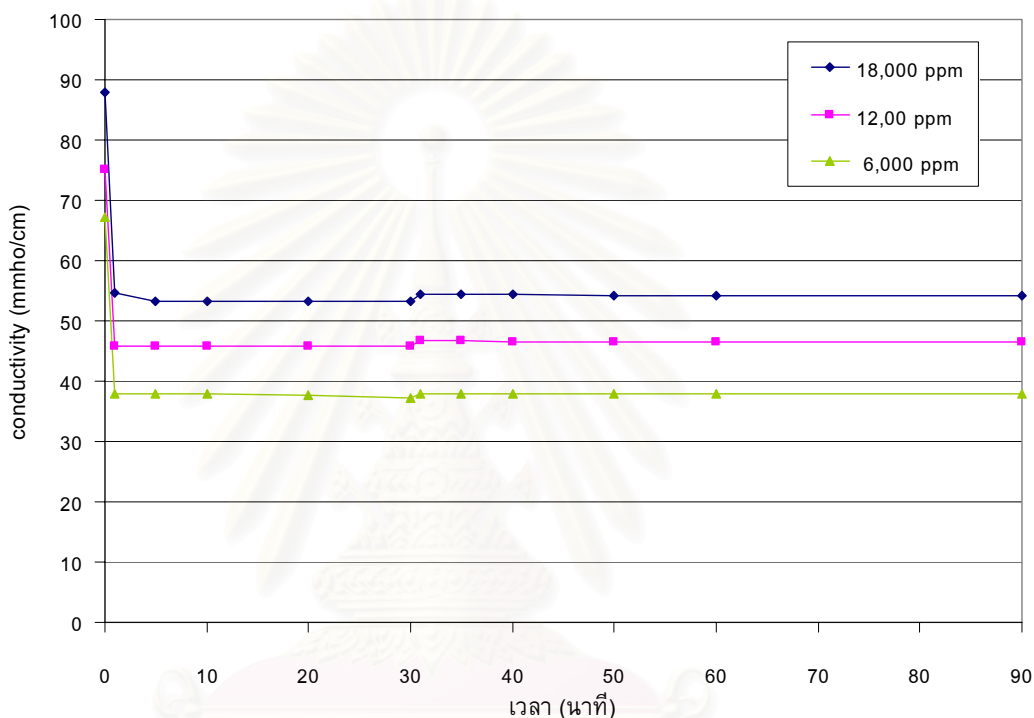
ดังนั้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลต่อค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตลักษณะเดียวกับกรณี 4.1.1ก นั่นคือค่าไอออนิกสเตรงท์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอริกมีการแตกตัวให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากขึ้น ค่า pH ของสารละลายจึงต่ำลง

ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี

ระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตเช่นเดียวกับกรณี 4.1.1 ข เนื่องจากตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นไม่ละลายน้ำส่งผลให้ปริมาณไอออนในสารละลายลดลง

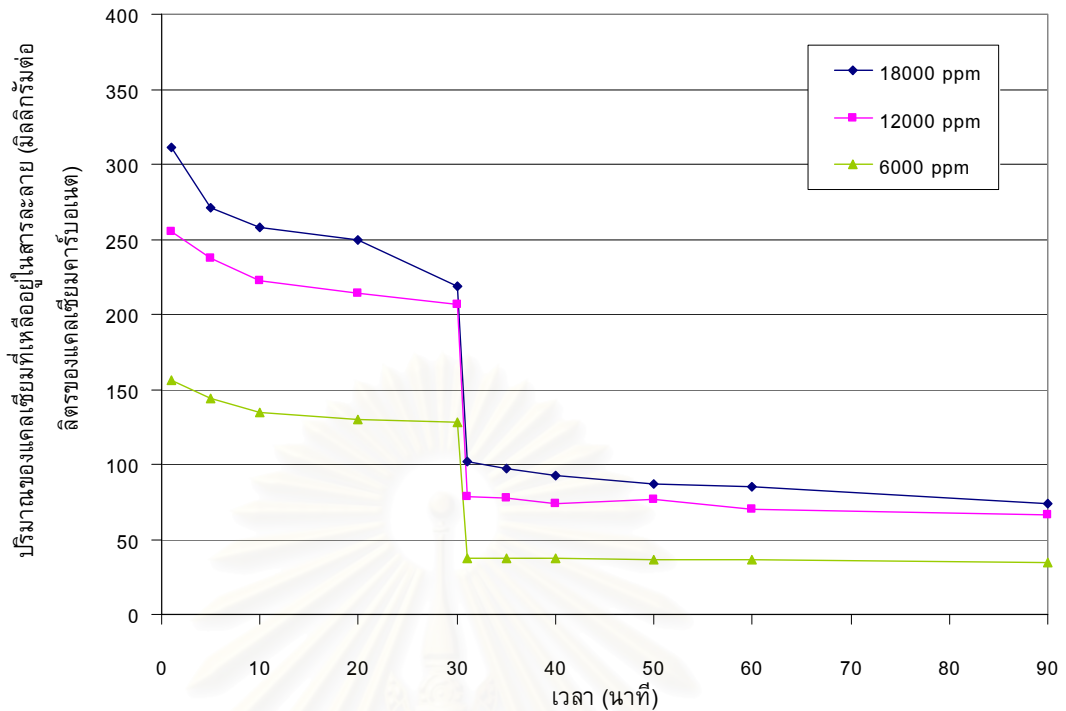
และเมื่อพิจารณาระบบที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่าเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นสูงขึ้นส่งผลให้ค่า conductivity มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

ค. ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

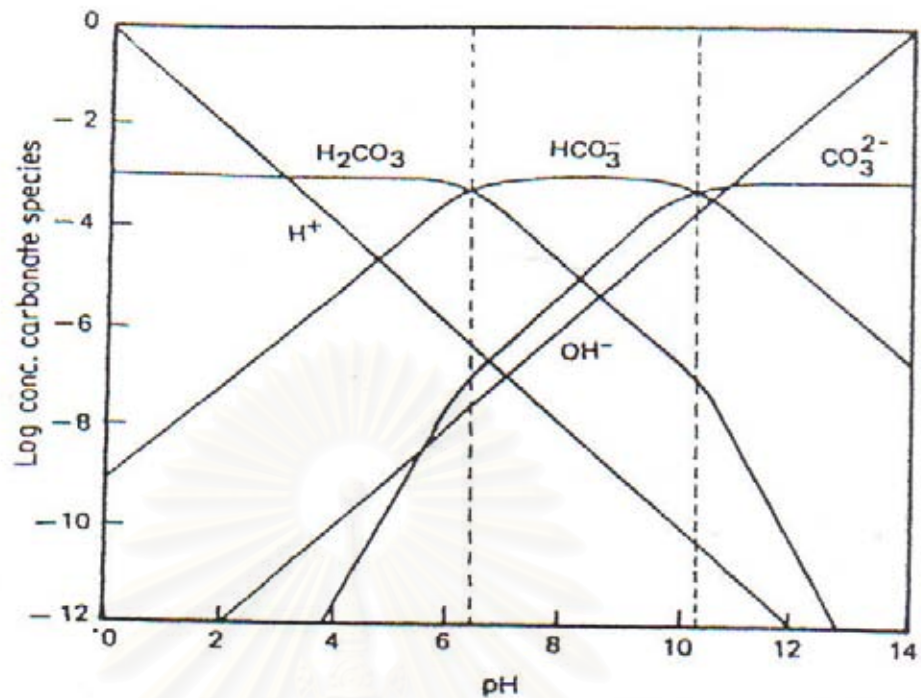
จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีปริมาณแคลเซียมไอออนลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับกรณี 4.1.1 ค เนื่องจากมีการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารตั้งต้นเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ตามสมการที่ 4.16 ซึ่งแนวโน้มของปริมาณแคลเซียมไอออนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังรูป 4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกันพบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะส่งผลให้

- ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลงส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าลดลงด้วยพิจารณาจากสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกในระบบตามหัวข้อ 4.1.1ก (แสดงในรูปที่ 4.11) ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายสามารถพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.16 ก็จะได้ว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH (Loewenthal และ Marais, 1976)

- ค่าไอออนิกสเตรงท์มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (K_{sp}) มีค่าสูงขึ้นตามสมการ 4.19 จึงส่งผลให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าสูงขึ้น

$$K_{sp}(\text{CaCO}_3) = (\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-}) = f_d [\text{Ca}^{2+}] \times f_d [\text{CO}_3^{2-}] \quad (4.18)$$

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_{sp}(\text{CaCO}_3)}{f_d^2} = K'_{sp}(\text{CaCO}_3) \quad (4.19)$$

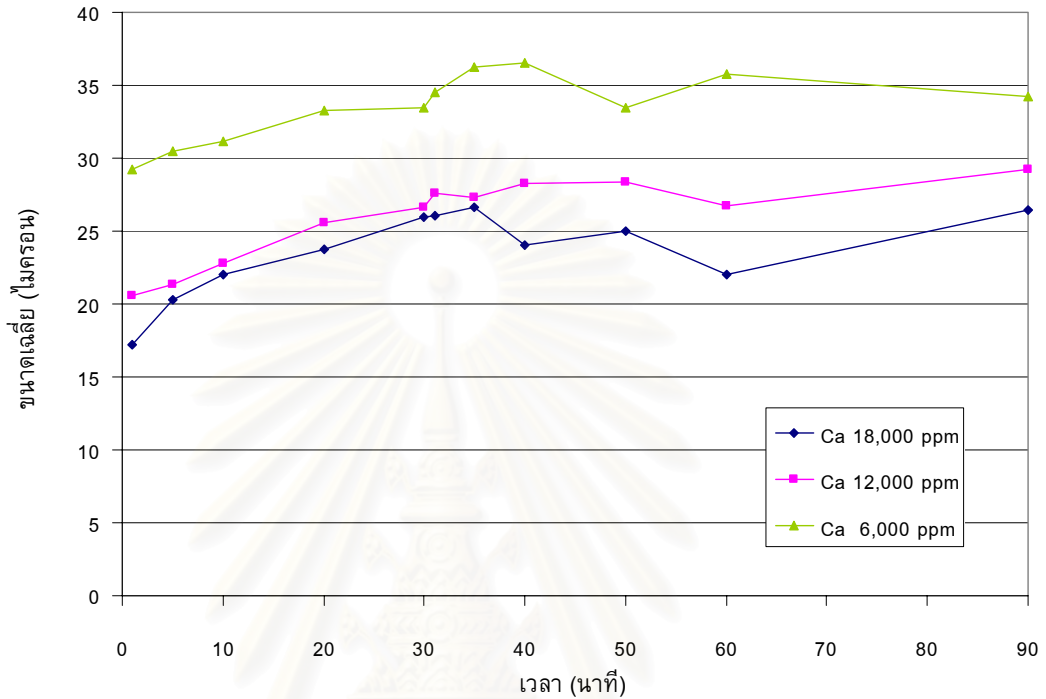
เมื่อ f_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ 2

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

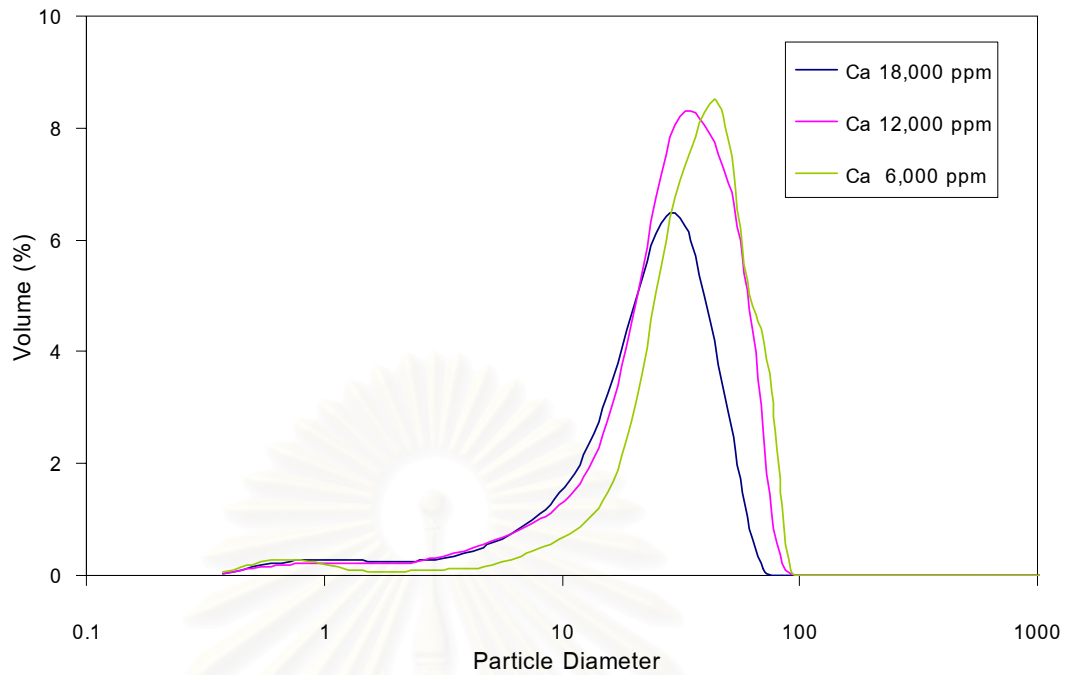
ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

ในกรณีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคตามเวลาจะใกล้เคียงกัน คือช่วงแรกตะกอนมีขนาดเล็กหลังจากนั้นขนาดของตะกอนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากมีการรวมตัวกันของอนุภาคตะกอนแสดงดังรูป 4.12

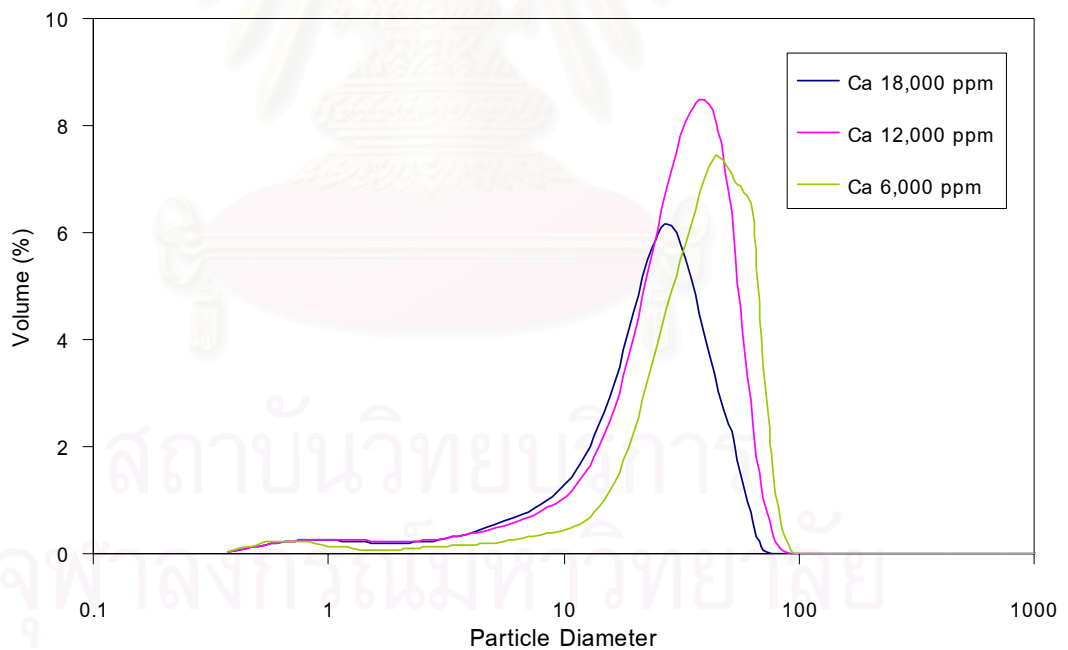
เมื่อพิจารณาขนาดของตะกอนที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกันพบว่าขนาดของตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)



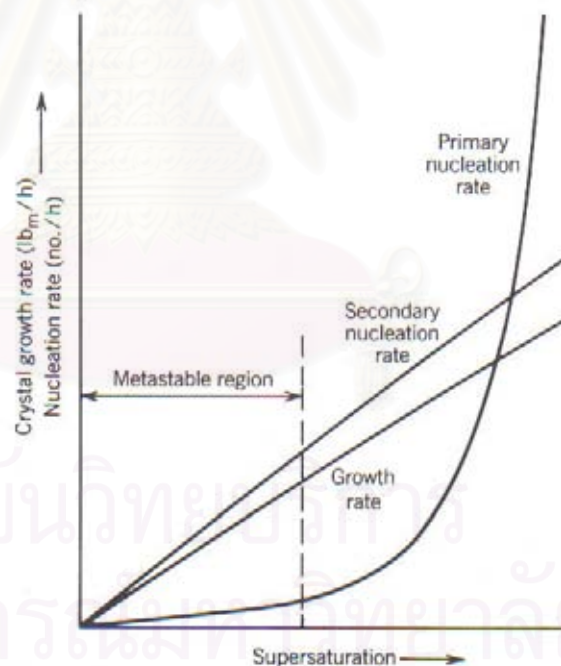
ก่อนปรับค่า pH (ที่เวลา 30 นาที)



หลังปรับค่า pH (ที่เวลา 60 นาที)

รูปที่ 4.13 การกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายขนาดของอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมากกว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงนั้นจะมีค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงกว่าดังนั้นส่งผลให้อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงขึ้นในสารละลายจึงมีอนุภาคเล็กๆเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากพิจารณาจากรูปที่ 4.14 จะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก จากรูปจะเห็นว่าอัตราการเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิซึ่งเป็นการเกิดอนุภาคใหม่ในสารละลายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงและอัตราการเกิดนิวเคลียสเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลกับค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดซึ่งทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงขึ้นดังนั้นที่ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงจะเกิดผลึกชนิดนี้อยู่มาก นอกจากนี้อัตราการเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิซึ่งเป็นนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจากผลึกเดิมที่มีอยู่แล้วแต่มีการชนกันระหว่างผลึกหรือภาชนะทำให้นิวเคลียสบนผิวของผลึกที่กำลังเพิ่มขนาดหลุดออกและมีการรวมตัวเป็นผลึกใหม่จะเห็นได้ว่ามีผลมากตั้งแต่ช่วงที่ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดมีค่าต่ำเนื่องจากอัตราการเกิดนิวเคลียสเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด

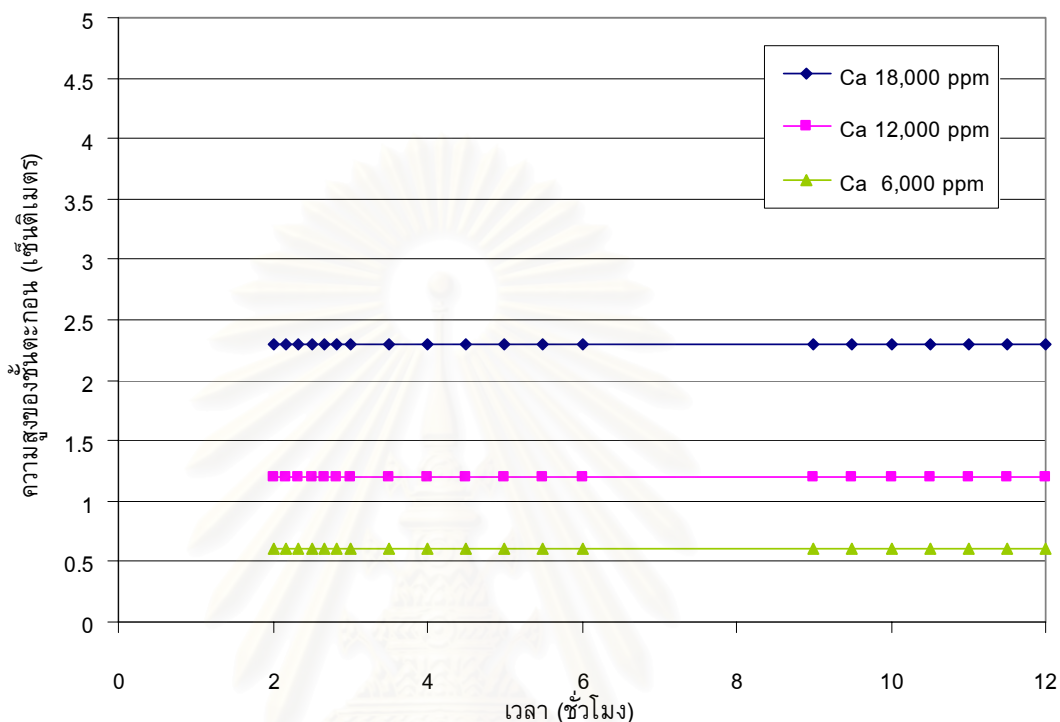


รูปที่ 4.14 ผลของค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเพิ่มขนาดของผลึก (Rousseau, 1987)

ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดต่ำจะส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขนาดของผลึกมากกว่าอัตราการเกิดนิวเคลียสใหม่ ดังนั้นสภาวะที่ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดต่ำส่งผลให้ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่กว่าที่สภาวะที่มีค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดสูง

จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนในกรณีของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันเมื่อทำการวัดความสูงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนกับของเหลวใสจะได้ผลดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันเมื่อการตกตะกอนสมบูรณ์ (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

ตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันจะเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี 4.1.1จ นั่นคือการกระจายขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างกว้างและไม่จับกลุ่มกัน ทำให้ไม่สามารถเห็นชั้นรอยต่อระหว่างเฟสได้ชัดเจนดังนั้นการเปรียบเทียบความเร็วของการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กันจึงทำได้ยาก จากรูป 4.15 แสดงการตกตะกอนที่ระยะเวลาของการตกตะกอนสมบูรณ์ของการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่าที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นสูงปฏิกิริยาการเกิดตะกอนมากกว่าดังนั้นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจึงเกิดขึ้นมากดังนั้นเมื่อทำการตกตะกอนโดยสมบูรณ์ชั้นตะกอนจึงมีระดับสูงกว่าที่ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่ำ

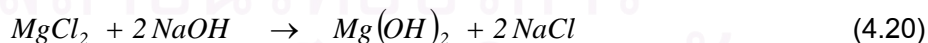
4.2 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

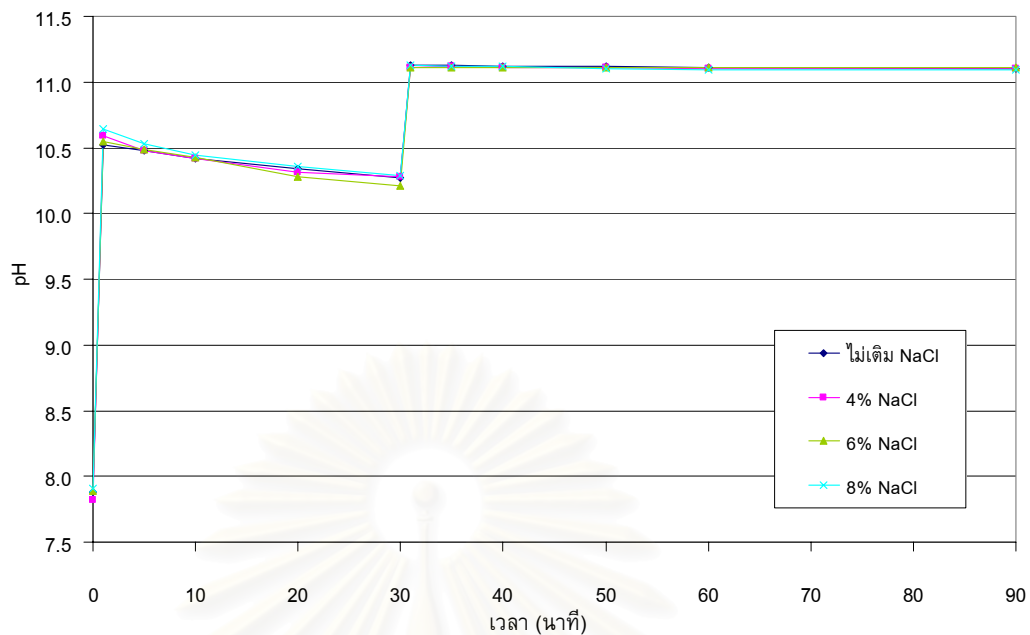
จากการทดลองตามสภาวะที่กำหนดต่างๆเช่นเดียวกับกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่หนึ่งทำการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยนำสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา ส่วนที่สองทำการศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ในสภาวะที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นแตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์โดยค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์กำหนดเป็น 6% แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอน ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

4.2.1 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตาม (รูปที่ 4.16) เวลาพบว่าก่อนเริ่มทำปฏิกิริยานั้นสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์จะมีค่า pH เป็นกลางเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปพบว่าค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับกระบวนการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์แตกตัวในน้ำได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดขึ้นในระบบ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยจากการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนในระบบ





รูปที่ 4.16 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

เมื่อทำการทดลองโดยเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 4% 6% และ 8% พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่สูงขึ้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เนื่องจากค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมาก ($10^{-10.7}$) (Snoeyink และ Jenkins, 1980) ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน

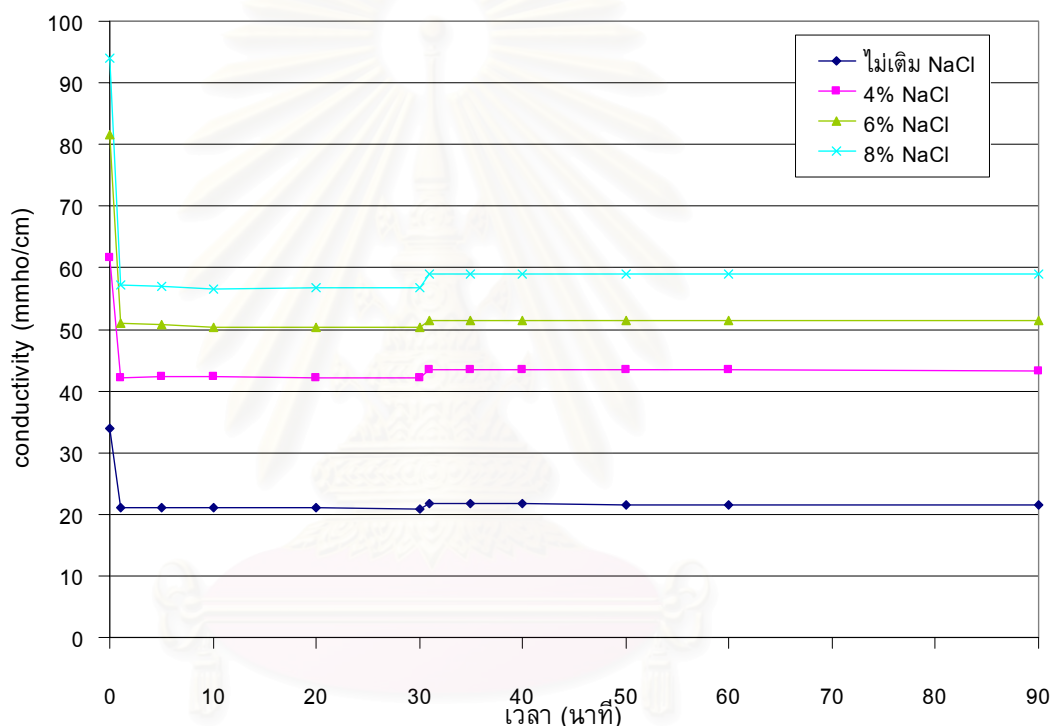
ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่ละลายน้ำส่งผลให้ปริมาณไอออนในสารละลายลดลง

และเมื่อพิจารณาระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ปริมาณไอออนในสารละลายมีค่า

สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ค่า conductivity มีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกับค่าไอออนิกสเตรงท์ (ionic strength)

ค่า conductivity ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ต่าง ๆ กันของปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.17 จากรูปจะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังเห็นได้จากการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าและคงที่อย่างรวดเร็ว และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในระบบไม่ส่งผลอย่างมีนัยต่อระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

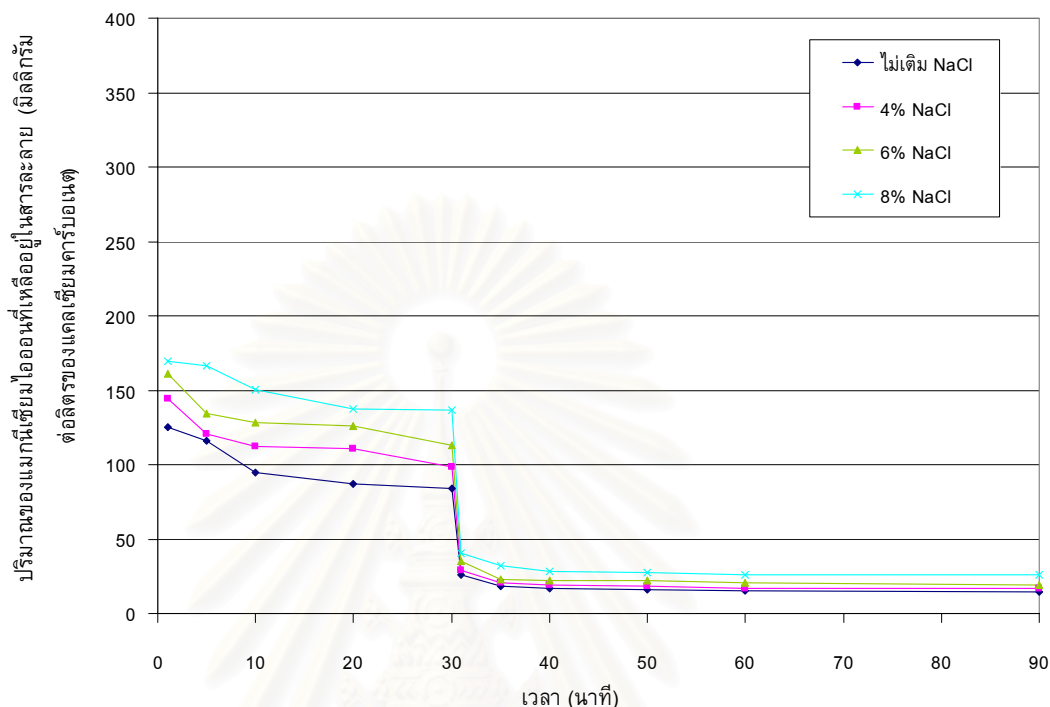


รูปที่ 4.17 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

ค. ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน พบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีปริมาณของแมกนีเซียมไอออนลดลงอย่างรวดเร็ว (จาก 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือ 100 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในช่วงแรกของการเกิดตะกอนและเริ่มเข้าสู่

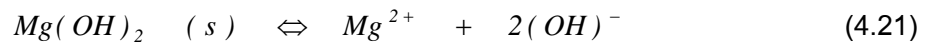
ค่าคงที่ประมาณนาที่ที่ 10 จนกระทั่งมีการปรับค่า pH ของสารละลายในนาที่ที่ 30 ปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งผลแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน

เมื่อทำการปรับค่า pH ของการเกิดตะกอนให้เท่ากับ 11.1 โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณลดลง เนื่องจากเป็นไปตามหลักการสมดุลของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (สมการ 4.20) เพราะไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปในระบบจะรบกวนสมดุลของการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น ระบบจึงต้องปรับเข้าสู่สมดุลในทิศทางลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนลงโดยเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับตามสมการ 4.20 คือเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่วนปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือในสารละลายก็จะลดลง

เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาในการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันพบว่า ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์หรือค่าไอออนิกสเตรนจ์ของระบบสูงขึ้นส่งผลให้ค่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่ามากขึ้นทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์



สามารถเขียนสมการแสดงค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดังนี้

$$K_{sp}(\text{Mg}(\text{OH})_2) = [\text{Mg}]^{2+} [\text{OH}^-]^2 \quad (4.22)$$

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

จากสมการที่ 4.22 เมื่อคำนึงถึงผลของค่าไอออนิกสเตรงท์จะได้

$$K_{sp}(\text{Mg}(\text{OH})_2) = f_d [\text{Mg}^{2+}] \times f_m^2 [\text{OH}^-]^2 \quad (4.23)$$

เมื่อ f_m, f_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเท่ากับ 1 และ 2 จัดรูปสมการ 4.23 ใหม่จะได้

$$\frac{K_{sp}(\text{Mg}(\text{OH})_2)}{f_d f_m^2} = K'_{sp}(\text{Mg}(\text{OH})_2) \quad (4.24)$$

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

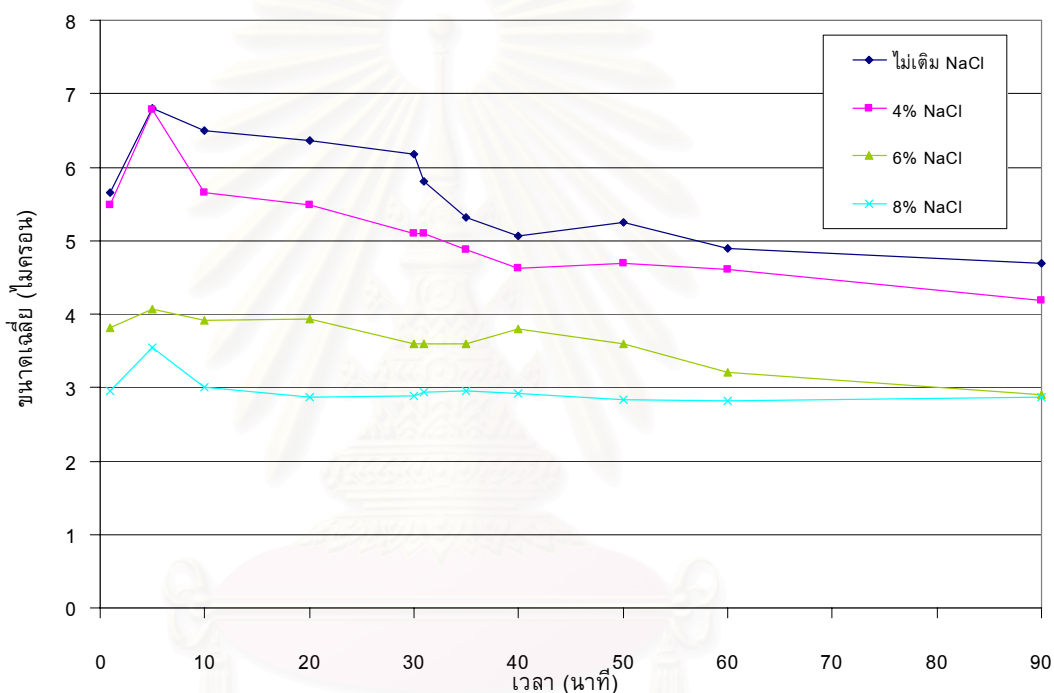
เช่นเดียวกันกับกรณีปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี (f_m, f_d) มีค่าลดลงจะส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นคือตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายได้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากค่าคงที่สมดุลการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมากดังนั้นผลการเปลี่ยนแปลงของค่าไอออนิกสเตรงท์อาจส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลเพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้พบว่าแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายจะมีค่าน้อยกว่าแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายที่เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดแมกนีเซียมไอออนจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดแคลเซียมไอออน

เนื่องจากความสามารถในการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

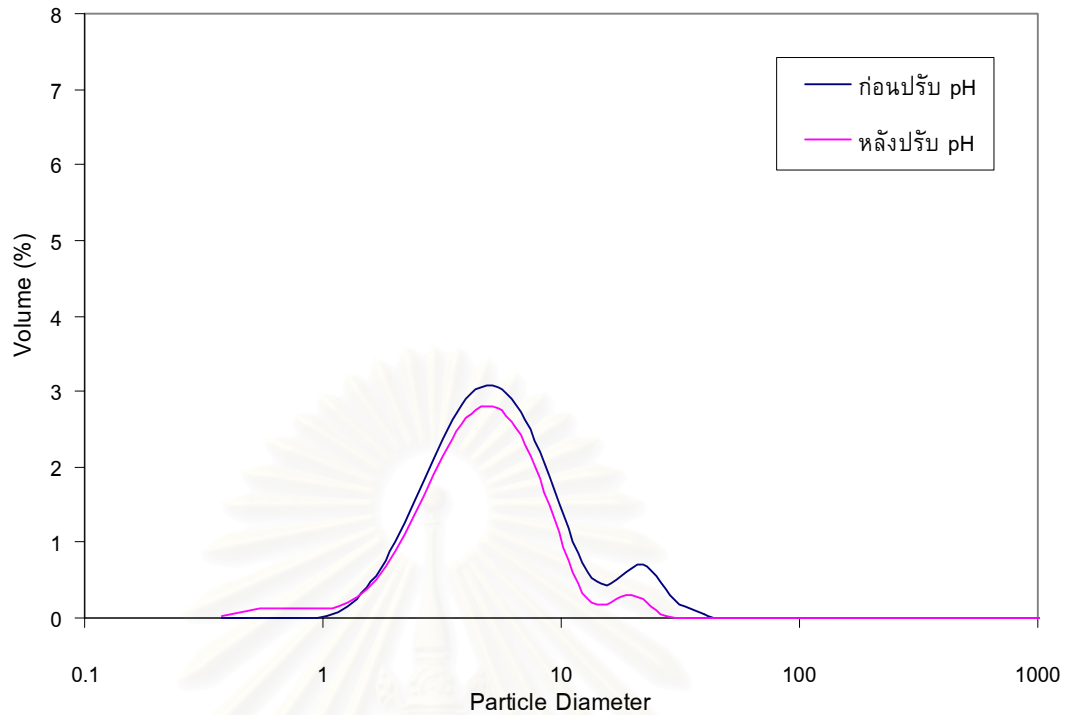
ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

จากการนำตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีขนาดใหญ่ในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของตะกอนจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและเมื่อมีการปรับค่า pH ในนาที่ที่ 30 ขนาดของตะกอนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.19



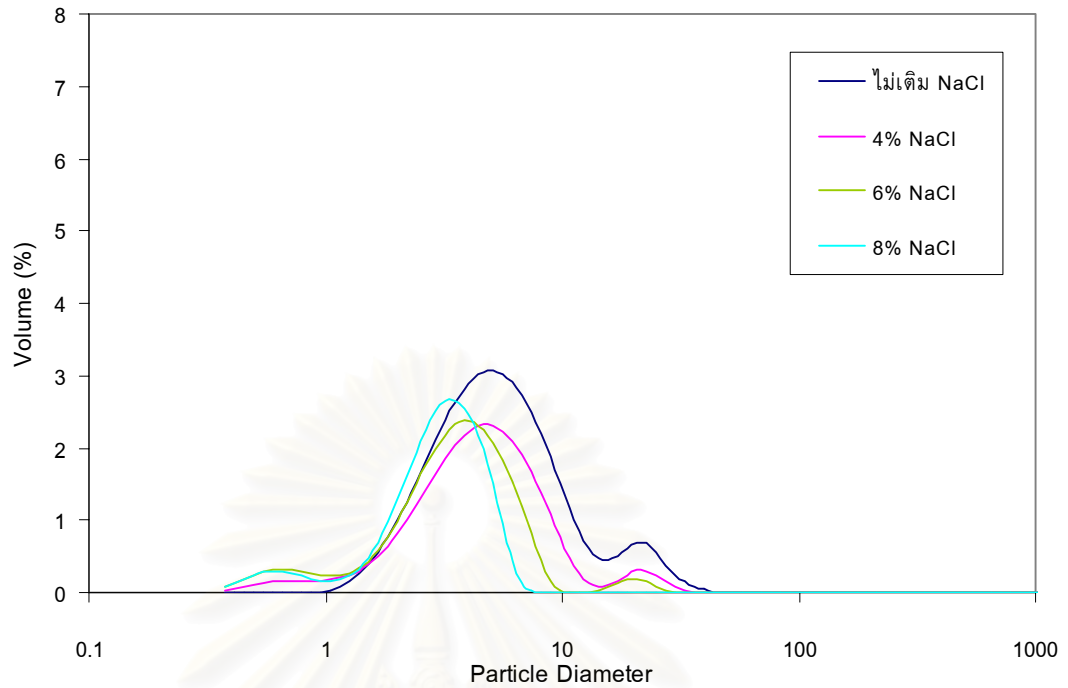
รูปที่ 4.19 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน pH

เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของตะกอนจากรูปแสดงการกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เทียบระหว่างก่อน (นาที่ที่ 30) และหลัง (นาที่ที่ 60) ทำการปรับค่า pH จะเป็นไปตามรูปที่ 4.20

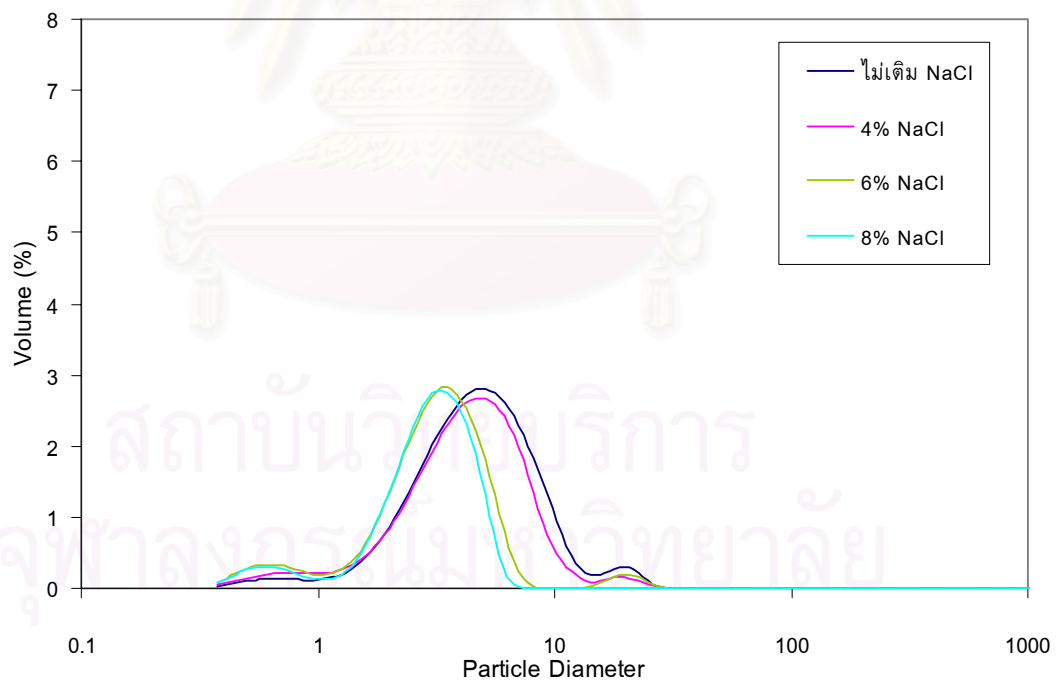


รูปที่ 4.20 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังปรับค่า pH (ไม่เติม NaCl)

ขนาดของตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน ตะกอนจะมีขนาดใหญ่ในช่วงแรกของปฏิบัติการเกิดตะกอนจากนั้นขนาดของตะกอนจะค่อยๆ เล็กลงเช่นเดียวกันเนื่องจากการแตกตัวของตะกอน และที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงอนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่ำอาจเป็นไปได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายมีเป็นจำนวนมากอาจจะมีแรงผลึกและอนุภาคที่ลอยตัวอยู่ในสารละลายมีโอกาสชนกันมากขึ้นส่งผลให้มีการแตกตัวของอนุภาคขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marian และ Witold (1995) ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายมีค่าสูงนั้นจะส่งผลให้การเพิ่มขนาดของผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากความหนืดของระบบที่เพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นของเกลือจะมีผลต่ออัตราการเพิ่มขนาดของผลึกแต่อย่างไรก็ตามผลึกที่เกิดขึ้นมักจะมีรูปร่างเสถียรมากกว่าเมื่อเทียบกับการเกิดผลึกที่มีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ผลแสดงการกระจายขนาดของตะกอนก่อนและหลังปรับค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ดังแสดงในรูปที่ 4.21



ก่อนปรับค่า pH (นาที่ที่ 30)



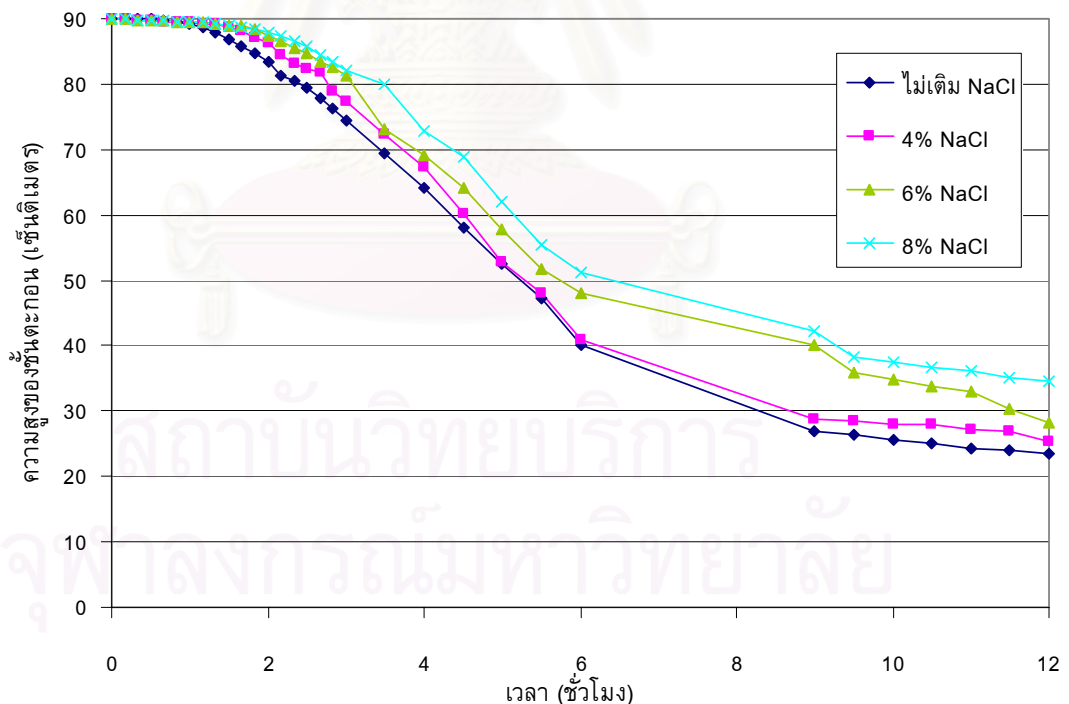
หลังปรับค่า pH (นาที่ที่ 60)

รูปที่ 4.21 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนและหลังปรับค่า pH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโซเดียมคลอไรด์

จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนในหลอดตกตะกอนที่เตรียมไว้เพื่อทำการวัดความเร็วของการตกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการเกิดตะกอนแล้วทำการวัดความสูงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนกับของเหลวใสจะได้ผลดังรูปที่ 4.22

กระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถสังเกตได้ง่ายและชัดเจนกว่ากระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติในการจับกลุ่มกัน นอกจากนี้พบว่าความเร็วของการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะค่อนข้างช้าเนื่องจากผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดเล็กและมีคุณสมบัติในการดูดซับกับน้ำและเมื่อผลึกมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นน้ำก็จะรวมอยู่ในช่องว่างของผลึกที่เกาะตัวกันส่งผลให้ความหนาแน่นของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าต่ำ (Marian และ Witold, 1995) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาตรชั้นตะกอนหลังจากทำการตกตะกอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงพบว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะมีชั้นตะกอนสูงกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.22 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน

ตาราง 4.1 ตารางแสดงค่าความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

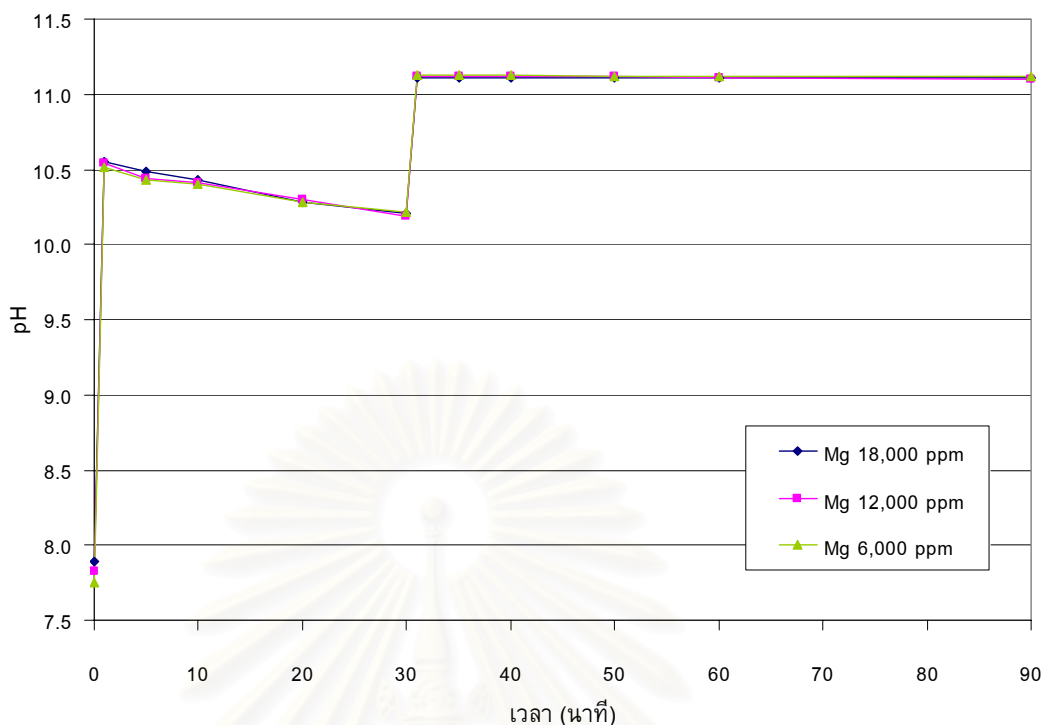
เวลา	การตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต (ซม.)				การตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (ซม.)			
	0% NaCl	4% NaCl	6% NaCl	8% NaCl	0% NaCl	4% NaCl	6% NaCl	8% NaCl
0	90	90	90	90	90	90	90	90
10 นาที	-	-	-	-	90	90	90	90
20 นาที	-	-	-	-	89.9	89.8	89.8	89.8
30 นาที	-	-	-	-	89.9	89.7	89.8	89.7
40 นาที	-	-	-	-	89.7	89.5	89.7	89.7
50 นาที	-	-	-	-	89.5	89.5	89.6	89.6
1 ชั่วโมง	-	-	-	-	89.1	89.4	89.5	89.5
1 ชั่วโมง 10 นาที	-	-	-	-	88.6	89.3	89.4	89.5
1 ชั่วโมง 20 นาที	-	-	-	-	87.9	89.2	89.2	89.3
1 ชั่วโมง 30 นาที	-	-	-	-	86.9	88.7	89	89
1 ชั่วโมง 40 นาที	-	-	-	-	85.9	88.1	88.9	88.8
1 ชั่วโมง 50 นาที	-	-	-	-	84.6	87.2	88.4	88.5
2 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	83.3	86.2	87.4	88
2 ชั่วโมง 10 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	81.4	84.5	86.6	87.3
2 ชั่วโมง 20 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	80.6	83.2	85.6	86.6
2 ชั่วโมง 30 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	79.4	82.4	84.6	85.7
2 ชั่วโมง 40 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	77.9	81.7	83.5	84.4
2 ชั่วโมง 50 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	76.3	78.9	82.5	83.5
3 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	74.5	77.3	81.2	82.2
3 ชั่วโมง 30 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	69.4	72.2	73.1	79.9
4 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	64.2	67.2	69.2	72.9
4 ชั่วโมง 30 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	58.1	60.1	64.1	68.8
5 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	52.5	52.9	57.7	61.9
5 ชั่วโมง 30 นาที	1.6	1.8	2.3	2.4	47.2	48	51.8	55.4
6 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	40.2	41	48	51.1
9 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	27	28.9	40.1	42.3
12 ชั่วโมง	1.6	1.8	2.3	2.4	23.6	25.4	28.2	34.7

การตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันจะได้ว่าที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 23.6 เซนติเมตร การตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4%, 6% และ 8% ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 25.4 เซนติเมตร, 28.2 เซนติเมตร และ 34.7 เซนติเมตรตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดเล็กเมื่อตกตะกอนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจึงค่อนข้างลอยตัวและสภาวะที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเป็นสภาวะที่มีประจุไฟฟ้าสูงส่งผลให้การรวมตัวของอนุภาคลดลงส่งผลให้ระดับความสูงของชั้นตะกอนมีค่ามาก ผลที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marian และ Witold (1995) ซึ่งพบว่าลักษณะการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายเกลือในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระบบมีการเพิ่มแรงต้านในการจับตัวระหว่างอนุภาคนั้นเอง

4.2.2 การศึกษาผลของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า pH จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงใน 4.2.1ก คือก่อนเริ่มทำปฏิกิริยานั้นสารละลายของแมกนีเซียมคลอไรด์จะมีค่า pH เป็นกลางเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปพบว่าค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็วและจากนั้นจะมีค่าลดลงจนค่า pH เข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งแสดงได้ว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล จากนั้นหลังจากเวลาที่ 30 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันจะถูกปรับให้เท่ากับ 11.1 แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

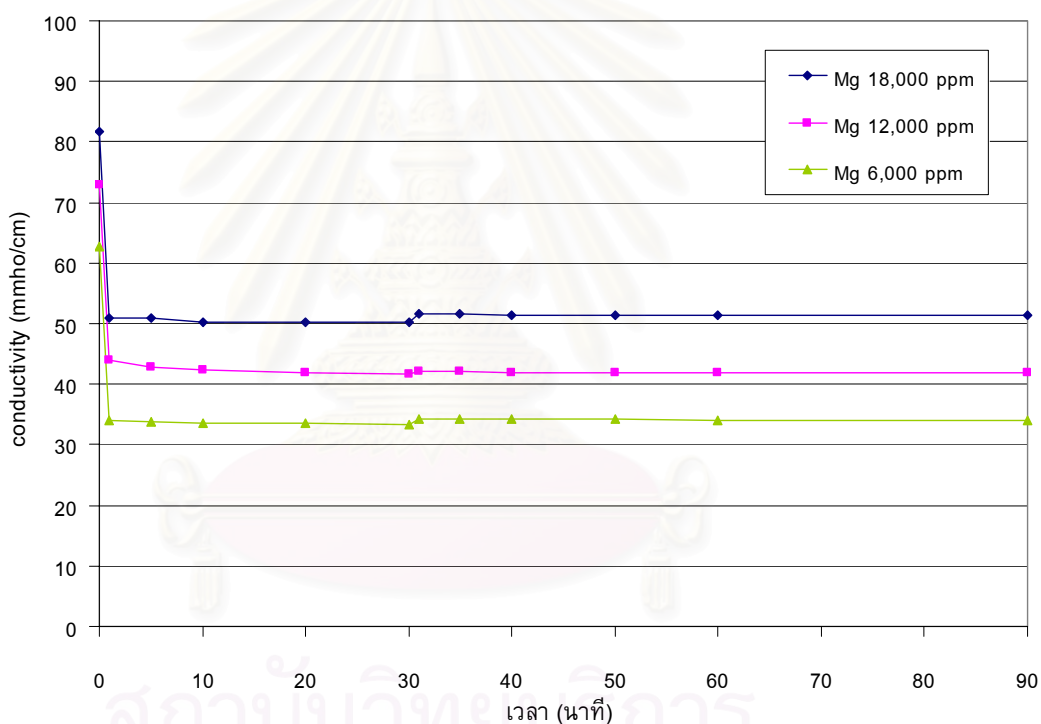
จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า pH ของสารละลายในสถานะที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์ต่างๆกันนั้น ค่า pH จะไม่แตกต่างกันมากนักเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.1ก ที่ได้อธิบายว่าการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะพิจารณาได้จากสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตามสมการที่ 4.20 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายสูงขึ้นด้วยเนื่องจากค่าไอออนิกสเตรงท์เป็นค่าที่แสดงถึงปฏิภานระหว่างไอออนในสารละลายและเมื่อความเข้มข้นในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความแรงของไอออนในระบบเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมาก (Snoeyink และ Jenkins, 1980) ทำให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ที่มีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลการละลายน้อยมากส่งผลให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน

ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างๆกันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าเมื่อทำการเติมสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าการนำไฟฟ้า

ของสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกับกรณี 4.2.1x เนื่องจากตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่ละลายน้ำส่งผลให้ปริมาณไอออนในสารละลายลดลงค่าการนำไฟฟ้าจึงลดลง

และเมื่อพิจารณาระบบที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันโดยความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์คงที่ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นสูงขึ้นส่งผลให้ค่า conductivity มีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกับค่าไอออนิกสเตรงท์ (ionic strength) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เพราะค่าไอออนิกสเตรงท์คือค่าที่แสดงถึงปฏิกิริยาของไอออนในสารละลายหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าความแรงของไอออน ส่วนค่าการนำไฟฟ้าก็เป็นค่าที่วัดจากไอออนในระบบดังนั้นจึงมีการแปรผันตามกัน

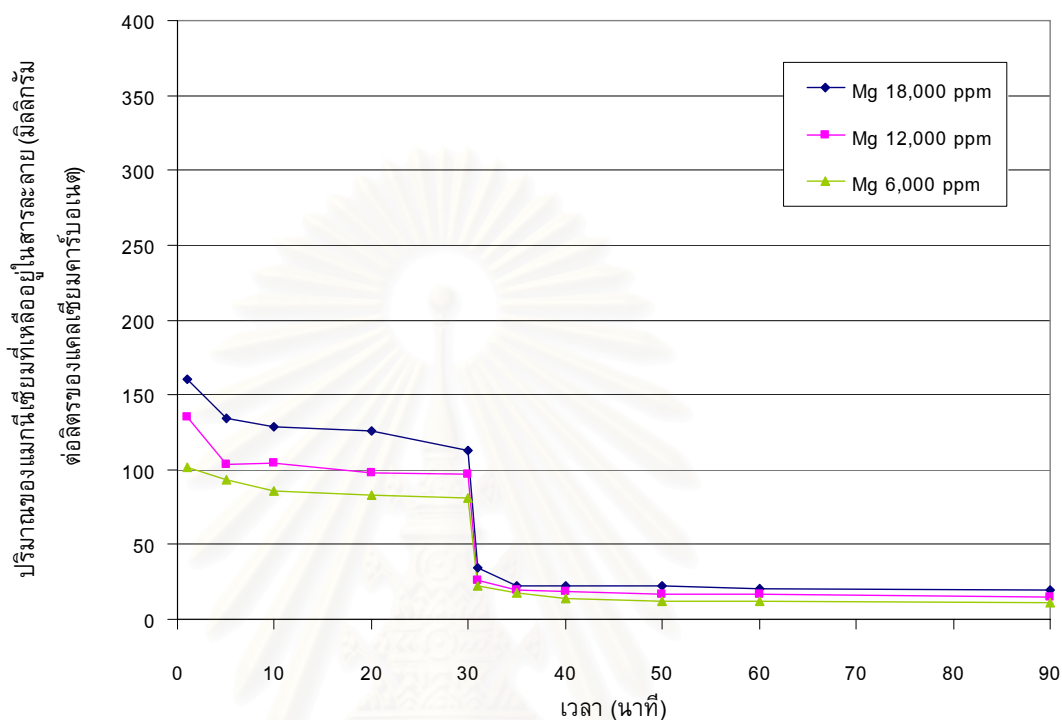


รูปที่ 4.24 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

ค. ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน พบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีปริมาณแมกนีเซียมไอออนลดลงอย่างรวดเร็ว

เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในสารตั้งต้นเกิดเป็นตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ซึ่งแนวโน้มของปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังรูป 4.25



รูปที่ 4.25 ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกันพบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากสมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ตามความสัมพันธ์

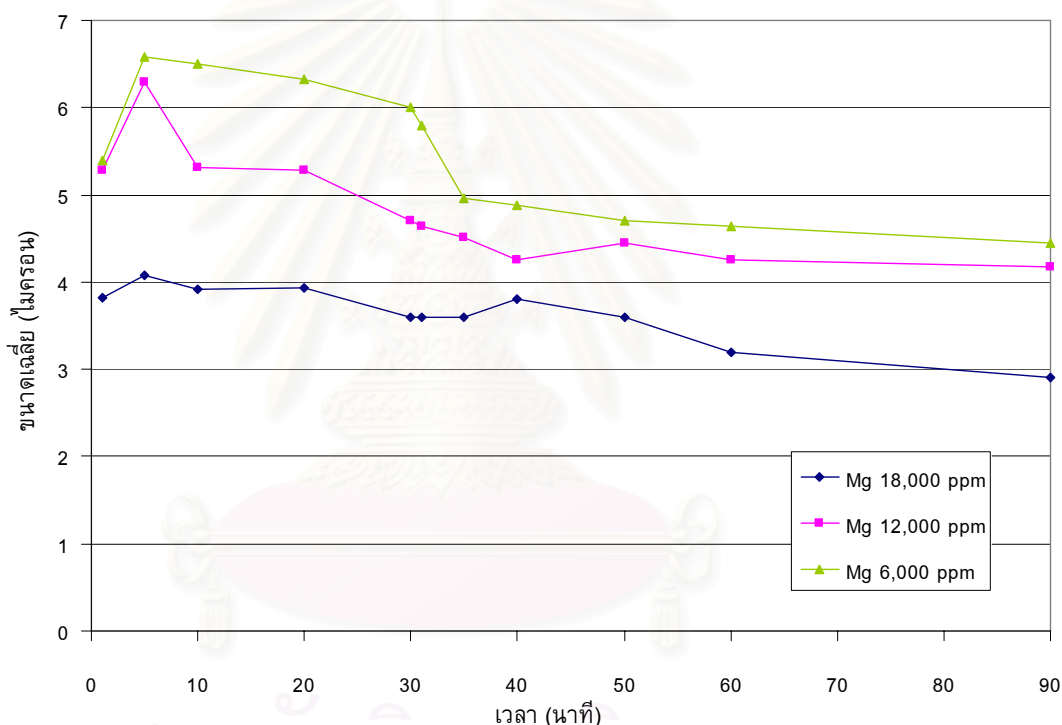
$$[Mg^{2+}] = \frac{K_{sp}(Mg(OH)_2)}{[OH]^{-2}} \quad (4.25)$$

เนื่องจากค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยมากส่งผลให้ค่าไอออนิกสเตรงท์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในหัวข้อ 4.2.2ก พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลต่อค่า pH เพียงเล็กน้อยทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจะได้ว่าปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการตกตะกอนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

ในกรณีของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกันพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคตามเวลาจะมีการเปลี่ยนแปลงคือช่วงแรกตะกอนมีขนาดใหญ่จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการแตกตัวของตะกอนและยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเมื่อเวลาหนึ่งขนาดของตะกอนเริ่มเข้าสู่คงที่ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

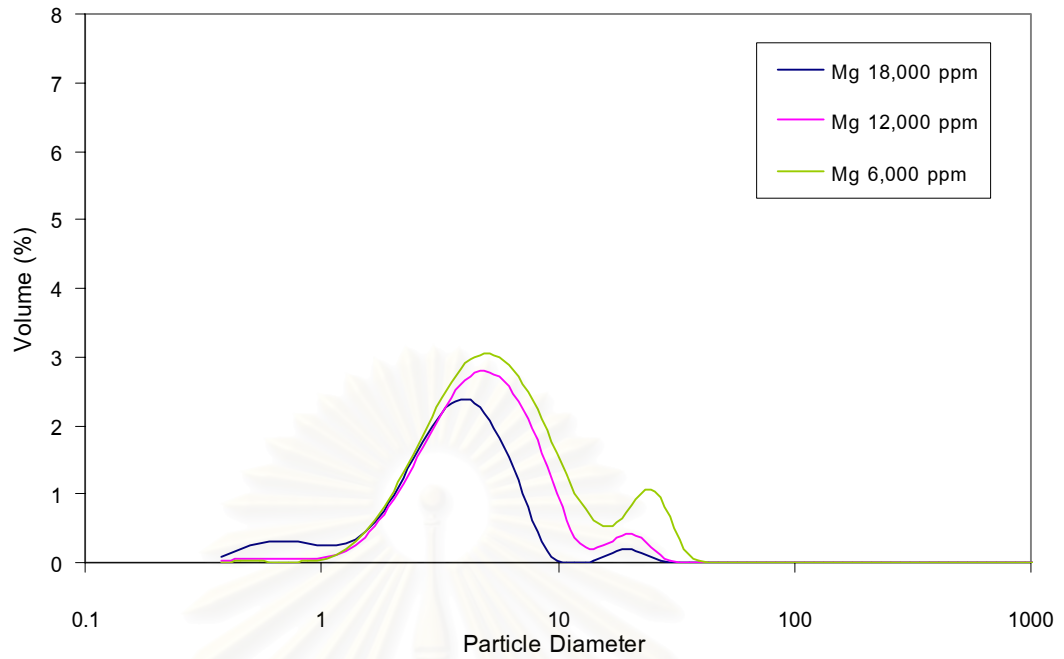
เมื่อพิจารณาขนาดของตะกอนที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างกันพบว่าขนาดของตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงเมื่อมีปฏิกิริยาการเกิดตะกอนเกิดขึ้นจะส่งผลให้มีความอึดตัวยิ่งยวดสูงกว่า ดังนั้นอัตราการเกิดนิวเคลียสจะมากกว่าส่งผลให้ในสารละลายมีอนุภาคเล็กๆเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่วนที่ช่วงค่าความอึดตัวยิ่งยวดต่ำกว่านั้นจะเป็นสภาวะที่

ส่งผลให้มีการชนกันระหว่างผลึกเพื่อเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคใหม่มากกว่า (Rousseau, 1987)

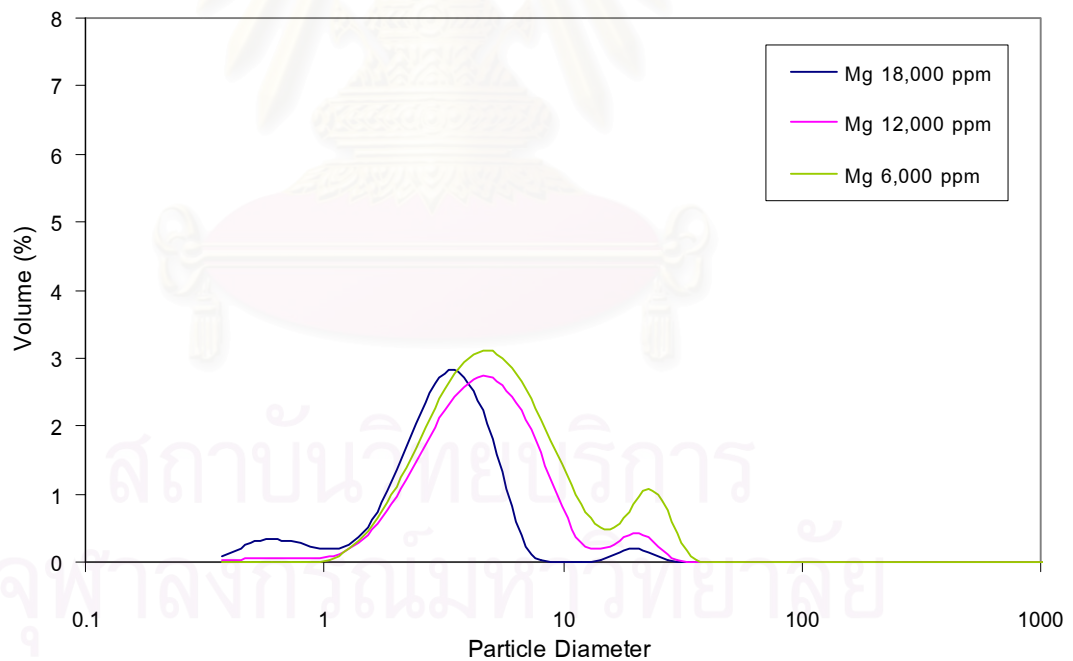
นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mullin (1989) ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงจะมีอัตราการแตกตัวมากกว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงแม้ว่าอนุภาคเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากทำให้การชนกันของอนุภาคมีมากขึ้น แต่ในสภาวะที่เกิดขึ้นโอกาสการรวมตัวของอนุภาคเพื่อเกิดเป็นอนุภาคใหม่ยังคงเป็นไปได้ยากกว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ ส่งผลให้การแตกตัวของอนุภาคมากขึ้นส่งผลให้ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีขนาดเล็กกว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ค่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน ก่อน (นาที่ที่ 30) และหลังการปรับค่า pH (นาที่ที่ 60) แสดงได้ดังรูปที่ 4.27



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก่อนปรับค่า pH (นาที่ที่ 30)

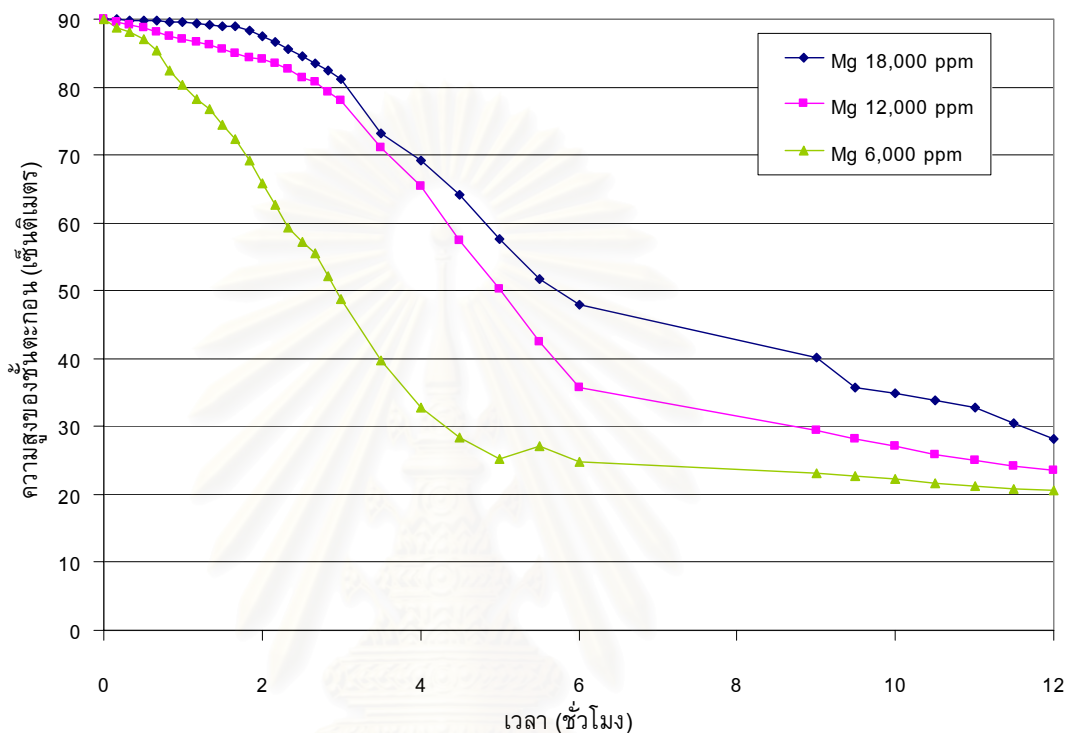


หลังปรับค่า pH (นาที่ที่ 60)

รูปที่ 4.27 การกระจายขนาดของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนในกรณีของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันเมื่อทำการวัดความสูงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของรอยต่อระหว่างชั้นตะกอนกับของเหลวใสจะได้ผลดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อพิจารณาความเร็วของการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.28 เนื่องจากที่ความเข้มข้นของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นอนุภาคที่มีมากจะอยู่ใกล้กันมากขึ้นส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกอนุภาคอื่นแหวดล้อม ทำให้การเคลื่อนที่ช้าลงความเร็วของการตกตะกอนจึงลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “hindered setting”

ความเข้มข้นของอนุภาคมีผลสำคัญต่อความเร็วของการตกตะกอน โดยเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นจนเกิดปรากฏการณ์ hindered setting ส่งผลให้ความเร็วของการ

ตกตะกอนในกรณีนี้มีค่าน้อยกว่าความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจาก Stoke's law (Warren, 1993)

จากรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงการตกตะกอนในช่วงแรกค่อนข้างช้ามาก เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งความเร็วในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายมีประจุเป็นบวก (Black, 1961) เมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคด้วยกันเองทำให้แรงผลักมีผลมากกว่าแรงที่เกิดจากน้ำหนักอนุภาคส่งผลให้ในช่วงแรกมีการตกตะกอนช้ากว่า เมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้นอนุภาคมีการจับกับอนุภาครอบข้างเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อแรงที่เกิดจากน้ำหนักมีผลมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงทำให้การตกตะกอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

จากการทดลองตามสมภาวะที่กำหนดต่างๆ สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่หนึ่งทำการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่แตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยนำสารละลายของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ ส่วนที่สองทำการศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ในสมภาวะที่ความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นแตกต่างกันต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมโดยค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์กำหนดเป็น 6% แล้วทำการพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอน ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และความเร็วของการตกตะกอนซึ่งผลการทดลองเป็นดังนี้

4.3.1 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

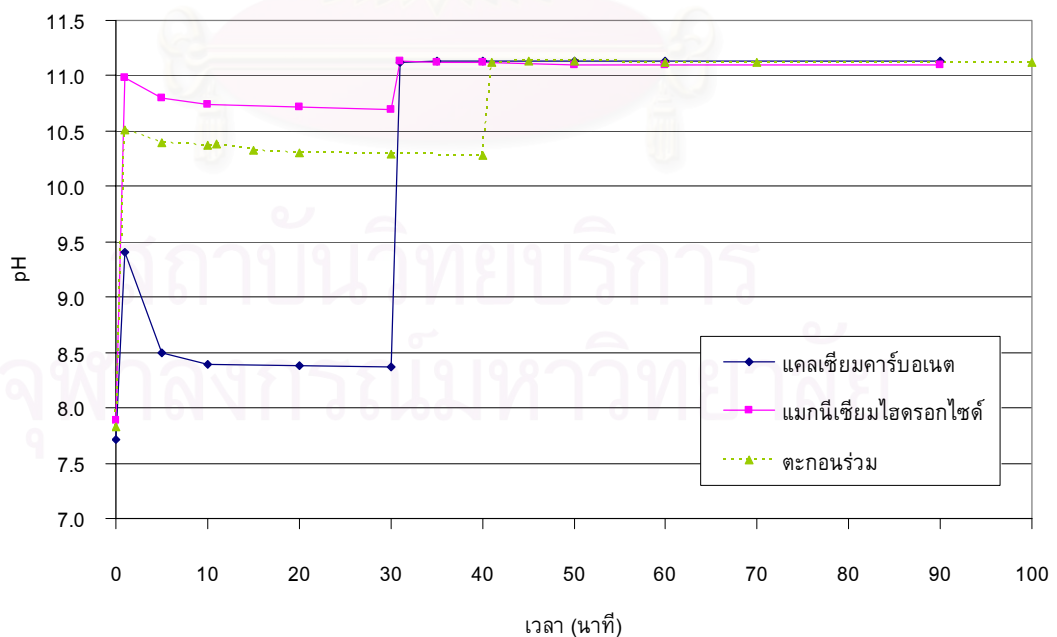
จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนร่วมนั้นสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่า pH เป็นกลาง จากนั้นทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปและเริ่มทำการกวนผสมสารละลายเพื่อทำการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนในช่วงแรก (เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดตะกอนแมกนีเซียมคาร์บอเนต) เมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อให้เกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าค่า pH ของสารละลายมีค่าสูงขึ้นใน

ช่วงแรกและจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ทำการเติมสารละลายไฮดรอกไซด์บอเนตลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตค่า pH ลดลงต่ออีกเพียงเล็กน้อย

ค่า pH ณ สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมพบว่าจะมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่จะมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาการเกิดตะกอนร่วมมีการละลายทำให้มีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดมากกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว ทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าสูงกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ละลายให้ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (Snoeyink, 1980)

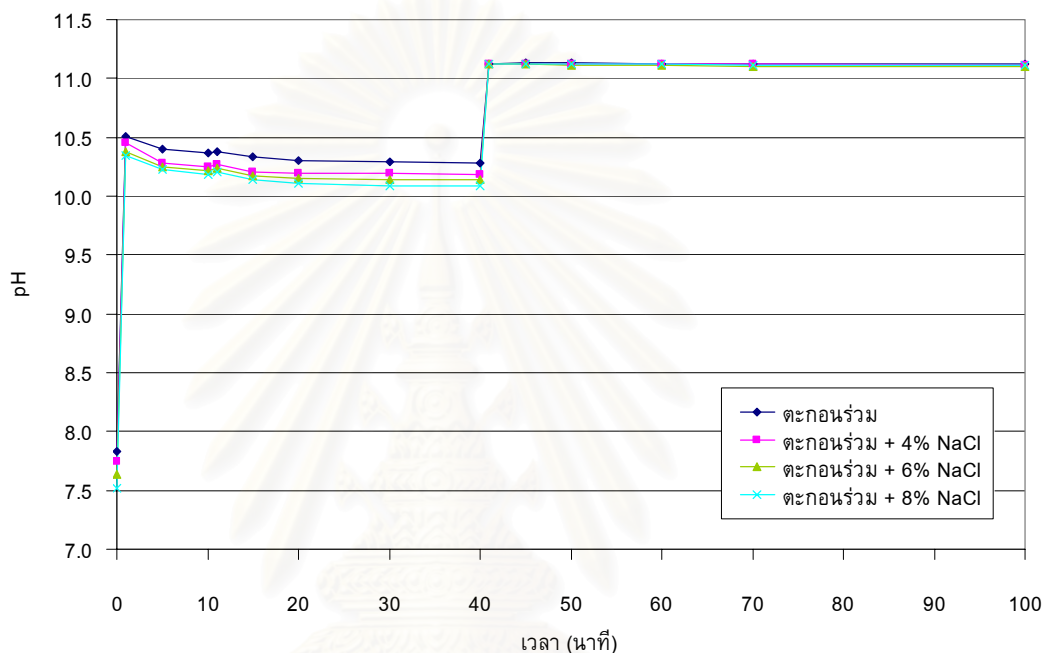


ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมลดลงดังนั้นค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมจึงมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันพบว่าค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.30 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าค่าไอออนิกสเตรงท์ที่เพิ่มขึ้นในสารละลายส่งผลให้ค่าคงที่การแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่ได้จากการละลายตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต มีการแตกตัวให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายลดลง ดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.1.1ก

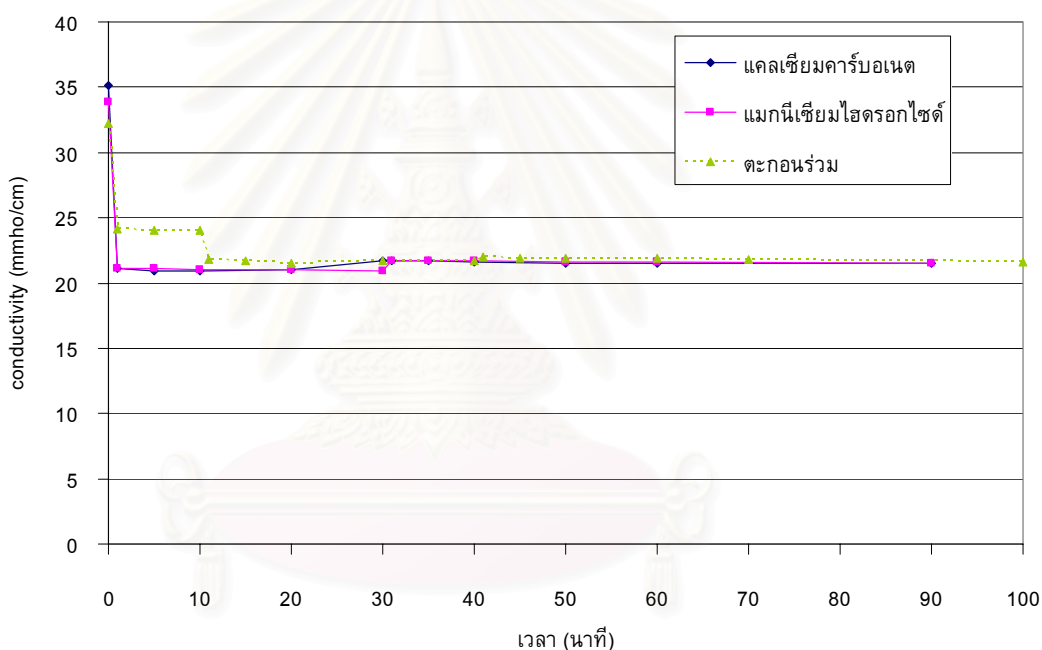


รูปที่ 4.30 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมก่อนเริ่มทำปฏิกิริยาจะมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์เนื่องจากในกระบวนการเกิดตะกอนร่วมมีการกำหนดให้ความเข้มข้นไอออนในสารละลายมีปริมาณเท่ากัน นั่นคือ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต แต่เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของแคลเซียมคลอไรด์จะมีค่าสูงกว่าแมกนีเซียมคลอไรด์เล็กน้อย ดังนั้นสารละลายของตะกอนร่วมที่ใช้สารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตจึงอาจมีค่าต่ำกว่าสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่กระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นเมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป

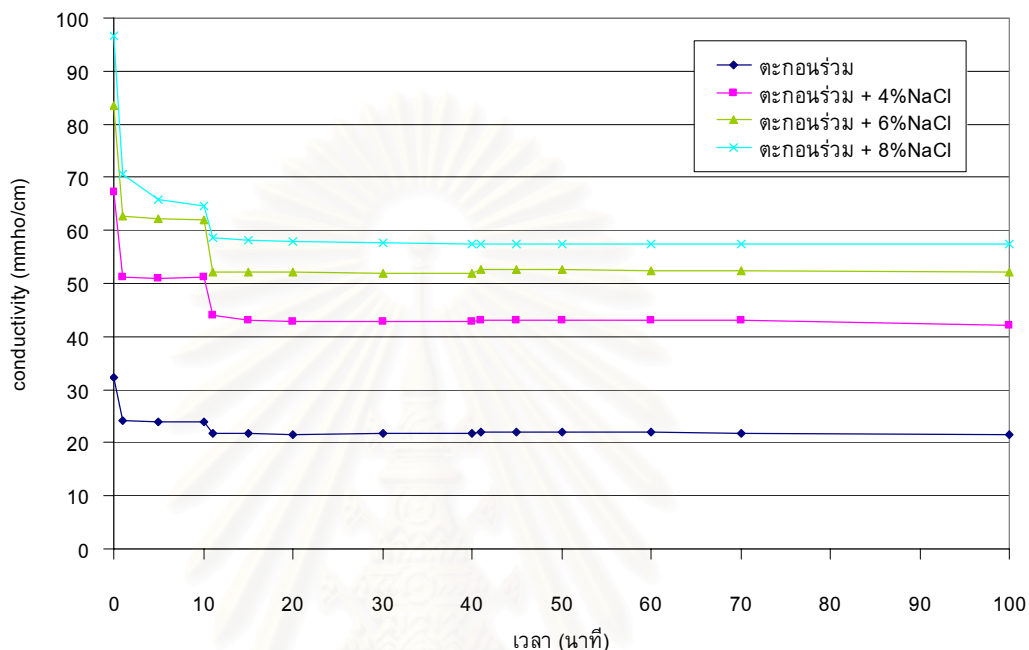
สารละลายผสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วและเนื่องจากที่ช่วงเวลา 10 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยามีการตกตะกอนเพียงชนิดเดียวดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จึงยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งนี้เนื่องจากไอออนในสารละลายยังมีค่าสูงเพราะคงมีปริมาณแคลเซียมไอออนที่ยังไม่ได้มีการตกตะกอนละลายอยู่และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาทีจะทำการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อมีการเกิดตะกอน และเมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงตามเวลาและการเกิดตะกอนที่เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของกระบวนการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันพบว่าจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันเริ่มแรกค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมจะมีค่าสูงจากนั้นเมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อมีการเกิดตะกอนและเมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงตามเวลาและการเกิดตะกอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันพบว่าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงปริมาณไอออนในสารละลายที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ผลการทดลองดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

ค. ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมโดยพิจารณาหลังจากการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไป (เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที) พบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกและเมื่อเวลาของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ในกรณีของแมกนีเซียมไอออนพบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นก่อนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้ง

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมกับการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว พบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่าต่ำกว่าการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงชนิดเดียว เนื่องจากในระบบของการเกิดตะกอนร่วมนั้นมีตะกอนแคลเซียม

คาร์บอนเนตและตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ด้วยกัน ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนบางส่วนที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และ ไบคาร์บอนเนตไอออน (HCO_3^-) ที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอนเนตเกิดเป็นคาร์บอนเนตไอออน (CO_3^{2-}) ส่งผลให้ในสารละลายมีปริมาณคาร์บอนเนตไอออนเพิ่มขึ้นทำให้ระบบเสียดุล และปรับลดคาร์บอนเนตไอออนทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอนเนตมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณของแคลเซียมไอออนในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมมีค่าลดลงแสดงในรูปที่ 4.33ก

ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกันพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.1ค นอกจากนี้พบว่าปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมจะมีค่ามากกว่าการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่ได้จากการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการเปลี่ยนกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และไบคาร์บอนเนตไอออน (HCO_3^-) ในสารละลายให้กลายเป็นคาร์บอนเนตไอออน (CO_3^{2-}) ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายลดลง ทำให้ระบบเสียดุล และปรับเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 4.33ข

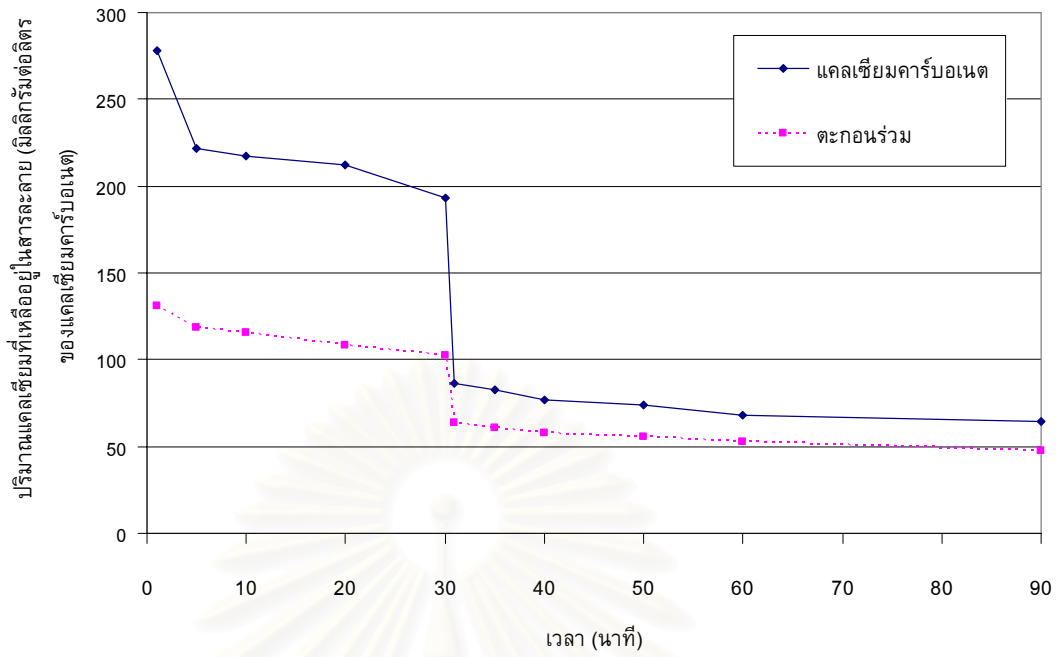
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกันพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1.1ค เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในสารตั้งต้น จะทำให้ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอนเนตมีค่าลดลง และส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอนเนตไอออน (CO_3^{2-}) ในสารละลายมีค่าลดลง ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายจะพิจารณาจากความสัมพันธ์สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอนเนตในสมการที่ 4.16 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายจึงมีค่าสูงขึ้นแสดงในรูปที่ 4.34ก

ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกันพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนมากขึ้นด้วยเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.1ค เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในสารตั้งต้นส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นคือตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะละลายได้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่

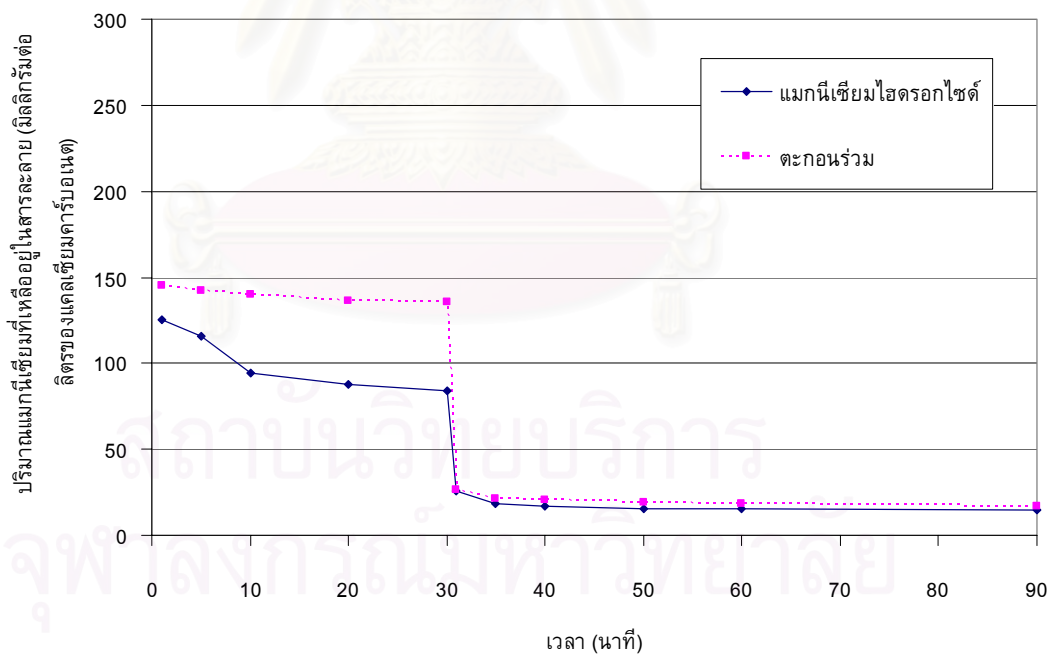
4.34 ข ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในสารละลายส่งผลให้เกิดตะกอนของทั้งโซเดียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

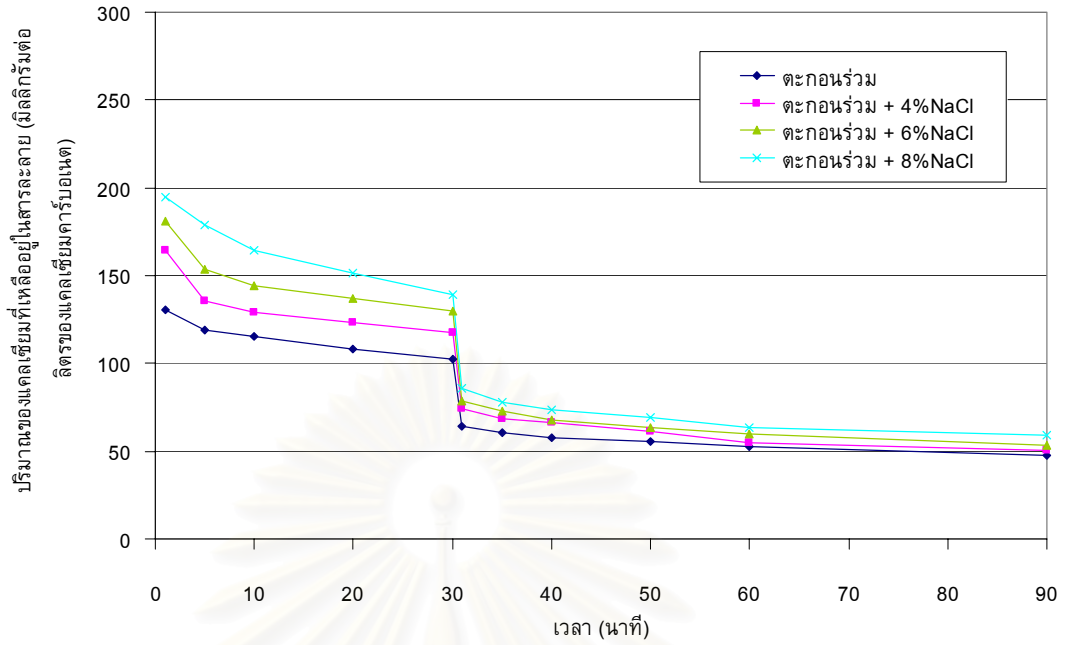


(ก) ปริมาณแคลเซียมไอออน

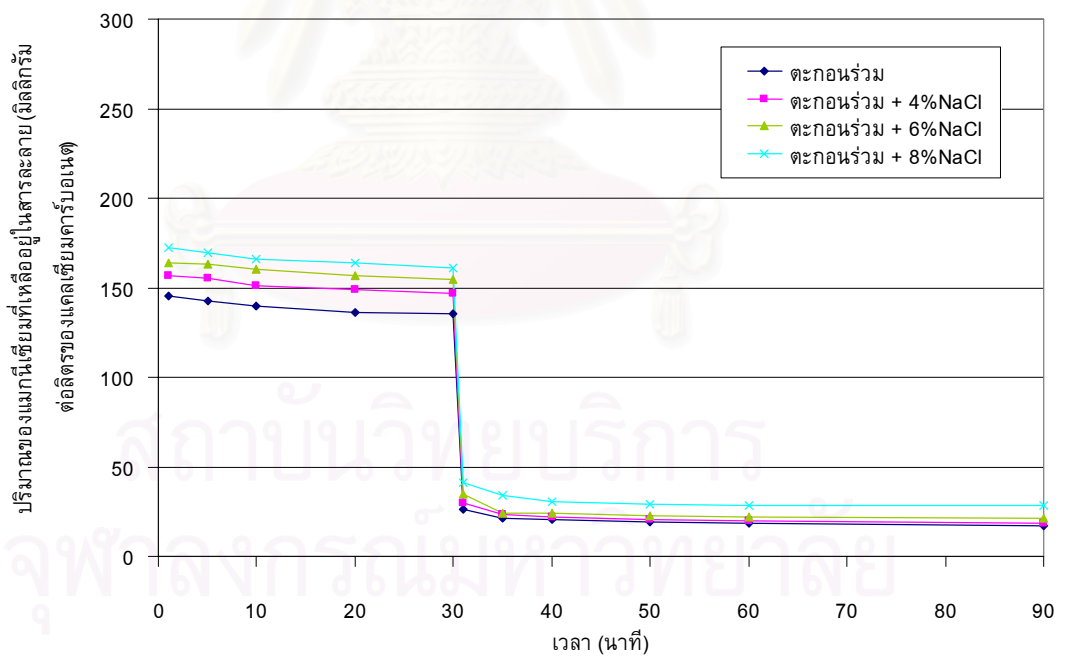


(ข) ปริมาณแมกนีเซียมไอออน

รูปที่ 4.33 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



(ก) ปริมาณแคลเซียมไอออน



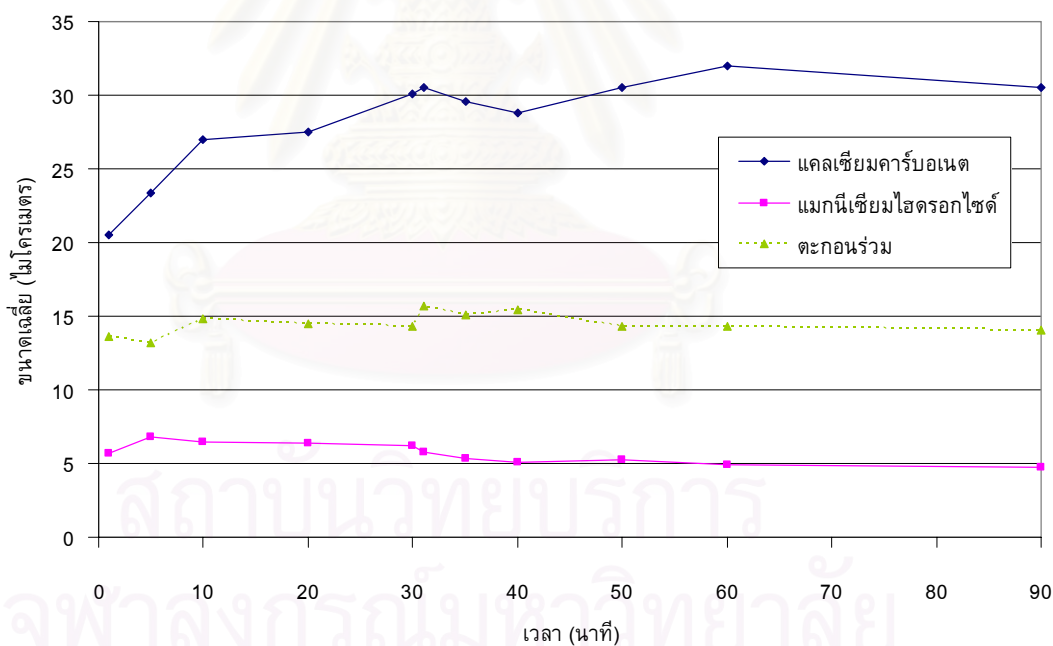
(ข) ปริมาณแมกนีเซียมไอออน

รูปที่ 4.34 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน

ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะพบว่า ตะกอนในช่วงแรกจะมีขนาดเล็กและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตะกอนจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากทำการปรับค่า pH ให้สูงขึ้นพบว่าขนาดของตะกอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

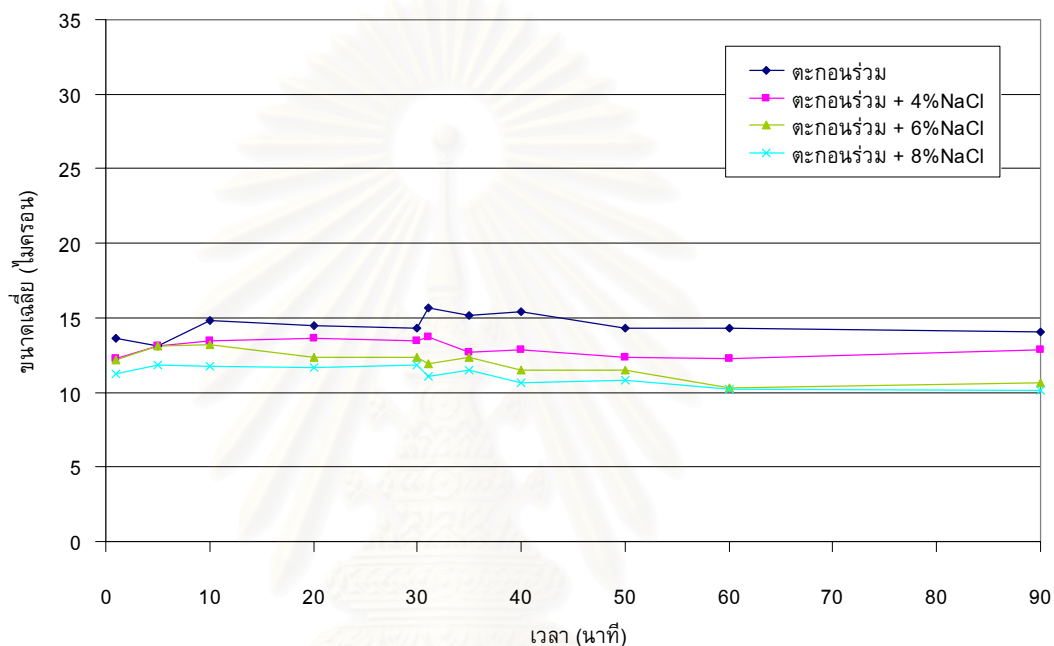
เมื่อเปรียบเทียบขนาดของตะกอนร่วมกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าตะกอนร่วมมีขนาดเล็กกว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต แต่มีขนาดใหญ่กว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากในตะกอนร่วมมีการจับตัวกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีประจุเป็นลบ ส่วนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีประจุเป็นบวก (Black, 1961) และในกระบวนการเกิดตะกอนร่วมนี้ผลึกของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบจะเข้าไปจับกับผิวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้การรวมตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตลดลง ดังนั้นขนาดของตะกอนร่วมจึงมีขนาดอยู่ในช่วงระหว่างตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

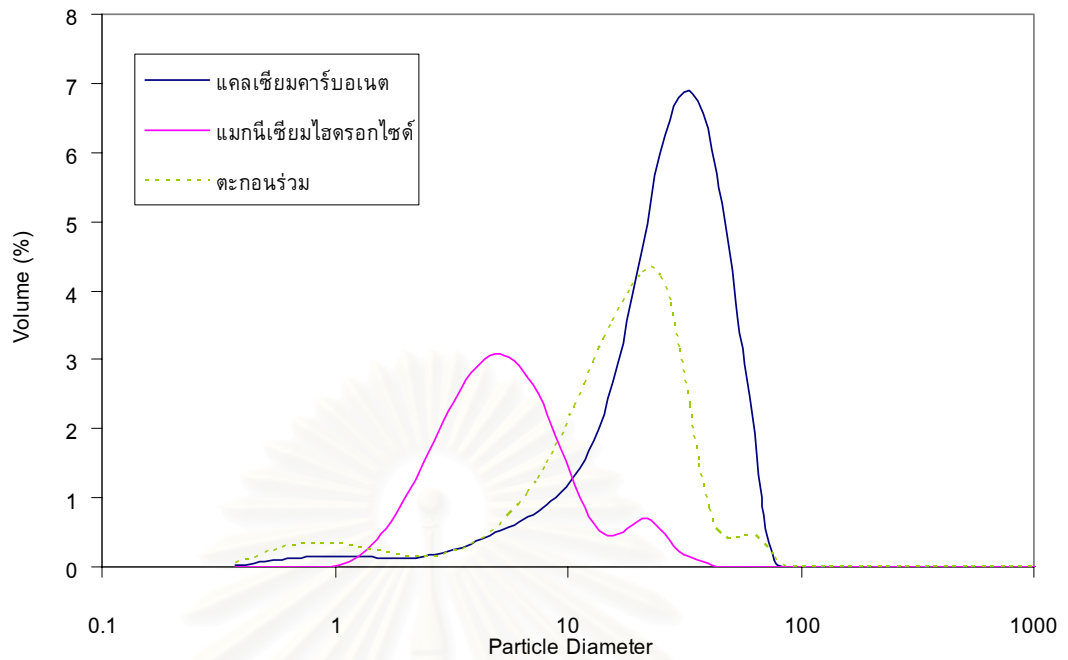
เมื่อพิจารณาขนาดของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันพบว่าขนาดของตะกอนลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1.1ง และ 4.2.1ง เนื่องจากประจุของ (Na^+) และ (Cl^-) ที่เกิดจากการแตกตัวของ

โซเดียมคลอไรด์จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ca^{2+} และ CO_3^{2-} (Murray, 2001) ทำให้การเกิดตะกอนน้อยลงและเมื่อตะกอนมีปริมาณน้อยการชนกันของอนุภาคเพื่อเกิดเป็นการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก และนอกจากนี้จากงานวิจัยของ Marian และ Witold (1995) พบว่าที่ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายมีค่าสูงนั้นจะส่งผลให้เพิ่มขนาดของผลึกเป็นอย่างมากเนื่องจากความหนืดของระบบที่เพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นของเกลือจะมีผลต่ออัตราการเพิ่มขนาดของผลึกดังแสดงในรูปที่ 4.36



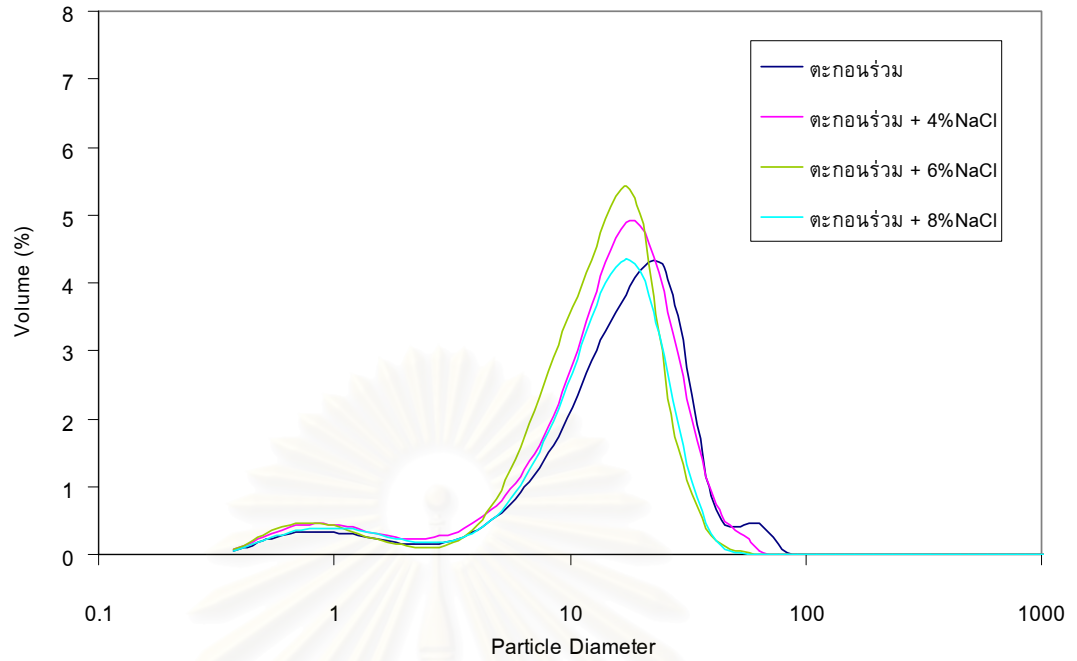
รูปที่ 4.36 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟการกระจายขนาดของตะกอนร่วมเทียบกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า ตะกอนร่วมมีการกระจายขนาดอยู่ระหว่างตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.37

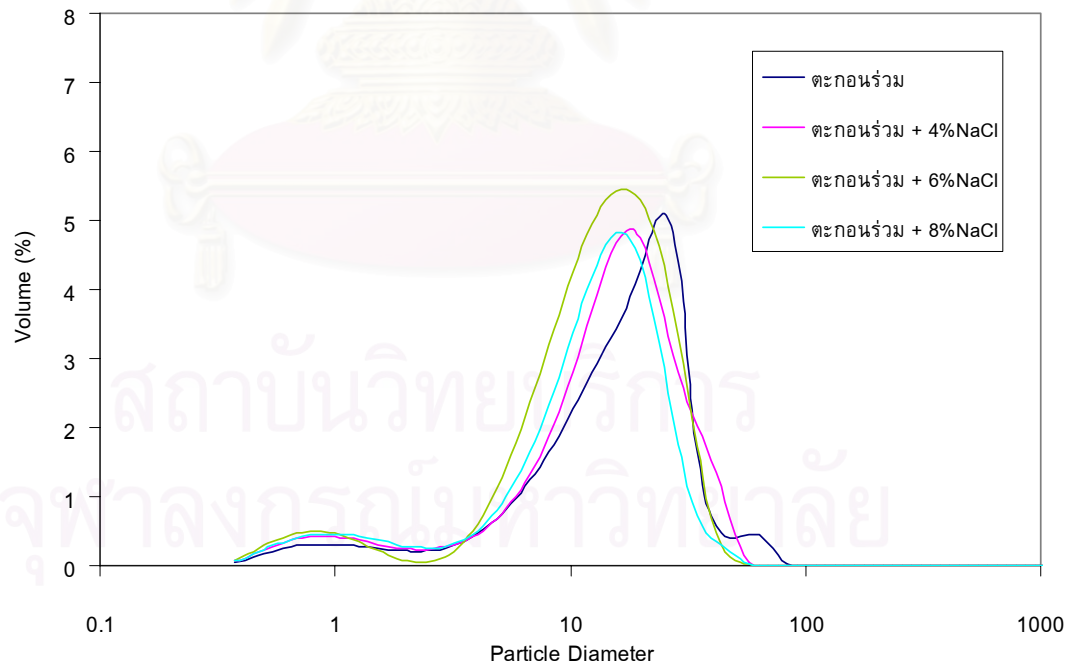


รูปที่ 4.37 การกระจายขนาดของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

พิจารณารูปการกระจายขนาดของตะกอนรวมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน จะได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงการกระจายขนาดของตะกอนจะอยู่ในช่วงที่มีค่าน้อยกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่ำ การกระจายขนาดของตะกอนรวมที่ก่อนและหลังทำการปรับค่า pH แสดงในรูปที่ 4.38



ก่อนปรับค่า pH (นาทีที่ 30)

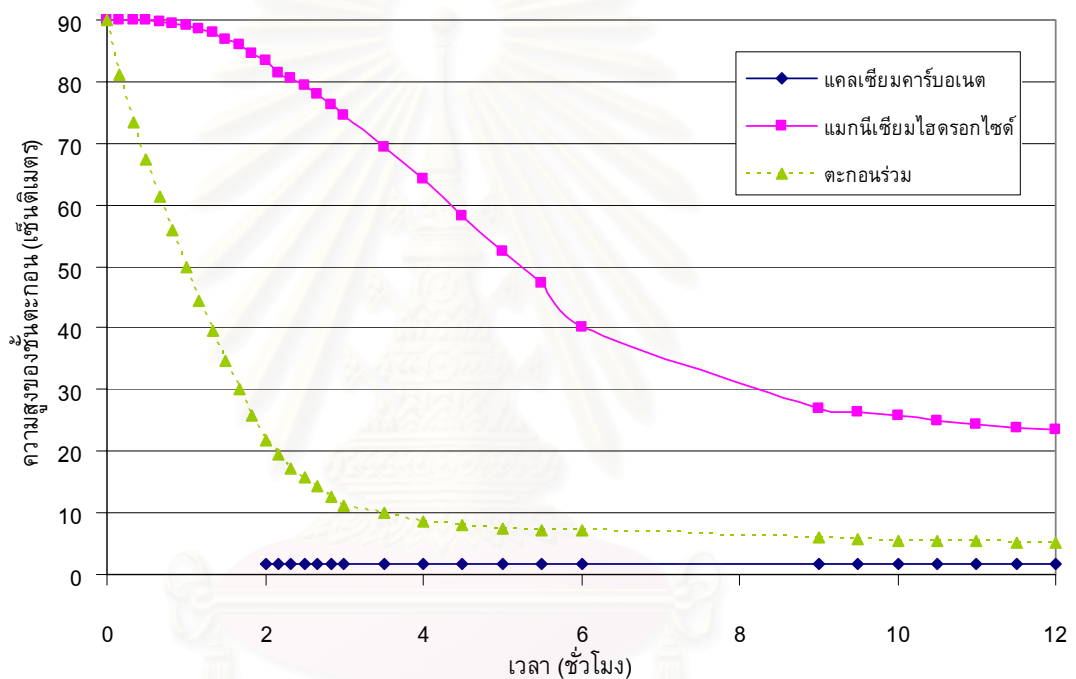


หลังปรับค่า pH (นาทีที่ 60)

รูปที่ 4.38 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
ต่าง ๆ กัน

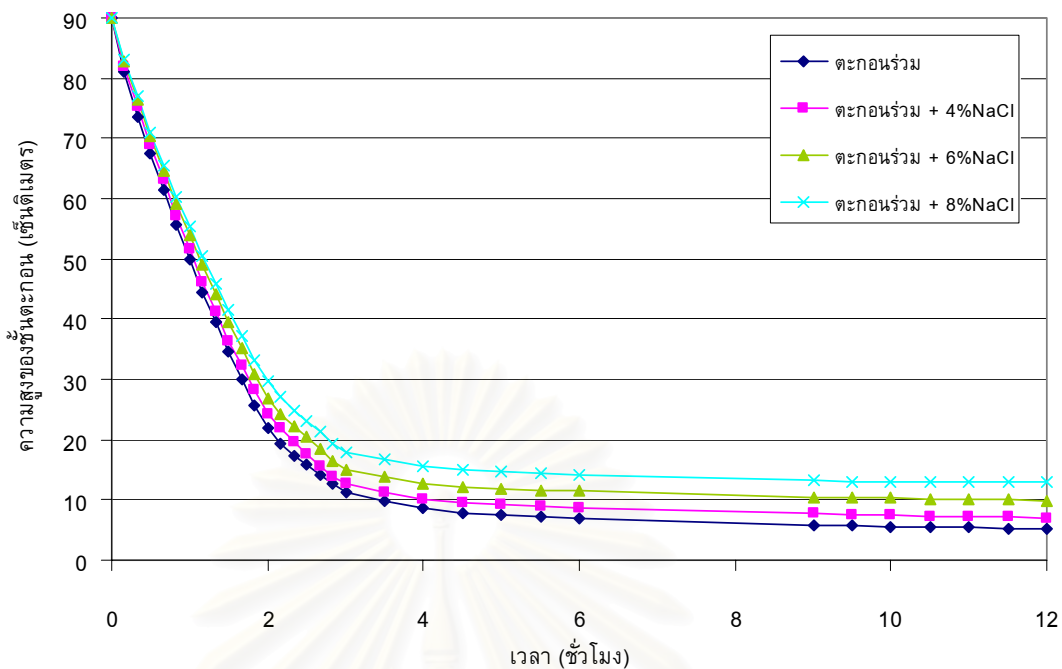
จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนร่วมโดยเทียบกับความเร็วในการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าตะกอนร่วมมีความเร็วในการตกตะกอนมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แต่ช้ากว่าการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากตะกอนร่วมมีการจับตัวกันของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่กว่าและมีความเร็วของการตกตะกอนเร็วกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ขนาดของตะกอนร่วมยังเล็กกว่าขนาดของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนของตะกอนร่วมช้ากว่าตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนร่วมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กันพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.1.1จ และ 4.2.1จ จากการทดลองจะเห็นว่าที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงการตกตะกอนร่วมที่ไม่ทำการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 5.2 เซ็นติเมตร การตกตะกอนร่วมเมื่อเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4%, 6% และ 8% ระดับความสูงของตะกอนมีค่า 7.05, 9.95 และ 12.85 เซ็นติเมตรตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน

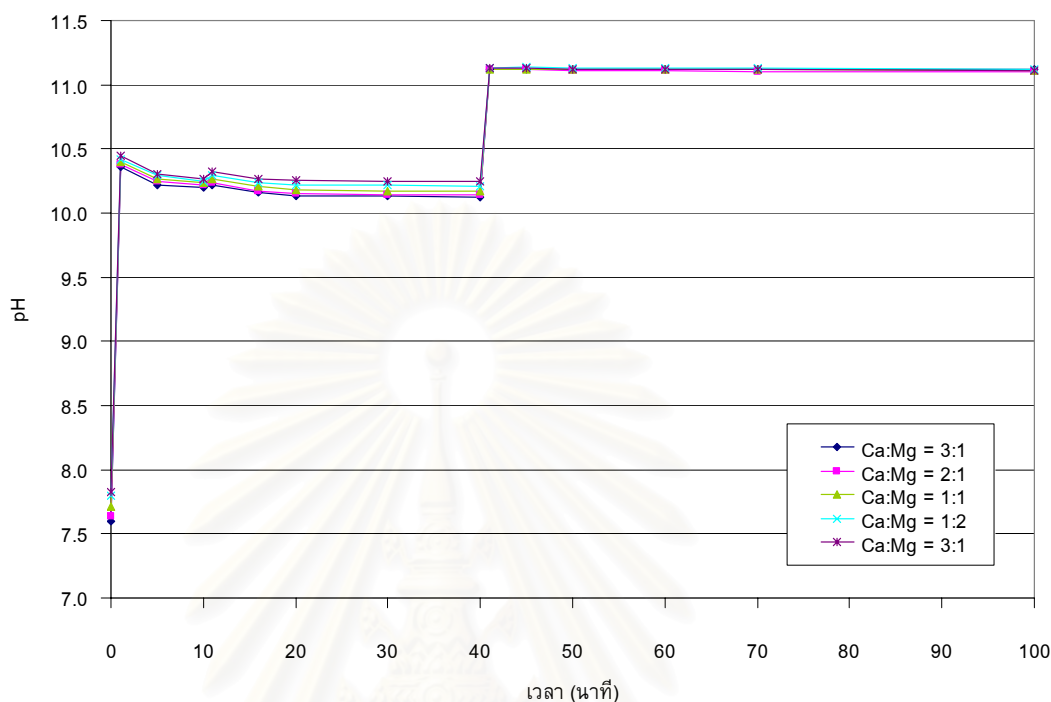
เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะพบว่าปริมาณชั้นตะกอนของตะกอนร่วมจะน้อยกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากตะกอนร่วมมีการจับตัวระหว่างผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าและน้ำหนักมากกว่าตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นการกีดกันของชั้นตะกอนจะมากกว่าการตกตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ความสูงของชั้นตะกอนจึงน้อยกว่า

4.3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ 6%

ก. ค่า pH ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่า pH ของกระบวนการเกิดตะกอนตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่า ค่า pH ของการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะใกล้เคียงกัน ก่อนเริ่มทำปฏิกริยานั้นสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมมีค่า pH เป็นกลาง จากนั้นเมื่อเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อให้เกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ค่า pH ของสารละลายมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกและจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อ

ทำปฏิกิริยาให้เกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตค่า pH ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเกิดตะกอนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.41



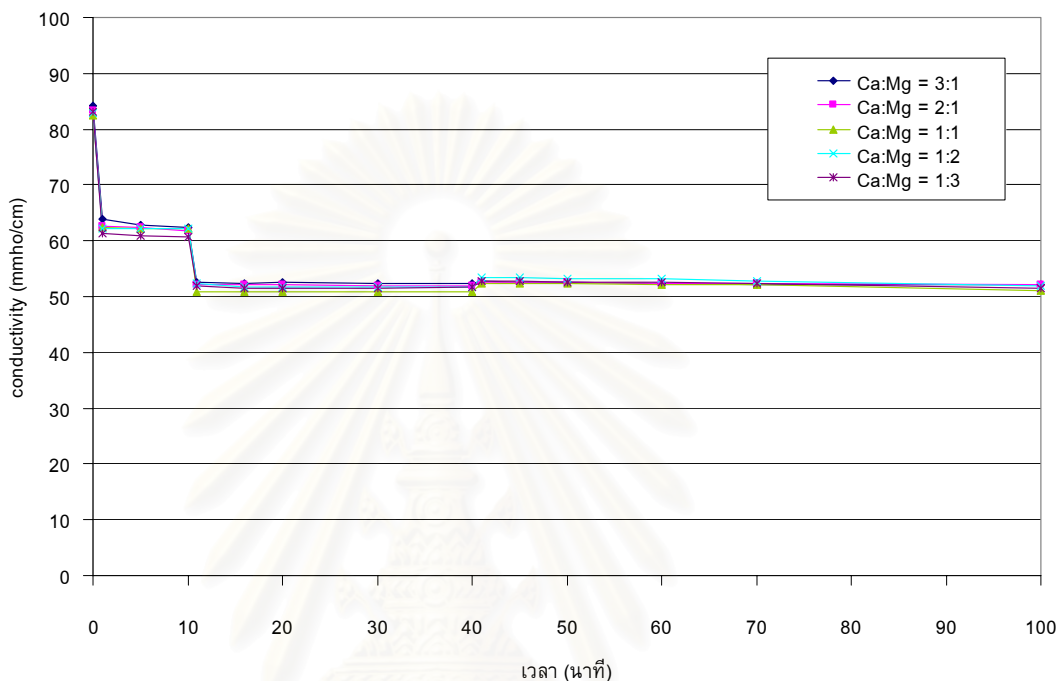
รูปที่ 4.41 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ที่สภาวะสมดุลของการเกิดตะกอนร่วมพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกำหนดค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายให้คงที่ จึงส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ปริมาณไอออนที่ได้จากการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ($H_2CO_3, HCO_3^-, CO_3^{2-}$) และไอออนที่ได้จากการละลายของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของการเกิดตะกอนร่วมใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่า pH มีค่าใกล้เคียงกัน

ข. ค่า conductivity ของการเกิดตะกอน

จากการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (conductivity) ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาพบว่าเริ่มแรกค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมจะมีค่าสูงจากนั้นเมื่อทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของ

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปทำการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อมีการเกิดตะกอน และเมื่อเวลาผ่านไปค่าการนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงตามเวลาและการเกิดตะกอนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายในกระบวนการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากในระบบมีการกำหนดให้ปริมาณไอออนในสารละลายคงที่ นั่นคือมีการกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นรวมในระบบมีค่าเป็น 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีการกำหนดค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6% ดังนั้นเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์ของระบบมีค่าคงที่จึงทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ใกล้เคียง

ค. ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอน

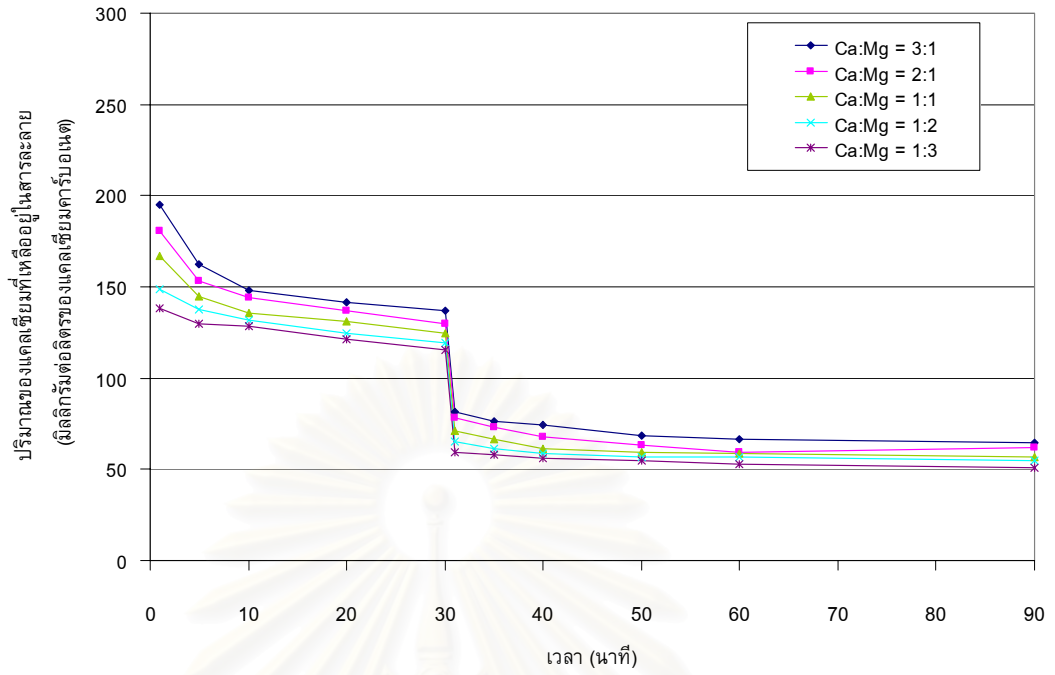
จากการพิจารณาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมโดยพิจารณาหลังจากการเติมสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตลงไป พบว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันจะใกล้เคียงกัน คือปริมาณแคลเซียมไอออนจะ

ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกและเมื่อเวลาของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนแมกนีเซียมไอออนจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นก่อนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเมื่อทำการปรับค่า pH ของสารละลายพบว่าปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งผลแสดงดังรูป 4.43ก และ ข

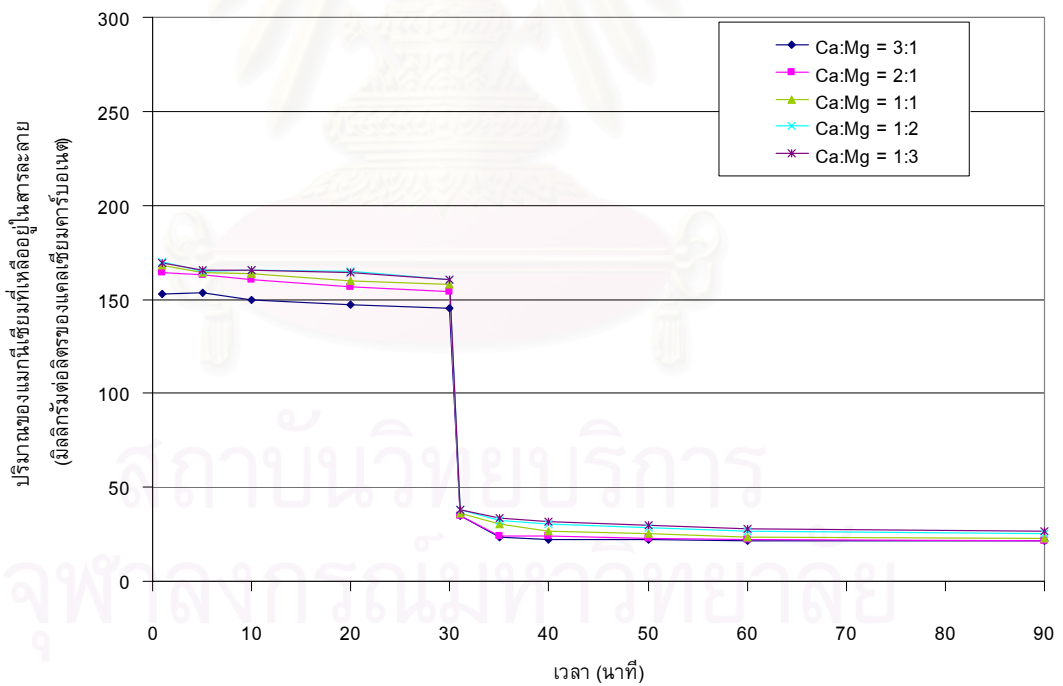
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมไอออนที่สมดุลในสารละลายตามสมการที่ 4.16 พบว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายคงที่ทำให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ค่า pH ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.2ก มีค่าใกล้เคียงกันทำให้ปริมาณคาร์บอเนตไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน

ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อธิบายได้ว่าเมื่อพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายตามสมการที่ 4.25 พบว่าเมื่อค่าไอออนิกสเตรงท์ในสารละลายมีค่าคงที่ส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.2ก พบว่าค่า pH มีค่าใกล้เคียงกันทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่สมดุลอยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.43ก และ ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ปริมาณแคลเซียมไอออน

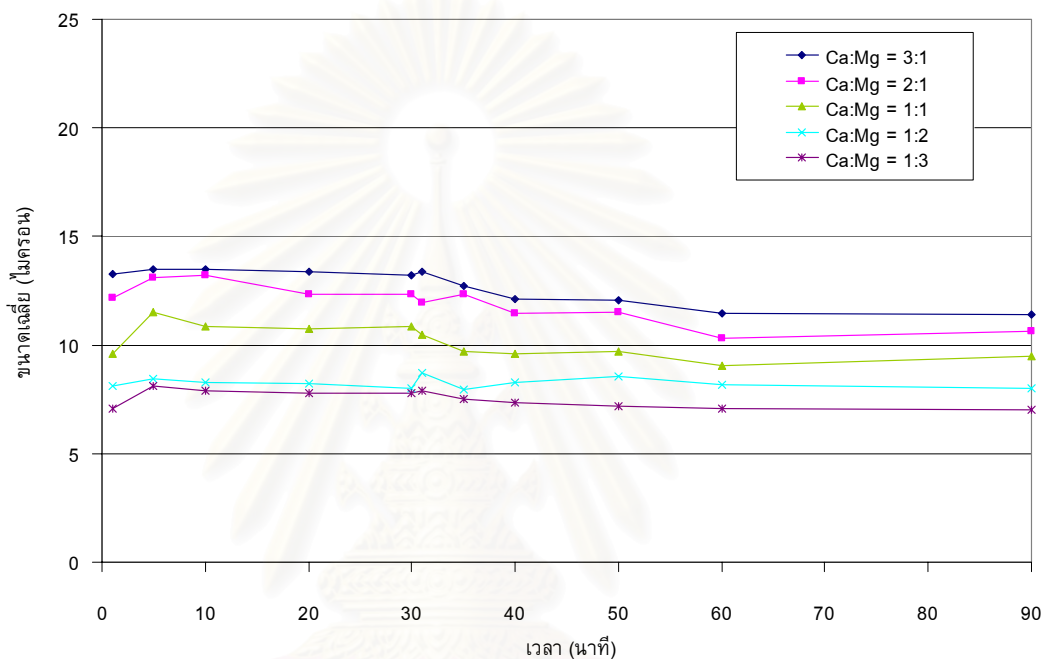


(ข) ปริมาณแมกนีเซียมไอออน

รูปที่ 4.43 ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

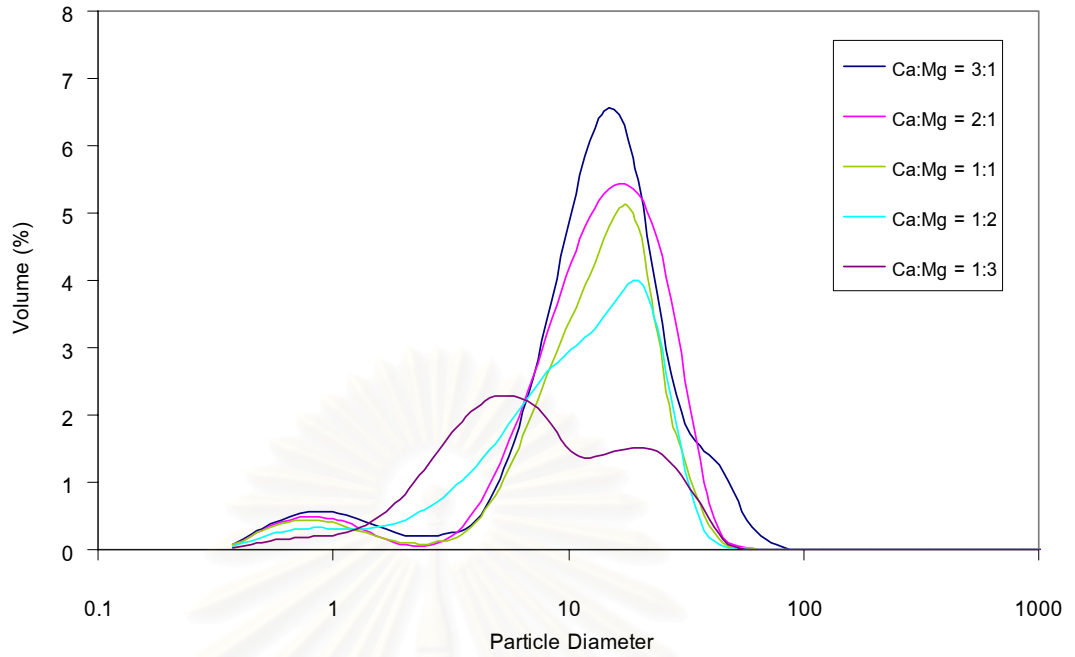
ง. ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน

เมื่อนำตะกอนร่วมมาทำการวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันจะมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ ช่วงแรกในการเกิดตะกอนขนาดของตะกอนจะค่อนข้างเล็กแต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของตะกอนจะใหญ่ขึ้นเล็กน้อย และมีขนาดคงที่และขนาดจะลดลงอีกครั้งหลังการปรับ pH ดังแสดงในรูปที่ 4.44

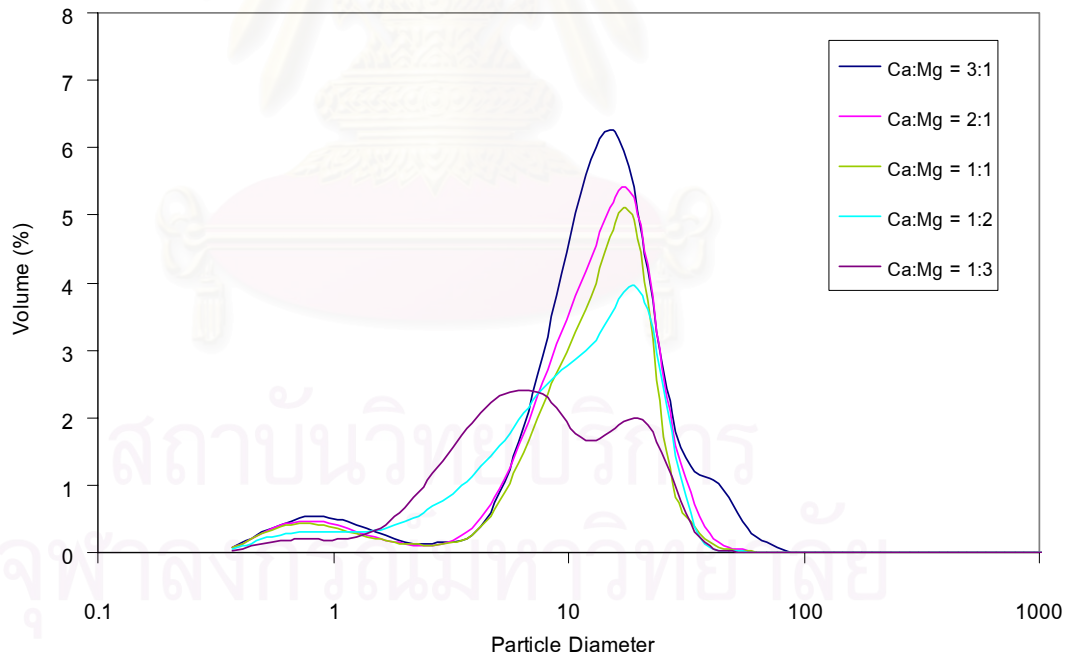


รูปที่ 4.44 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของตะกอนร่วมที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกันพบว่าขนาดเฉลี่ยของตะกอนร่วมมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในปฏิกิริยาของการเกิดตะกอนนั้นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากกว่า จึงส่งผลให้ผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตมีโอกาสนในการชนแล้วเกิดการรวมตัวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้สามารถแสดงการกระจายขนาดของตะกอนร่วมดังรูปที่ 4.45



ก่อนปรับค่า pH (นาทีที่ 30)



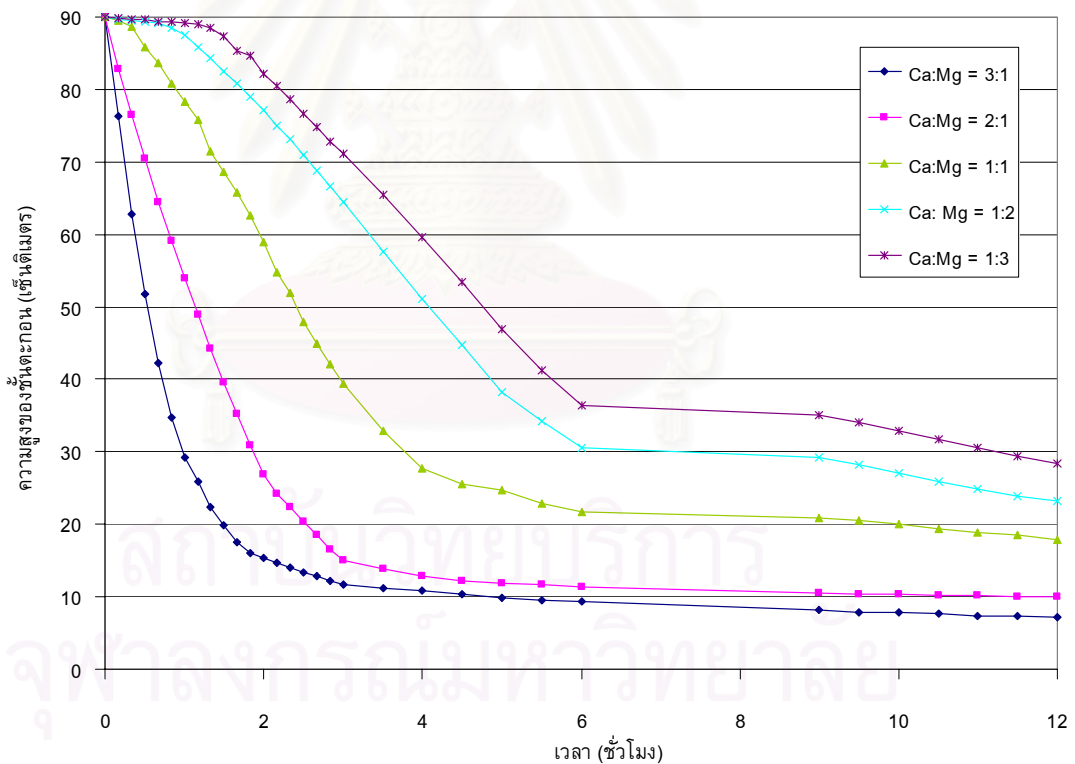
หลังปรับค่า pH (นาทีที่ 60)

รูปที่ 4.45 การกระจายขนาดของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

จะเห็นว่าที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมสูงการกระจายขนาดของอนุภาคจะอยู่ในช่วงที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากกว่าช่วงอนุภาคขนาดเล็ก และเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมต่ำลงขนาดของอนุภาคจะวัดได้อยู่ในช่วงที่มีอนุภาคขนาดเล็กเป็นจำนวนมากกว่า

จ. ความเร็วของการตกตะกอน

จากการทดลองตกตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กันมาทำการวัดความเร็วในการตกตะกอนพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นสูงขึ้นความเร็วในการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาขนาดของตะกอนร่วมในหัวข้อ 4.3.2ง. พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นมีค่าสูงนั้นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีโอกาสรวมตัวกันมากขึ้น ทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้นดังนั้นความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 6%)

เมื่อพิจารณาปริมาณชั้นตะกอนของตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นสูงขึ้น ปริมาณชั้นตะกอนจะน้อยลงเนื่องจากผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีปริมาณมากกว่า จึงมีการกอดตัวของชั้นตะกอนมาก

นอกจากนี้ทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นของอนุภาคซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความเร็วในการตกตะกอน โดยสมมติให้อนุภาคเป็นทรงกลมจะได้ว่าสามารถคำนวณจากสมการของ Stoke (Stoke's equation) ซึ่งความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคจะสัมพันธ์กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคดังนี้ (Warren, 1993)

$$v_t \equiv \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \quad (4.28)$$

- 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 ความหนืดของของเหลว

จากสมการที่ 4.28 จะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของอนุภาคได้ โดยรู้ค่าตัวแปรตัวอื่นๆ ในที่นี้กำหนดให้ของเหลวมีคุณสมบัติเป็นน้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1000 kg/m^3 และมีค่าความหนืดเท่ากับ 0.8954 cP (เท่ากับ $0.8954 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$) ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสามารถนำค่าจากการทดลอง (ตารางที่ 3.1 ภาคผนวก ง) ใช้ในการคำนวณ และค่าความเร็วในการตกตะกอนสามารถคำนวณได้จากระดับความสูงของตะกอนต่อเวลา (ตารางที่ 3.2 ภาคผนวก ง) จากการคำนวณจะได้ว่าความหนาแน่นของอนุภาคที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3 มีค่าเท่ากับ $1,238.4 \text{ kg/m}^3$, $1,229.8 \text{ kg/m}^3$, $1,207.5 \text{ kg/m}^3$, $1,192.6 \text{ kg/m}^3$ และ $1,177.6 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ

จากการคำนวณหาความหนาแน่นของอนุภาคที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นของอนุภาคมาก เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่เป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและเมื่อมีการดูดจับกันระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและผลึกแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ก็จะมีผลให้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคมีค่ามากกว่าที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่ำ

ประกอบกับขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่ำ ส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนสูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าสูงขึ้น นั่นคือที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น 3:1, 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3 จะมีค่าความเร็วในการตกตะกอนลดลงตามลำดับ

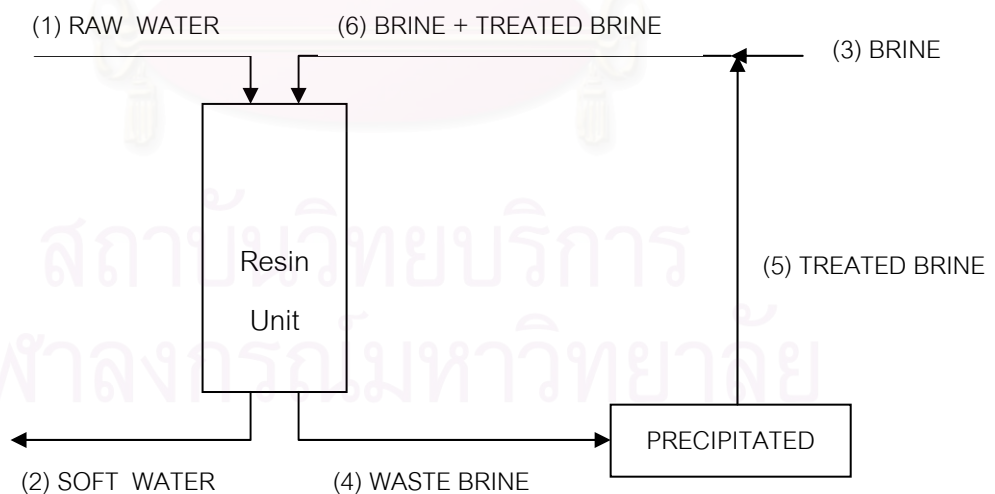


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของโซเดียมคลอไรด์ต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกันพบว่า

1. พิจารณารูปที่ 5.1 เมื่อค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการล้างคืนสภาพมีค่ามากขึ้น (จุดที่ 3) ส่งผลให้ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย (หลังจากผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดค่าความกระด้าง) มีค่ามากขึ้นเช่นกัน (จุดที่ 5) เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้การกำจัดค่าความกระด้างเป็นไปได้ยากขึ้นแม้ว่าในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นมากในการล้างคืนประจุเรซินแต่จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าผลจากค่าความเข้มข้นส่วนเกินของโซเดียมคลอไรด์ก็เป็นแฟคเตอร์ที่มีส่วนสำคัญมากในขั้นตอนการกำจัดค่าความกระด้างโดยการตกตะกอนทางเคมี ดังนั้นในการใช้งานจริงค่าความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต้องคำนึงถึงปริมาณเรซินในระบบของกระบวนการทำน้ำอ่อนและคุณภาพน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการล้างคืนสภาพเพื่อทำการคำนวณปริมาณการใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ให้เหมาะสมเพราะนอกจากจะทำให้การกำจัดค่าความกระด้างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้วยังช่วยลดปริมาณการใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการล้าง



รูปที่ 5.1 ระบบทำน้ำอ่อนและการล้างคืนประจุ

หลักการเบื้องต้นในการคำนวณหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมต่อการล้างคืนสภาพเรซินจะหาได้จากปริมาตรเรซินของระบบซึ่งข้อมูลนี้จะแตกต่างกันไปเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 10% ในอัตรา 6 ปอนด์ต่อลบ.ฟุตของเรซิน (โดยปกติจะมีข้อมูลส่วนนี้อยู่ในข้อแนะนำสำหรับการควบคุมถังเรซินให้ผู้ใช้งาน) สำหรับถังเรซินขนาด 100 ลบ.ฟุต (ความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือ = 1.069)

$$\text{จะได้น้ำหนักของเกลือที่ต้องใช้} = 6 \times 100 = 600 \text{ ปอนด์/วัฏจักร}$$

$$\text{ดังนั้นถ้าใช้น้ำเกลือเข้มข้น 10\% จะต้องใช้เกลือหนัก} = 600/0.1 = 6000 \text{ ปอนด์}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาตรของน้ำเกลือ} = 6000/(\text{ถพ.} \times 8.33 \text{ ปอนด์/แกลลอน})$$

$$= 6000/(1.069 \times 8.33) = 673 \text{ แกลลอนต่อวัฏจักร}$$

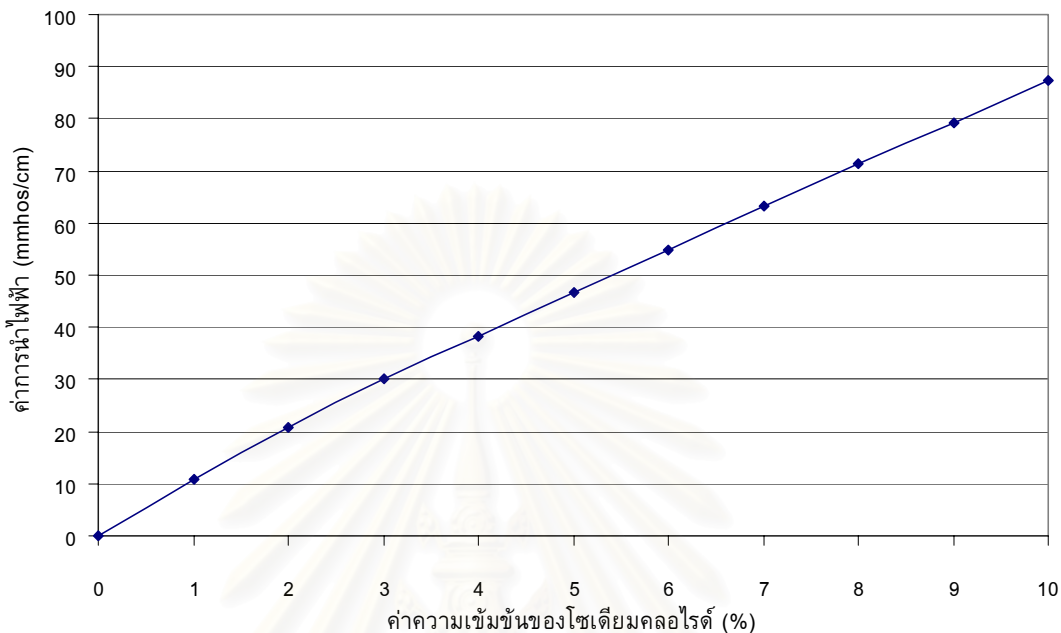
โดยทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ 10% ไว้เพื่อเป็นค่ามาตรฐาน ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการคืนสภาพเรซิน (จุดที่ 4) ให้นำไปวิเคราะห์หาปริมาณค่าความกระด้างในรูปของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารละลายเพื่อคำนวณหาปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (precipitated) ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ออกมา หลังจากทำการตกตะกอนกำจัดค่าความกระด้างแล้วทำการวัดค่าแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนในสารละลาย (จุดที่ 5) เพื่อทำการพิจารณาว่าค่าความกระด้างที่เหลืออยู่ในสารละลายอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับเมื่อมีการนำกลับมาใช้ในการล้างคืนสภาพเรซินใหม่ คุณสมบัติของน้ำสามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (ค่าแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโซเดียมคลอไรด์ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าจึงเป็นค่าบ่งชี้ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นหลัก) เพื่อทำการคำนวณได้ว่าปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เหลืออยู่ในสารละลาย (จุดที่ 5) มีความเข้มข้นเท่าใดและจะต้องเติมเกลือเพิ่มอีกเท่าใดเพื่อให้ได้โซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 10% โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์และค่าการนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 การจำแนกคุณภาพน้ำ (ณรงค์, 1997)

ความกระด้างทั้งหมด (ppm as CaCO ₃)	สภาพน้ำ
0 – 100	น้ำอ่อน
100 – 200	น้ำกระด้าง
200 - 400	น้ำกระด้างมาก

จากตารางที่ 5.1 จะได้ว่าถ้าคุณภาพน้ำมีค่าความกระด้างรวมประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตยังถือว่าเป็นสภาพของน้ำอ่อน ดังนั้นถ้าน้ำที่ผ่านกระบวนการ

ตกตะกอนมีค่าความกระด้างรวมอยู่ในช่วงนี้ก็สามารรถนำกลับมาใช้ในกระบวนการล้างคั้นประสิทธิภาพเรซิน



รูปที่ 5.2 ค่าการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (จากผลการทดลอง)

2. จากผลการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นต่างๆกัน (จุดที่ 4) พบว่าค่าแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ผ่านกระบวนการตกตะกอน (จุดที่ 5) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นคุณภาพน้ำเสีย (จุดที่ 5) ที่ผ่านการกำจัดค่าความกระด้างโดยการตกตะกอนด้วยกระบวนการทางเคมีจึงมีคุณภาพใกล้เคียงกันแม้ว่าปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้น (จุดที่ 4) จะแตกต่างกัน จะได้ว่าแนวทางการคำนวณและประยุกต์ใช้นี้สามารถใช้ได้กับคุณภาพน้ำเดิมเข้าถึงเรซินทุกๆไปได้รวมถึงคุณภาพน้ำเสีย (จุดที่ 5) ที่มีความแตกต่างของอัตราส่วนค่าความกระด้างต่างๆกันไป

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณาถึงค่า pH ของการเกิดตะกอน ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ขนาดเฉลี่ยและรูปร่างลักษณะของตะกอน ความเร็วในการตกตะกอน พบว่าผลจากความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ทำให้การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการของการเกิดตะกอนร่วมดังนี้

1. ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงจะส่งผลให้ค่า pH ของสารละลายมีค่าลดลงเนื่องจากผลจากความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (ไอออนิกสเตรงท์) ในระบบจะเป็นตัวที่มีผลต่อค่าสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนมากขึ้นส่งผลให้ค่า pH ต่ำลง และเมื่อผ่านกระบวนการกำจัดค่าความกระด้างจะได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงจะมีปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมมากขึ้นด้วยเนื่องจากค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ต่ำลงส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอเนตไอออนในสารละลายมีค่าลดลงทำให้แคลเซียมไอออนมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่สมดุลการละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ละลายได้มากขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น

2. ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงจะส่งผลให้การตกตะกอนของตะกอนร่วมช้าลงเนื่องจากขนาดของตะกอนร่วมจะลดลงเพราะประจุของโซเดียมไอออน และคลอไรด์ไอออนในระบบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางในการทำปฏิกิริยาการเกิดตะกอนทำให้ปริมาณตะกอนน้อยลง ส่งผลให้การชนกันของอนุภาคเพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักมากจึงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงพบว่าปริมาณชั้นตะกอนของตะกอนร่วมจะมากกว่าที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่ำ เนื่องจากขนาดของตะกอนมีขนาดเล็กและเบาการกอดอัดของชั้นตะกอนจึงน้อยกว่า ส่งผลให้ความสูงของชั้นตะกอนมากกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะ

ทำการศึกษเพิ่มเติมโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของการกวนระหว่างกระบวนการเกิดตะกอนโดยจะใช้ความเร็วรอบที่สูงในช่วงแรกของการเกิดตะกอนซึ่งจะมีผลให้ผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีปริมาณมากขึ้น แล้วทำการลดความเร็วรอบของการกวนลงซึ่งจะมีผลให้การรวมตัวระหว่างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น ด้วยกระบวนการดังกล่าวอาจทำให้ตะกอนร่วมมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของการตกตะกอนสูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ไชยพันธ์์ แท่งทอง, “การศึกษาการตกตะกอนร่วมของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์”, *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2545.
- ณรงค์ วุทธเสถียร, *การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม*, 2540.
- มันสิน ตันทุลเวศม์, *วิศวกรรมการประปา เล่ม 2*, 2538.

ภาษาอังกฤษ

- 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.
- Chibowski, E.; Hotysz, L. and Szczes, A., “Time dependent changes in zeta potential of freshly precipitated calcium carbonate”, *Journal of Colloids and Surfaces*, 222 (2003) : 41-54.
- Davis, S.H., and Etzel, J.E., “Method for recovering and treating brine from water softener regeneration”, *US4207397*, (1980).
- 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.
- Kabasci, S.; Althaus, W., and Weinspach, P.M., “Batch precipitation of Calcium Carbonate from highly supersaturated solution”, *Chemical Engineering Research & Design*, 74 (1996) : 765-772.
- Karsten, O., “Ion exchange regeneration”, *US3977968*, (1976).
- Kitamura, M., “Crystallization and transformation mechanism of calcium carbonate polymorphs and the effect of magnesium ion”, *Journal of Colloid and Interface Scienc*, 236 (2001) : 318-327.
- Kobe S.; Drazic G.; Cefalas A.C., and Sarantopoulou E., “Nucleation and crystallization of CaCO₃ in applied magnetic field”, *Crystal Engineering*, (2002).
- Leentvaar, J., and Rebhun, M., “Effect of magnesium and calcium precipitation on coagulation-flocculation with lime”, *Water Research*, 16 (1982) : 655-662.
- Loewenthal, R.E., and Marais, G.V.R., “Carbonate Chemistry of Aquatic Systems: theory and Application”, *Ann Arbor Science*, (1976).

- 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.
- Mullin, J.W.; Murphy, J.D.; Sohnel O., and Spoor G., "Aging of Precipitated Magnesium Hydroxide", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 28 (1989) : 1725-1730.
- Peavy, H.S.; Rowe, D.R., and Glous, G.T., *Environmental Engineering*, McGraw Hill, (1985).
- Rousseau, R.W., *Handbook of Separation Process Technology*, John Wiley & Son, (1987).
- Snoeyink, V.L., and Jenkins, D., *Water Chemistry*, John Wiley & Son, (1987).
- Sudmalis, M., and Sheikholeslami, R., "Coprecipitation of CaCO_3 and CaSO_4 ", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78 (2000) : 21-31.
- Tai, C.Y., and Chen, P.C., "Nucleation, agglomeration and crystal morphology of calcium carbonate", *AIChE Journal*, 41 (1995) : 68-77.
- Turek, M., and Gnot, W., "Precipitation of magnesium Hydroxide from Brine", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 34 (1995) : 244-250.
- Van Vuuren, L.R.J.; Stander, G.J.; Henzen, M.R.; Meiring, P.G.J., and Van Blerk, S.H.V., "Advanced purification of sewage work effluent using a combined system of lime softening and flotation", *Water Research*, (1967) : 463-474.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.
การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการทดลองกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามหน่วยการวิเคราะห์น้ำมาตรฐาน

ยกตัวอย่างการคำนวณหาสารเคมีที่ต้องใช้ในกระบวนการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการเตรียมจากแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$, มวลโมเลกุลเท่ากับ 147.02) และโซเดียมคาร์บอเนตแอนดไฮไดรส์ (Na_2CO_3 , มวลโมเลกุลเท่ากับ 106)

เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลาย $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ คำนวณได้จาก

$$M = \frac{\text{น้ำหนักตัวถูกละลาย} \times 1,000}{\text{มวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย} \times \text{ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเตรียม}}$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นเป็นโมลาร์

น้ำหนักตัวถูกละลาย (หน่วยเป็นกรัม)

ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเตรียม (หน่วยเป็นมิลลิลิตร)

จะได้ว่า น้ำหนักตัวถูกละลายหน่วยเป็นกรัม = $[(0.18M) \times (147.02) \times (500 \text{ ml})] / (1,000) = 13.23$ กรัม ดังนั้นต้องใช้ $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ หนัก 13.23 กรัมละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ในทำนองเดียวกันทำการเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลาย Na_2CO_3 คำนวณได้จาก

น้ำหนักตัวถูกละลายหน่วยเป็นกรัม = $[(0.18 M) \times (106) \times (500 \text{ ml})] / (1,000) = 9.54$ กรัม ดังนั้นต้องใช้ Na_2CO_3 หนัก 9.54 กรัมละลายในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก.1.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียมและโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้นเทียบเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ จำนวน 13.23 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต Na_2CO_3 จำนวน 9.54 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร นอกจากนี้ในการทดลองยังมีการใช้สารละลายของกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% โดยน้ำหนักจำนวน 83 มิลลิลิตร มาเจือจางด้วยน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเตรียมจากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร

ก.1.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัม ในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.2 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.06 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตรจากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

ก.3 การศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ก.3.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียม โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 4%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.40 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 13.23 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 11.7 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มี

ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 6%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 13.23 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 8%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 80,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.80 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 13.23 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 23.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.3.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 4%

เตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.40 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 11.7 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 6%

เตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 8%

เตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 80,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.80 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการ

ละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 23.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.4 การศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้นต่าง ๆ

ก.4.1 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

วิธีการเตรียมสารละลายของแคลเซียม โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 13.23 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 9.54 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร
2. ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500

มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.06 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 4.41 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 3.18 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.4.2 กระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียม โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 18,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 18.297 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 7.2 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

2. ความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่ 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 12.198 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออน โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 4.8 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร
3. ความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.06 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตรเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 500 มิลลิลิตรจากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

ก.5 การศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่อการเกิดตะกอนและตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

วิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 4%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 6,000 และ 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับโดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 0.06 และ 0.40 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 11.7 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

2. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 6%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 6,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 0.06 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์

จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัม ในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัม ในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

3. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 8%

เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 6,000 และ 80,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 0.06 และ 0.80 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 23.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับ แคลเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัม ในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไอออนโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัม ในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

ก.6 การศึกษาค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่มีผลต่ออัตราส่วนความเข้มข้นของ แคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นในกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอน ร่วม

วิธีการวิธีการเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 3:1
เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 13,500 4,500 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.135 0.045 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 9.923 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 4.574 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.27 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 7.175 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 1.8 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

2. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 2:1
เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12,000 6,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 0.06 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 8.82 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 6.099 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 6.36 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.24 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

3. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:1
- เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 9,000 9,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.09 0.09 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 6.615 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 9.149 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 4.77 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.36 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 2.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร
4. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:2
- เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6,000 12,000 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.06 0.12 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 4.41 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 12.198 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 3.18 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.48 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 4.8 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

5. อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นเท่ากับ 1:3
- เตรียมสารละลายผสมของแคลเซียม แมกนีเซียมและโซเดียมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4,500 13,500 และ 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.045 0.135 และ 0.60 โมลาร์ตามลำดับจำนวน 500 มิลลิลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 3.308 กรัม แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 13.273 กรัมและโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จำนวน 17.55 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นพอดีกับการเกิดปฏิกิริยา โดยเตรียมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 2.385 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.54 โมลาร์ จำนวน 250 มิลลิลิตร จากการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) จำนวน 5.4 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 250 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ข. วิธีการวิเคราะห์

ข.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารละลาย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 Atomic Absorption Spectrophotometer ของบริษัท Instrument Laboratory Inc.
รุ่น IL 551

2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2.1 แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) ของบริษัท CARLO ERBA ชนิด
Analytical grade

2.2 แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ของบริษัท UNIVAR ชนิด
Analytical grade

2.3 น้ำ DI

3. วิธีการทดลอง

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียมและแมกนีเซียมเพื่อใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) ในการวัดความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคลเซียมเพื่อใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) โดยทำการเตรียมสารละลายของแคลเซียมที่มีความเข้มข้น 5 ค่าคือ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในขั้นแรกทำการเตรียมสารละลายของแคลเซียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการละลายแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) จำนวน 0.36 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมา 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 มิลลิลิตรมาเจือจางด้วยน้ำ DI และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานของแคลเซียมที่มีความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ข. การเตรียมสารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียม

เตรียมสารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียมเพื่อใช้ในการทำเส้นโค้งมาตรฐาน (standard curve) โดยทำการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้น 5 ค่าคือ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในขั้นแรกทำการเตรียมสารละลายของแมกนีเซียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการละลายแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 0.836 กรัมในน้ำ DI แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมา 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 มิลลิลิตรมาเจือจางด้วยน้ำ DI และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานของแมกนีเซียมที่มีความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

- 3.2 นำสารละลายมาตรฐานและสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปทำการวัดความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยวิธีการใช้เครื่องมือจะปฏิบัติตามคู่มือการใช้ ซึ่งค่าที่วัดได้จากเครื่องจะนำมาคูณด้วย 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 นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำการวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค โดยเลือกใช้อุปกรณ์การวัดขนาดแบบ Micro Volume Module และเลือกสมการที่ใช้คำนวณขนาดของอนุภาคเป็น Fraunhofer Model โดยวิธีการใช้เครื่องมือจะปฏิบัติตามคู่มือการใช้
- 2.2 ทำการบันทึกผลของการวิเคราะห์ที่ได้เป็นขนาดเฉลี่ยของอนุภาคและกราฟการกระจายขนาดของตะกอน

ภาคผนวก ค.

การคำนวณความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่วัดได้จากเครื่อง Atomic Absorbance Spectrophotometer จะอยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนหน่วยดังกล่าวให้อยู่ในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยสามารถหาได้จาก

ความเข้มข้นของไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)

$$= \text{ความเข้มข้นของไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times \frac{50}{\text{น้ำหนักเทียบเท่าของไอออน}}$$

โดย น้ำหนักเทียบเท่าของไอออน

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

ซึ่งในกรณีของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 ดังนั้น

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดลอง

ง.1 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต

ง.1.1 ผลของโซเดียมคลอไรด์

ผลจากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ง.1 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.76	7.65	7.71	7.69	7.60	7.65	7.61	7.62	7.62	7.45	7.50	7.48
1	9.42	9.38	9.40	9.15	9.12	9.14	8.95	8.97	8.96	8.90	8.93	8.92
5	8.53	8.47	8.50	8.44	8.31	8.38	8.09	8.13	8.11	8.07	8.15	8.11
10	8.43	8.35	8.39	8.21	8.18	8.20	7.98	8.03	8.01	7.95	7.92	7.94
20	8.42	8.34	8.38	8.20	8.17	8.19	7.96	8.02	7.99	7.94	7.91	7.93
30	8.40	8.34	8.37	8.18	8.15	8.17	7.94	7.98	7.96	7.93	7.90	7.92
31	11.12	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12	11.11	11.13	11.12	11.12	11.12	11.12
35	11.12	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12	11.11	11.13	11.12	11.13	11.12	11.13
40	11.12	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.12	11.13
50	11.13	11.12	11.13	11.13	11.11	11.12	11.12	11.12	11.12	11.14	11.12	11.13
60	11.13	11.12	11.13	11.13	11.11	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.11	11.12
90	11.13	11.12	11.13	11.13	11.11	11.12	11.12	11.11	11.12	11.13	11.11	11.12

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.2 ค่าการนำไฟฟ้าของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของ
โซเดียมคลอไรด์ต่างกัน (mmho/cm)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	33.6	36.7	35.2	67.6	68.0	67.8	90.4	85.5	88.0	96.6	98.5	97.6
1	21.1	21.2	21.2	46.0	45.2	45.6	55.4	54.1	54.8	58.9	60.0	59.5
5	20.7	21.1	20.9	45.1	44.3	44.7	54.5	52.2	53.4	58.6	59.9	59.3
10	20.6	21.2	20.9	44.8	44.2	44.5	54.3	52.3	53.3	58.7	59.9	59.3
20	20.6	21.2	21.0	44.3	44.2	44.3	54.3	52.1	53.2	58.7	59.9	59.3
30	20.8	21.2	21.8	44.0	44.1	44.1	54.3	52.0	53.2	58.7	59.9	59.3
31	21.3	22.2	21.8	45.9	46.4	46.2	55.7	53.2	54.5	58.7	61.8	60.3
35	21.3	22.2	21.7	45.9	46.4	46.2	55.7	53.2	54.5	58.6	61.8	60.2
40	21.2	22.2	21.6	45.9	46.4	46.2	55.6	53.1	54.4	58.4	61.4	59.9
50	21.0	22.2	21.6	45.8	46.3	46.1	55.5	53.1	54.3	58.1	61.4	59.8
60	21.0	22.1	21.6	45.6	46.2	45.9	55.5	53.0	54.3	58.1	61.4	59.8
90	20.8	22.1	21.6	45.4	46.1	45.8	55.4	52.9	54.2	58.0	61.3	59.7

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.3 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000
1	280.5	276	278.3	288.0	282.5	285.3	307.5	314.5	311.0	330.0	364.5	347.3
5	224.0	219	221.5	226.0	221.5	223.8	259.5	282.5	271.0	323.5	341.0	332.3
10	219.5	214.5	217.0	225.0	220.0	222.5	256.5	259.0	257.8	321.0	329.0	325.0
20	217.0	208.0	212.5	219.0	211.5	215.3	241.0	258.0	249.5	318.0	322.0	320.0
30	196.5	190.0	193.3	212.5	200.0	206.3	214.0	224.0	219.0	291.0	304.5	297.8
31	88.0	85.0	86.5	92.0	89.5	90.8	100.0	103.0	101.5	123.0	138.5	130.8
35	86.0	79.0	82.5	89.0	82.5	85.8	94.5	99.5	97.0	107.0	129.5	118.3
40	80.0	73.5	76.8	85.0	85.0	85.0	90.0	94.5	92.3	101.0	124.0	112.5
50	77.5	70.0	73.8	81.5	79.0	80.3	83.5	91.0	87.3	98.5	120.0	109.3
60	70.5	65.5	68.0	77.0	76.0	76.5	82.0	88.0	85.0	90.5	111.5	101.0
90	67.5	61.5	64.5	68.0	62.5	65.3	70.5	76.5	73.5	85.0	98.5	91.8

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.4 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
ต่าง ๆ กัน (ไมครอน)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	19.75	21.31	20.53	17.64	18.90	18.27	18.45	15.95	17.2	15.99	13.39	16.69
5	22.19	24.45	23.32	24.21	19.91	22.06	19.67	20.87	20.27	18.24	19.98	19.11
10	25.44	28.46	26.95	24.95	21.69	23.32	21.32	22.80	22.06	20.57	19.97	20.27
20	26.78	28.20	27.49	25.10	24.94	20.02	24.66	22.90	23.78	25.42	21.92	23.67
30	27.32	32.78	30.05	27.96	25.94	26.95	24.48	27.46	25.97	25.66	21.00	23.33
31	29.58	31.30	30.54	28.63	27.29	27.96	25.59	26.45	26.02	26.11	22.37	24.24
35	27.21	31.93	29.57	28.52	23.42	25.97	25.81	27.49	26.65	22.78	25.44	24.11
40	26.08	31.46	28.77	26.42	21.14	23.78	23.97	24.07	24.02	23.2	22.62	22.91
50	29.51	31.59	30.55	29.28	24.12	26.7	24.13	25.95	25.04	23.59	21.11	22.35
60	30.12	33.86	31.99	26.54	28.94	27.74	22.05	21.97	22.01	20.82	17.28	19.05
90	29.28	31.82	30.55	29.77	26.15	27.96	25.63	27.35	26.49	24.01	23.55	23.78

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.5 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน (cm)

เวลา	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 hr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 10min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 20min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 30min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 40min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 50min	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
2hr 10min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
2hr 20min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
2hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
2hr 40min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
2hr 50min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
3hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
3hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
4hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
4hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
5hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
5hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
6hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
9hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
9hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
10hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
10hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
11hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
11hr 30min	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
12hr	1.7	1.5	1.6	1.8	1.8	1.8	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ง.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่โซเดียมคลอไรด์ 6%

ผลจากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ง.6 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น
ต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.61	7.62	7.62	7.7	7.68	7.69	7.78	7.8	7.79
1	8.95	8.97	8.96	9.98	9.89	9.94	10.03	10.08	10.06
5	8.09	8.13	8.11	8.81	8.76	8.79	9.80	9.80	9.80
10	7.98	8.03	8.01	8.58	8.50	8.54	9.00	9.02	9.01
20	7.96	8.02	7.99	8.56	8.48	8.52	8.98	8.98	8.98
30	7.94	7.98	7.96	8.55	8.48	8.52	8.96	8.97	8.97
31	11.11	11.13	11.12	11.11	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12
35	11.11	11.13	11.12	11.13	11.13	11.13	11.12	11.13	11.13
40	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.13	11.12	11.13	11.13
50	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12
60	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.11	11.12	11.12
90	11.12	11.11	11.12	11.12	11.11	11.12	11.1	11.12	11.11

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.7 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (mmho/cm)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90.4	85.5	88.0	74.9	75.2	75.1	66.3	68.1	67.2
1	55.4	54.1	54.8	45.3	46.4	45.9	37.5	38.2	37.9
5	54.5	52.2	53.4	45.4	46.3	45.9	38.0	38.0	38.0
10	54.3	52.3	53.3	45.4	46.3	45.9	38.0	37.8	37.9
20	54.3	52.1	53.2	45.5	46.3	45.9	37.5	37.8	37.7
30	54.3	52.0	53.2	45.5	46.2	45.9	37.0	37.4	37.2
31	55.7	53.2	54.5	46.2	47.1	46.7	37.8	38.1	38.0
35	55.7	53.2	54.5	46.2	47.1	46.7	37.8	38.1	38.0
40	55.6	53.1	54.4	46.2	47.0	46.6	37.8	38.0	37.9
50	55.5	53.1	54.3	46.0	46.9	46.5	37.7	38.0	37.9
60	55.5	53.0	54.3	46.0	46.9	46.5	37.7	37.9	37.8
90	55.4	52.9	54.2	46.0	46.7	46.4	37.7	37.9	37.8

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.8 ค่าแคลเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต
ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	1,2000	12,000	12,000	6,000	6,000	6,000
1	307.5	314.5	311.0	260.5	250.8	255.6	152.5	160.0	156.3
5	259.5	282.5	271.0	244.0	230.5	237.3	140.0	147.5	143.8
10	256.5	259.0	257.8	225.0	220.0	222.5	132.0	138.0	135.0
20	241.0	258.0	249.5	218.0	210.0	214.0	128.0	132.5	130.3
30	214.0	224.0	219.0	209.5	202.8	206.1	126.0	130.0	128.0
31	100.0	103.0	101.5	82.0	74.5	78.3	35.0	40.75	37.8
35	94.5	99.5	97.0	82.0	72.5	77.3	36.5	38.0	37.3
40	90.0	94.5	92.3	78.5	70.0	74.3	38.0	37.5	37.8
50	83.5	91.0	87.3	80.5	72.0	76.3	34.0	38.0	36.0
60	82.0	88.0	85.0	72.0	68.0	70.0	34.5	36.8	36.6
90	70.5	76.5	73.5	70.0	62.8	66.4	34.0	35.0	34.5

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.9 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น
ต่าง ๆ กัน (ไมครอน)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	18.45	15.95	17.20	22.71	18.37	20.54	28.76	29.68	29.22
5	19.67	20.87	20.27	23.43	19.19	21.31	30.72	30.16	30.44
10	21.32	22.80	22.06	21.67	23.89	22.78	31.90	30.47	31.19
20	24.66	22.90	23.78	26.11	24.97	25.54	33.23	31.19	33.23
30	24.48	27.46	25.97	25.47	27.73	26.60	33.45	31.43	33.45
31	25.59	26.45	26.02	27.66	27.44	27.55	34.51	34.73	34.51
35	25.81	27.49	26.65	27.45	27.15	27.30	36.23	34.91	36.23
40	23.97	24.07	24.02	27.13	29.49	28.31	36.55	34.81	36.55
50	24.13	25.95	25.04	27.22	29.54	28.38	33.42	32.42	33.42
60	22.05	21.97	22.01	25.61	27.79	26.70	35.73	33.69	35.73
90	25.63	27.35	26.49	28.13	30.31	29.22	34.22	32.88	34.22

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.10 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แคลเซียมคาร์บอเนตที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน (cm)

เวลา	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 hr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 10min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 20min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 30min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 40min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1hr 50min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
2hr 10min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
2hr 20min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
2hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
2hr 40min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
2hr 50min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
3hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
3hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
4hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
4hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
5hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
5hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
6hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
9hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
9hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
10hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
10hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
11hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
11hr 30min	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6
12hr	2.3	2.3	2.3	1.2	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ง.2 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

ง.2.1 ผลของโซเดียมคลอไรด์

ผลจากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ง.11 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.90	7.85	7.88	7.80	7.83	7.82	7.88	7.90	7.89	7.96	7.86	7.91
1	10.56	10.48	10.52	10.62	10.55	10.59	10.60	10.50	10.55	10.68	10.59	10.64
5	10.5	10.45	10.48	10.46	10.5	10.48	10.52	10.45	10.49	10.56	10.50	10.53
10	10.43	10.4	10.42	10.40	10.44	10.42	10.45	10.40	10.43	10.48	10.40	10.44
20	10.35	10.32	10.34	10.34	10.38	10.31	10.30	10.25	10.28	10.39	10.32	10.36
30	10.28	10.25	10.27	10.26	10.30	10.28	10.22	10.20	10.21	10.30	10.28	10.29
31	11.14	11.12	11.13	11.11	11.11	11.11	11.09	11.12	11.11	11.14	11.12	11.13
35	11.13	11.12	11.13	11.11	11.12	11.12	11.09	11.12	11.11	11.13	11.11	11.12
40	11.12	11.11	11.12	11.10	11.12	11.11	11.09	11.12	11.11	11.12	11.11	11.12
50	11.12	11.11	11.12	11.10	11.12	11.11	11.09	11.12	11.11	11.09	11.10	11.1
60	11.11	11.11	11.11	11.10	11.10	11.10	11.09	11.12	11.11	11.07	11.10	11.09
90	11.10	11.10	11.10	11.09	11.10	11.10	11.09	11.10	11.11	11.07	11.10	11.09

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.12 ค่าการนำไฟฟ้าของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน (mmho/cm)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	33.6	34.2	33.9	62.4	60.8	61.6	82.1	81.1	81.6	92.5	95.5	94.0
1	20.8	21.2	21.1	42.6	41.8	42.2	51.3	50.7	51.0	56.4	57.8	57.1
5	20.8	21.2	21.1	42.6	41.9	42.3	51.1	50.6	50.9	56.6	57.3	57.0
10	20.7	21.2	21.0	42.6	41.9	42.3	51.1	49.5	50.3	56.3	57.0	56.7
20	20.7	21.2	21.0	42.7	41.7	42.2	51.0	49.5	50.3	56.4	57.1	56.8
30	20.7	21.1	20.9	42.7	41.7	42.2	51.0	49.5	50.3	56.4	57.0	56.7
31	21.1	22.2	21.7	44.0	43.0	43.5	52.2	50.9	51.6	58.9	59.2	59.1
35	21.1	22.2	21.7	44.0	43.0	43.5	52.2	50.9	51.6	60	59.0	59.1
40	21.1	22.2	21.7	43.8	43.0	43.4	52.1	50.9	51.5	58.8	59.1	59.0
50	21.0	22.2	21.6	43.9	42.9	43.4	52.0	50.7	51.4	58.8	59.1	59.0
60	20.9	22.2	21.6	43.9	42.9	43.4	52.0	50.7	51.4	58.8	59.0	59.0
90	20.9	22.1	21.5	43.8	42.8	43.3	52.0	50.7	51.4	58.7	59.0	58.9

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ 13 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000
1	126.8	123.2	124.9	139.9	148.6	144.3	159.9	161.5	160.7	171.4	167.9	169.7
5	117.5	113.9	115.7	118.3	123.2	120.7	129.5	139.4	134.5	167.3	165.8	166.5
10	96.8	92.3	94.6	108.9	114.8	111.9	125.4	131.2	128.3	155.8	144.5	150.1
20	89.4	85.4	87.4	107.7	113.9	110.9	125.0	126.8	125.9	139.4	134.9	137.3
30	86.9	81.6	84.3	96.8	100.0	98.4	111.9	113.9	112.9	139.9	133.9	136.9
31	26.2	25.4	25.8	28.9	29.3	29.1	34.4	35.3	34.8	41.0	39.2	40.1
35	18.6	17.7	18.6	19.9	21.1	20.5	21.8	23.8	22.8	33.6	31.2	32.4
40	17.9	16.3	17.1	18.3	19.9	19.1	21.1	22.9	22.1	29.2	26.7	27.9
50	16.1	15.6	15.8	17.9	18.9	18.5	22.9	21.1	22.0	28.2	26.2	27.2
60	15.8	15.4	15.6	15.8	18.4	17.1	19.4	21.2	20.3	26.3	25.4	25.9
90	14.8	14.6	14.7	15.4	18.6	16.9	18.9	19.9	19.4	26.7	25.4	26.1

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.14 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน (ไมครอน)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	6.17	5.13	5.65	5.66	5.32	5.49	3.89	3.75	3.82	3.05	2.87	2.96
5	6.49	7.11	6.80	6.11	7.47	6.79	4.06	4.09	4.07	3.47	3.61	3.54
10	5.84	7.16	6.50	5.47	5.85	5.66	3.84	4.01	3.92	3.92	2.10	3.01
20	6.92	5.82	6.37	5.68	5.30	5.49	4.07	3.78	3.93	3.01	2.73	2.87
30	6.01	6.33	6.17	5.43	4.77	5.10	4.19	2.99	3.59	2.75	3.03	2.89
31	6.22	5.38	5.80	5.16	4.77	5.10	3.54	3.66	3.60	2.66	3.20	2.93
35	6.17	4.51	5.31	5.07	4.69	4.88	3.45	3.75	3.60	3.22	2.70	2.96
40	5.74	4.40	5.07	5.95	3.30	4.63	3.76	3.84	3.80	3.17	2.67	2.92
50	5.61	4.89	5.25	4.88	4.52	4.70	3.49	3.71	3.60	2.76	2.92	2.84
60	4.70	5.10	4.90	4.57	4.63	4.60	3.32	3.08	3.20	3.08	2.56	2.82
90	5.23	4.17	4.70	4.47	3.91	4.19	3.01	2.79	2.90	3.12	2.62	2.87

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.15 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างกัน (cm)

เวลา	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
20 min	89.8	89.9	89.9	89.8	89.8	89.8	89.8	89.8	89.8	89.8	89.7	89.8
30 min	89.8	89.9	89.9	89.6	89.7	89.7	89.8	89.7	89.8	89.7	89.6	89.7
40 min	89.7	89.6	89.7	89.5	89.5	89.5	89.7	89.7	89.7	89.7	89.6	89.7
50 min	89.5	89.5	89.5	89.4	89.5	89.5	89.5	89.7	89.6	89.6	89.6	89.6
1 hr	89.1	89.1	89.1	89.4	89.3	89.4	89.5	89.4	89.5	89.5	89.5	89.5
1hr 10min	88.5	88.6	88.6	89.3	89.2	89.3	89.3	89.4	89.4	89.4	89.5	89.5
1hr 20min	88.0	87.8	87.9	89.2	89.1	89.2	89.1	89.2	89.2	89.2	89.3	89.3
1hr 30min	87.0	86.7	86.9	89.0	88.4	88.7	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0	89.0
1hr 40min	86.0	85.8	85.9	88.4	87.8	88.1	88.9	88.8	88.9	88.7	88.8	88.8
1hr 50min	84.9	84.2	84.6	87.5	86.9	87.2	88.6	88.1	88.4	88.4	88.5	88.5
2hr	83.5	83.1	83.3	86.3	86.0	86.2	87.8	87.0	87.4	87.8	88.2	88.0
2hr 10min	81.8	81.0	81.4	85.0	83.9	84.5	87.0	86.2	86.6	87.1	87.5	87.3
2hr 20min	80.9	80.2	80.6	83.7	82.6	83.2	86.0	85.1	85.6	86.2	87.0	86.6
2hr 30min	79.6	79.1	79.4	82.8	82.0	82.4	85.0	84.2	84.6	85.3	86.1	85.7
2hr 40min	78.0	77.7	77.9	82.2	81.1	81.7	83.8	83.1	83.5	84.2	84.5	84.4
2hr 50min	76.5	76.0	76.3	79.3	78.5	78.9	82.8	82.1	82.5	83.0	83.9	83.5
3hr	74.9	74.1	74.5	77.7	76.9	77.3	81.5	80.9	81.2	81.8	82.6	82.2
3hr 30min	69.8	68.9	69.4	72.5	71.8	72.2	73.8	72.3	73.1	79.5	80.3	79.9
4hr	64.5	63.8	64.2	67.5	66.9	67.2	69.8	68.6	69.2	72.1	73.7	72.9
4hr 30min	58.2	58.0	58.1	60.3	59.8	60.1	64.5	63.6	64.1	68.4	69.1	68.8
5hr	52.7	52.2	52.5	53.1	52.6	52.9	58.2	57.1	57.7	61.3	62.4	61.9
5hr 30min	47.5	46.9	47.2	48.4	47.6	48.0	52.7	50.9	51.8	54.9	55.8	55.4
6hr	40.4	40.0	40.2	42.0	40.0	41.0	48.3	47.6	48.0	50.8	51.3	51.1
9hr	27.1	26.8	27.0	29.0	28.7	28.9	40.4	39.7	40.1	42.0	42.5	42.3
9hr 30min	26.5	26.2	26.4	28.6	28.4	28.5	36	35.6	35.8	38.0	38.3	38.2
10hr	25.8	25.6	25.7	28.2	28.0	28.1	35.1	34.7	34.9	37.3	37.9	37.6
10hr 30min	25.0	24.9	25.0	28.0	27.9	28.0	34.0	33.5	33.8	36.5	36.7	36.6
11hr	24.5	24.2	24.4	27.4	27.1	27.3	32.8	33.0	32.9	36.0	36.4	36.2
11hr 30min	24.0	23.8	23.9	26.7	26.9	26.8	30.2	30.6	30.4	35.0	35.2	35.1
12hr	23.7	23.5	23.6	25.6	25.2	25.4	28.1	28.3	28.2	34.5	34.8	34.7

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ง.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่โซเดียมคลอไรด์ 6%

ผลจากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากับ 18,000 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ง.16 ค่า pH ของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.88	7.9	7.89	7.85	7.80	7.83	7.7	7.8	7.75
1	10.6	10.5	10.55	10.57	10.5	10.54	10.5	10.52	10.51
5	10.52	10.45	10.49	10.45	10.42	10.44	10.4	10.45	10.43
10	10.45	10.4	10.43	10.4	10.42	10.41	10.4	10.40	10.40
20	10.3	10.25	10.28	10.32	10.27	10.30	10.25	10.30	10.28
30	10.22	10.2	10.21	10.2	10.18	10.19	10.18	10.25	10.22
31	11.09	11.12	11.11	11.12	11.11	11.12	11.13	11.12	11.13
35	11.09	11.12	11.11	11.12	11.11	11.12	11.13	11.12	11.13
40	11.09	11.12	11.11	11.12	11.11	11.12	11.13	11.12	11.13
50	11.09	11.12	11.11	11.12	11.11	11.12	11.13	11.11	11.12
60	11.09	11.12	11.11	11.11	11.1	11.11	11.12	11.11	11.12
90	11.09	11.1	11.11	11.11	11.09	11.10	11.12	11.11	11.12

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.17 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนแมงกานีสไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (mmho/cm)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	82.1	81.1	81.6	72.7	73.2	73.0	63.4	62.1	62.8
1	51.3	50.7	51.0	43.6	44.1	43.9	34.2	33.8	34.0
5	51.1	50.6	50.9	42.6	43.0	42.8	34.0	33.6	33.8
10	51.1	49.5	50.3	42.2	42.5	42.4	33.8	33.3	33.6
20	51.0	49.5	50.3	41.5	42.5	42.0	33.8	33.3	33.6
30	51.0	49.5	50.3	40.9	42.3	41.6	33.6	33.0	33.3
31	52.2	50.9	51.6	41.4	42.9	42.2	34.5	34.0	34.3
35	52.2	50.9	51.6	41.4	42.7	42.1	34.5	34.1	34.3
40	52.1	50.9	51.5	41.3	42.5	41.9	34.5	34.1	34.3
50	52.0	50.7	51.4	41.1	42.5	41.8	34.3	34.0	34.2
60	52.0	50.7	51.4	41.1	42.5	41.8	34.3	33.9	34.1
90	52.0	50.7	51.4	41.1	42.5	41.8	34.2	33.8	34.0

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.18 ค่าแมกนีเซียมไอออนที่เหลือในสารละลายของการเกิดตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	18,000	18,000	18,000	12,000	12,000	12,000	6,000	6,000	6,000
1	159.94	161.54	160.74	140.33	130.8	135.6	98.36	105.25	101.81
5	129.51	139.40	134.46	110.25	95.9	103.1	86.56	99.18	92.87
10	125.41	131.24	128.33	108.56	100.66	104.6	82.46	90.02	86.24
20	125	126.8	125.9	100.25	95.08	97.67	80.82	85.0	82.91
30	111.89	113.93	112.91	102.45	90.57	96.51	81.97	80	81.15
31	34.35	35.26	34.81	28.36	23.11	25.74	20.22	24.75	22.49
35	21.81	23.78	22.80	20.32	19.02	19.67	18.48	17.18	17.83
40	21.07	22.94	22.01	18.36	18.36	18.36	13.93	14.75	14.34
50	22.87	21.07	21.97	16.30	17.78	17.04	11.48	13.11	12.3
60	19.38	21.15	20.27	17.46	15.57	16.52	11.48	11.88	11.68
90	18.94	19.93	19.44	15.57	14.75	15.16	10.02	12.3	11.16

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.19 ขนาดเฉลี่ยของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น
ต่างๆกัน (ไมครอน)

เวลา (นาที)	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	3.89	3.75	3.82	5.13	5.45	5.29	4.74	6.04	5.39
5	4.06	4.09	4.07	5.93	6.67	6.30	7.08	6.08	6.58
10	3.84	4.01	3.92	4.62	5.98	5.31	7.3	5.66	6.50
20	4.07	3.78	3.93	4.85	5.73	5.29	6.12	6.52	6.32
30	4.19	2.99	3.59	4.76	4.64	4.70	5.98	6.02	6.00
31	3.54	3.66	3.6	4.57	4.71	4.64	5.25	6.33	5.79
35	3.45	3.75	3.6	4.32	4.7	4.51	4.6	5.32	4.96
40	3.76	3.84	3.8	3.42	5.1	4.26	4.29	5.47	4.88
50	3.49	3.71	3.6	3.97	4.91	4.44	4.45	4.97	4.71
60	3.32	3.08	3.2	4.07	4.45	4.26	4.62	4.66	4.64
90	3.01	2.79	2.9	3.92	4.44	4.18	4.39	4.49	4.44

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.20 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างๆกัน (cm)

เวลา	18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			12,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต			6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ แคลเซียมคาร์บอเนต		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	90	90	90	89.6	89.5	89.6	88.6	89	88.8
20 min	89.8	89.8	89.8	89.3	89.1	89.2	88.0	88.3	88.2
30 min	89.8	89.7	89.8	88.8	88.5	88.7	87.0	87.2	87.1
40 min	89.7	89.7	89.7	88.2	88.0	88.1	85.1	85.5	85.3
50 min	89.5	89.7	89.6	87.8	87.3	87.6	82.2	82.7	82.5
1 hr	89.5	89.4	89.5	87.2	86.9	87.1	80.2	80.6	80.4
1hr 10min	89.3	89.4	89.4	86.7	86.5	86.6	78.1	78.4	78.3
1hr 20min	89.1	89.2	89.2	86.2	86.1	86.2	76.4	76.9	76.7
1hr 30min	89.0	89.0	89.0	85.6	85.4	85.5	74.2	74.6	74.4
1hr 40min	88.9	88.8	88.9	85.1	84.8	84.9	72.0	72.5	72.3
1hr 50min	88.6	88.1	88.4	84.7	84.1	84.4	69.1	69.4	69.3
2hr	87.8	87.0	87.4	84.3	83.8	84.1	65.5	66.0	65.8
2hr 10min	87.0	86.2	86.6	83.7	83.2	83.5	62.4	62.8	62.6
2hr 20min	86.0	85.1	85.6	82.8	82.5	82.7	59.1	59.6	59.4
2hr 30min	85.0	84.2	84.6	81.7	81.1	81.4	57.0	57.3	57.2
2hr 40min	83.8	83.1	83.5	80.8	80.5	80.7	55.3	55.8	55.6
2hr 50min	82.8	82.1	82.5	79.4	79.0	79.2	52.1	52.4	52.3
3hr	81.5	80.9	81.2	78.2	78.0	78.1	48.5	49.0	48.8
3hr 30min	73.8	72.3	73.1	71.2	70.9	71.1	39.4	40.0	39.7
4hr	69.8	68.6	69.2	65.7	65.3	65.5	32.6	33.2	32.9
4hr 30min	64.5	63.6	64.1	57.8	57.2	57.5	28.2	28.7	28.5
5hr	58.2	57.1	57.7	50.6	50.0	50.3	25.1	25.5	25.3
5hr 30min	52.7	50.9	51.8	42.8	42.1	42.5	27.0	27.2	27.1
6hr	48.3	47.6	48.0	35.6	35.8	35.7	24.6	25.0	24.8
9hr	40.4	39.7	40.1	29.3	29.7	29.5	23.0	23.3	23.2
9hr 30min	36.0	35.6	35.8	28.1	28.4	28.3	22.6	22.8	22.7
10hr	35.1	34.7	34.9	27.0	27.2	27.1	22.1	22.5	22.3
10hr 30min	34.0	33.5	33.8	25.8	26.0	25.9	21.5	21.8	21.7
11hr	32.8	33.0	32.9	24.9	25.0	24.9	21.1	21.4	21.3
11hr 30min	30.2	30.6	30.4	24.1	24.4	24.3	20.7	20.9	20.8
12hr	28.1	28.3	28.2	23.5	23.8	23.7	20.4	20.7	20.6

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ง.3 การศึกษากระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วม

ง.3.1 ผลของโซเดียมคลอไรด์

ผลจากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆต่อกระบวนการเกิดตะกอนและตกตะกอนของตะกอนร่วมที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นระหว่างแคลเซียมต่อแมกนีเซียมเท่ากับ 12,000 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ ง.21 ค่า pH ของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.85	7.80	7.83	7.72	7.77	7.75	7.67	7.61	7.64	7.54	7.50	7.52
หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์												
1	10.52	10.5	10.51	10.42	10.47	10.45	10.40	10.35	10.38	10.37	10.32	10.35
5	10.42	10.38	10.4	10.23	10.32	10.28	10.30	10.20	10.25	10.27	10.18	10.23
10	10.38	10.35	10.37	10.2	10.3	10.25	10.27	10.16	10.22	10.22	10.14	10.18
หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต												
1	10.39	10.36	10.38	10.24	10.30	10.27	10.3	10.18	10.24	10.25	10.14	10.20
5	10.35	10.30	10.33	10.200	10.22	10.21	10.20	10.14	10.17	10.18	10.10	10.14
10	10.32	10.27	10.30	10.18	10.2	10.19	10.16	10.13	10.15	10.14	10.08	10.11
20	10.32	10.26	10.29	10.18	10.19	10.19	10.15	10.13	10.14	10.12	10.06	10.09
30	10.31	10.25	10.28	10.17	10.19	10.18	10.15	10.12	10.14	10.11	10.06	10.09
31	11.11	11.12	11.12	11.11	11.13	11.12	11.12	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12
35	11.12	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12
40	11.13	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12	11.11	11.11	11.11	11.11	11.12	11.12
50	11.12	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12	11.11	11.11	11.11	11.11	11.12	11.12
60	11.11	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12	11.10	11.1	11.10	11.10	11.11	11.11
90	11.11	11.12	11.12	11.11	11.11	11.11	11.10	11.1	11.10	11.10	11.11	11.11

* หมายถึง หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.22 ค่าการนำไฟฟ้าของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
ต่าง ๆ กัน (mmho/cm)

เวลา (นาท)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	31.0	33.5	32.3	66.2	68.4	67.3	82.8	84.0	83.4	96.0	97.2	96.6
หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์												
1	22.7	25.5	24.1	50.4	51.8	51.1	62.2	63	62.6	70.2	71.1	70.7
5	22.6	25.4	24.0	50.5	51.5	51.0	62.0	62.6	62.3	65.4	66.1	65.8
10	22.7	25.3	24.0	50.7	51.6	51.2	61.7	62	61.9	64.0	65.3	64.7
หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต												
1	21.1	22.5	21.8	44.4	43.6	44	52.1	52.3	52.2	58.6	58.5	58.6
5	21.0	22.4	21.7	42.7	43.3	43	52.1	52.0	52.1	58.1	58.3	58.2
10	20.9	22.2	21.6	42.6	43.1	42.9	52.1	52.0	52.1	57.9	58.1	58.0
20	21.3	22.1	21.7	42.5	43.0	42.8	52.0	51.8	51.9	57.4	57.9	57.7
30	21.3	22.1	21.7	42.5	43.1	42.8	52.0	51.7	51.9	57.4	57.6	57.5
31	21.6	22.4	22.0	42.8	43.5	43.2	52.5	52.8	52.7	57.4	57.4	57.4
35	21.5	22.3	21.9	42.7	43.6	43.2	52.5	52.7	52.6	57.4	57.4	57.4
40	21.5	22.3	21.9	42.5	43.8	43.2	52.5	52.7	52.6	57.3	57.3	57.3
50	21.6	22.2	21.9	42.6	43.6	43.1	52.4	52.5	52.5	57.3	57.3	57.3
60	21.6	22.0	21.8	42.5	43.5	43.0	52.3	52.5	52.4	57.3	57.2	57.3
90	21.5	21.8	21.7	42.5	41.6	42.1	52.1	52.1	52.1	57.3	57.2	57.3

* หมายเหตุ หลังจากนาทที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.23 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
1	133.5	128.0	130.8	158.5	170.0	164.3	177.0	184.5	180.8	190.0	200.0	195.0
5	122.8	115.0	118.9	130.8	140.5	135.6	150.0	156.5	153.3	176.0	182.0	179.0
10	118.5	112.8	115.6	126.5	132.0	129.3	142.0	146.3	144.1	160.0	168.5	164.3
20	110.0	106.0	108.0	120.0	126.0	123.0	134.5	140.0	137.3	148.0	155.0	151.5
30	104.5	100.5	102.5	114.8	120.0	117.4	128.0	131.5	129.8	136.0	142.5	139.3
31	65.3	62.8	64.0	70.0	78.5	74.3	74.5	82.0	78.3	83.0	88.5	85.8
35	61.0	60.5	60.8	65.0	72.0	68.5	69.8	76.5	73.1	77.0	78.5	77.8
40	60.5	55.5	58.0	62.3	70.0	66.1	65.0	71.0	68.0	72.3	74.8	73.5
50	59.0	52.0	55.5	60.0	62.0	61.0	61.0	65.5	63.3	68.0	70.5	69.3
60	54.0	51.8	52.9	52.0	57.5	54.8	59.0	60.0	59.5	62.0	65.0	63.5
90	50.0	45.0	47.5	48.5	52.0	50.3	60.5	63.5	62.0	61.5	64.0	62.8

* หมายเหตุ หลังจากนาที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.24 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่า
ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่างๆกัน (ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
1	146.7	143.5	145.1	149.7	163.1	156.4	158.4	169.6	164.0	166.9	177.5	172.2
5	143.2	141.8	142.5	154.1	156.9	155.5	159.5	166.7	163.1	165.7	173.1	169.4
10	140.2	139.2	139.7	150.8	151.4	151.1	158.9	161.4	160.2	162.1	169.5	165.8
20	137.4	135.4	136.4	148.4	149.6	149.0	154.7	158.7	156.7	161.2	166.6	163.9
30	136.9	134.7	135.8	145.1	148.3	146.7	153.4	155.3	154.3	158.5	163.1	160.8
31	27.8	24.8	26.3	26.7	32.9	29.8	31.9	38.3	35.1	40.2	42.6	41.4
35	22.3	19.9	21.1	22.3	24.5	23.4	21.9	26.8	24.3	33.6	34.8	34.2
40	23.0	18.4	20.7	21.3	22.3	21.8	22.3	25.6	23.9	29.1	32.3	30.7
50	20.4	18.0	19.2	19.0	22.6	20.8	22.0	23.4	22.7	27.8	30.2	29.0
60	18.6	17.8	18.2	18.4	21.2	19.8	20.8	23.1	21.9	27.8	29.6	28.7
90	17.8	16.4	17.1	16.4	20.4	18.4	20.4	22.7	21.6	27.4	29.0	28.2

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.25 ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
ต่าง ๆ กัน (ไมครอน)

เวลา (นาท)	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	13.9	13.3	13.6	12.2	12.4	12.3	12.6	11.8	12.2	11.5	10.9	11.2
5	13.7	12.7	13.2	12.7	13.5	13.1	13.4	12.8	13.1	12.1	11.7	11.9
10	15.4	14.2	14.8	13.5	13.5	13.5	13.6	12.8	13.2	12.2	11.4	11.8
20	14.8	14.2	14.5	13.2	14.0	13.6	12.2	12.4	12.3	12.1	11.3	11.7
30	14.5	14.1	14.3	13.4	13.6	13.5	12.2	12.4	12.3	12.0	11.6	11.8
31	16.6	14.8	15.7	13.6	13.8	13.7	12.4	11.6	12.0	11.1	10.9	11.0
35	15.5	14.7	15.1	12.4	13.0	12.7	12.6	12.2	12.4	11.6	11.4	11.5
40	15.7	15.1	15.4	12.6	13.0	12.8	11.7	11.3	11.5	11.0	10.2	10.6
50	14.6	14.0	14.3	11.9	12.7	12.3	11.5	11.5	11.5	11.3	10.3	10.8
60	14.4	14.2	14.3	12.1	12.5	12.3	10.7	9.9	10.3	10.7	9.9	10.3
90	14.3	13.7	14.0	12.2	13.4	12.8	10.9	10.3	10.6	10.3	9.9	10.1

* หมายเหตุ หลังจากนาทที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.26 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
ตะกอนร่วมที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่าง ๆ กัน (cm)

เวลา	ไม่เติม NaCl			4% NaCl			6% NaCl			8% NaCl		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	81.0	81.4	81.2	82.0	82.0	82.0	82.6	83.0	82.8	83.0	83.0	83.0
20 min	73.0	74.0	73.5	75.5	74.8	75.2	76.0	76.8	76.4	77.0	77.0	77.0
30 min	66.8	68.0	67.4	69.5	68.5	69.0	70.0	70.8	70.4	71.2	71.0	71.1
40 min	60.8	62.0	61.4	63.7	62.5	63.1	64.0	65.0	64.5	65.6	65.4	65.5
50 min	55.0	56.5	55.8	57.7	56.5	57.1	58.5	59.6	59.1	60.3	60.0	60.2
1 hr	49.2	50.5	49.9	52.2	51.0	51.6	53.4	54.6	54.0	55.5	55.1	55.3
1hr 10min	43.7	45.3	44.5	46.8	45.7	46.3	48.3	49.6	49.0	50.8	50.0	50.4
1hr 20min	38.7	40.3	39.5	41.8	40.5	41.2	43.4	45.0	44.2	46.3	45.7	46.0
1hr 30min	33.7	35.5	34.6	37.0	35.8	36.4	38.8	40.5	39.7	41.8	41.0	41.4
1hr 40min	29.2	31.0	30.1	32.8	31.8	32.3	34.3	36.0	35.2	37.5	37.0	37.3
1hr 50min	25.0	26.6	25.8	28.6	27.8	28.2	30.0	31.7	30.9	33.7	32.7	33.2
2hr	21.0	22.6	21.8	24.8	23.8	24.3	26.0	27.7	26.9	30.5	29.2	29.9
2hr 10min	18.6	20.1	19.4	22.5	21.4	22.0	23.5	25.0	24.3	27.8	26.7	27.3
2hr 20min	16.6	18.0	17.3	20.3	19.0	19.7	21.5	23.2	22.4	25.4	24.5	25.0
2hr 30min	15.0	16.5	15.8	18.2	17.0	17.6	19.5	21.3	20.4	23.8	22.5	23.2
2hr 40min	13.5	15.0	14.3	16.4	15.0	15.7	17.5	19.5	18.5	22.0	20.5	21.3
2hr 50min	12.0	13.5	12.8	14.6	13.2	13.9	15.5	17.5	16.5	20.4	18.5	19.5
3hr	10.5	12.0	11.3	13.4	11.8	12.7	14.2	15.8	15.0	18.6	17.0	17.8
3hr 30min	9.0	10.8	9.9	12.2	10.4	11.3	13.1	14.6	13.9	17.2	16.0	16.6
4hr	7.8	9.6	8.7	10.9	9.2	10.1	12.0	13.6	12.8	16.2	15.0	15.6
4hr 30min	7.0	8.8	7.9	10.4	8.6	9.5	11.5	13.0	12.3	15.5	14.4	15.0
5hr	6.6	8.5	7.6	10.1	8.3	9.2	11.1	12.7	11.9	15.1	14.2	14.7
5hr 30min	6.3	8.2	7.3	9.9	8.0	9.0	10.8	12.5	11.7	14.8	13.9	14.4
6hr	6.1	8.0	7.1	9.7	7.7	8.7	10.5	12.3	11.4	14.6	13.6	14.1
9hr	5.0	6.8	5.9	8.7	6.6	7.7	9.6	11.3	10.5	13.7	12.7	13.2
9hr 30min	4.8	6.6	5.7	8.5	6.5	7.5	9.5	11.2	10.4	13.6	12.6	13.1
10hr	4.6	6.5	5.6	8.4	6.4	7.4	9.4	11.2	10.3	13.5	12.6	13.1
10hr 30min	4.5	6.4	5.5	8.3	6.3	7.3	9.3	11.1	10.2	13.4	12.5	13.0
11hr	4.5	6.3	5.4	8.2	6.2	7.2	9.3	11.0	10.2	13.4	12.5	13.0
11hr 30min	4.4	6.2	5.3	8.2	6.1	7.2	9.2	10.9	10.1	13.3	12.4	12.9
12hr	4.3	6.1	5.2	8.1	6.0	7.1	9.1	10.8	10.0	13.3	12.4	12.9

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ง.3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้น

ผลจากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมไอออนในสารตั้งต้นเท่ากับ 3:1 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ

ตารางที่ ง.27 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		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	7.59	7.60	7.60	7.67	7.61	7.64	7.74	7.68	7.71	7.77	7.82	7.80	7.87	7.79	7.83
หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์															
1	10.34	10.38	10.36	10.42	10.34	10.38	10.45	10.35	10.40	10.44	10.46	10.42	10.50	10.40	10.45
5	10.18	10.26	10.22	10.30	10.20	10.25	10.30	10.24	10.27	10.24	10.34	10.29	10.37	10.23	10.30
10	10.16	10.24	10.20	10.25	10.19	10.22	10.28	10.20	10.24	10.20	10.30	10.25	10.32	10.22	10.27
หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต															
1	10.20	10.24	10.22	10.27	10.21	10.24	10.32	10.22	10.27	10.24	10.34	10.29	10.36	10.28	10.32
5	10.17	10.15	10.16	10.20	10.14	10.17	10.24	10.18	10.21	10.21	10.27	10.24	10.30	10.24	10.27
10	10.12	10.14	10.13	10.18	10.12	10.15	10.23	10.13	10.18	10.19	10.25	10.22	10.28	10.24	10.26
20	10.11	10.14	10.13	10.17	10.11	10.14	10.22	10.12	10.17	10.19	10.25	10.22	10.27	10.23	10.25
30	10.10	10.14	10.12	10.17	10.11	10.14	10.21	10.13	10.17	10.18	10.24	10.21	10.26	10.24	10.25
31	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12	11.11	11.13	11.12	11.12	11.14	11.13	11.13	11.12	11.13
35	11.12	11.12	11.12	11.11	11.12	11.12	11.12	11.12	11.12	11.13	11.14	11.14	11.13	11.12	11.13
40	11.13	11.11	11.12	11.11	11.11	11.11	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12
50	11.13	11.11	11.12	11.11	11.11	11.11	11.11	11.12	11.12	11.13	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12
60	11.13	11.11	11.12	11.10	11.10	11.10	11.11	11.12	11.12	11.12	11.13	11.13	11.12	11.12	11.12
90	11.12	11.11	11.12	11.1	11.1	11.10	11.11	11.11	11.11	11.11	11.13	11.12	11.11	11.11	11.11

* หมายเหตุ หลังจากนาฬิกาที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.28 ค่า conductivity ของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน (mmho/cm)

เวลา (นาท)	Ca:Mg = 3:1			Ca:Mg = 2:1			Ca:Mg = 1:1			Ca:Mg = 1:2			Ca:Mg = 1:3		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	83.6	84.6	84.1	82.8	84.0	83.4	82.6	82.5	82.6	81.9	83.9	82.9	85.0	81.4	83.2
หลังเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์															
1	65.0	62.9	64.0	62.2	63.0	62.6	62.5	62.3	62.4	62.4	62.1	62.3	62.0	60.5	61.3
5	64.1	61.5	62.8	62.0	62.6	62.3	62.2	62.0	62.1	62.2	62.1	62.2	61.8	59.9	60.9
10	63.6	61.0	62.3	61.7	62.0	61.9	62.2	62.0	62.1	62.0	62.2	62.1	61.3	59.9	60.6
หลังเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต															
1	53.2	51.9	52.6	52.1	52.3	52.2	50.5	51.3	50.9	51.8	52.7	52.3	51.6	52.3	52.0
5	53.0	51.9	52.5	52.1	52.0	52.1	50.5	51.1	50.8	51.2	52.2	51.7	51.1	52.0	51.6
10	53.1	51.9	52.5	52.1	52.0	52.1	50.5	51.1	50.8	51.2	52.2	51.7	51.1	52.0	51.6
20	53.1	51.8	52.5	52.0	51.8	51.9	50.5	51.2	50.9	51.1	52.4	51.8	51.0	52.0	51.5
30	53.1	51.7	52.4	52.0	51.7	51.9	50.5	51.1	50.8	51.1	52.5	51.8	51.0	52.3	51.7
31	53.1	52.3	52.7	52.5	52.8	52.7	51.8	52.9	52.4	52.9	53.8	53.4	52.3	53.1	52.7
35	53.1	52.2	52.7	52.5	52.7	52.6	51.8	52.8	52.3	52.8	53.9	53.4	52.3	53.2	52.8
40	52.9	52.2	52.6	52.5	52.7	52.6	51.8	52.8	52.3	52.8	53.8	53.3	52.0	53.2	52.6
50	52.9	52.0	52.5	52.4	52.5	52.5	51.8	52.6	52.2	52.8	53.4	53.1	52.0	53.0	52.5
60	52.7	51.7	52.2	52.3	52.5	52.4	51.9	52.2	52.1	52.7	52.9	52.8	52.0	52.7	52.4
90	52.5	51.7	52.1	52.1	52.1	52.1	51.8	50.2	51.0	52.7	51.0	51.9	52.0	51.2	51.6

* หมายเหตุ หลังจากหน้าที่ที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.29 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่
อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน
(ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	Ca:Mg = 3:1			Ca:Mg = 2:1			Ca:Mg = 1:1			Ca:Mg = 1:2			Ca:Mg = 1:3		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	13500	13500	13500	12000	12000	12000	9000	9000	9000	6000	6000	6000	4500	4500	4500
1	204.0	185.5	194.8	177.0	184.5	180.8	170.0	164.0	167.0	152.0	145.5	148.8	133.0	144.0	138.5
5	172.5	152.0	162.3	150.0	156.5	153.3	146.0	144.0	145.0	140.5	134.5	137.5	128.0	132.0	130.0
10	152.0	144.0	148.0	142.0	146.3	144.1	138.0	133.0	135.5	134.5	129.0	131.8	125.0	131.5	128.3
20	143.4	140.2	141.8	134.5	140.0	137.3	133.0	129.0	131.0	127.5	121.3	124.4	118.0	124.0	121.0
30	139.0	134.5	136.8	128.0	131.5	129.8	128.0	121.8	124.9	121.5	117.0	119.3	114.0	116.5	115.3
31	83.5	80.0	81.8	74.5	82.0	78.3	72.0	70.5	71.3	65.5	65.0	65.3	58.0	60.5	59.3
35	79.0	74.0	76.5	69.8	76.5	73.1	68.0	65.0	66.5	62.0	60.5	61.3	56.5	60.0	58.3
40	75.5	73.5	74.5	65.0	71.0	68.0	62.5	60.5	61.5	60.0	57.5	58.8	55.5	57.0	56.3
50	70.0	67.5	68.8	61.0	65.5	63.3	61.5	57.5	59.5	58.0	56.0	57.0	54.0	56.0	55.0
60	68.0	65.5	66.8	59.0	60.0	59.5	61.5	56.0	58.8	58.0	55.0	56.5	51.0	54.5	52.8
90	65.0	64.0	64.5	60.5	63.5	62.0	58.5	55.5	57.0	56.5	52.5	54.5	50.5	51.0	50.8

* หมายเหตุ หลังจากนาฬิกาที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.30 ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายของการเกิดตะกอนร่วมที่
อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่าง ๆ กัน
(ppm as CaCO₃)

เวลา (นาที)	Ca:Mg = 3:1			Ca:Mg = 2:1			Ca:Mg = 1:1			Ca:Mg = 1:2			Ca:Mg = 1:3		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	4500	4500	4500	6000	6000	6000	9000	9000	9000	12000	12000	12000	13500	13500	13500
1	150.1	155.1	152.6	158.4	169.6	164.0	171.0	165.5	168.3	172.7	166.8	169.8	173.9	164.4	169.2
5	143.4	163.0	153.2	159.5	166.7	163.1	166.4	162.1	164.3	168.5	161.5	165.0	170.5	160.6	165.5
10	142.6	157.2	149.9	158.9	161.4	160.2	165.6	161.8	163.7	168.0	162.8	165.4	170.1	161.5	165.8
20	142.2	151.5	146.9	154.7	158.7	156.7	162.0	158.0	160.0	168.4	161.5	164.9	170.1	159.0	164.6
30	141.8	148.4	145.1	153.4	155.3	154.3	160.1	155.6	157.8	164.4	156.7	160.6	163.9	157.0	160.5
31	34.2	35.5	34.9	31.9	38.3	35.1	37.9	34.1	36.0	38.7	36.9	37.8	38.9	36.7	37.8
35	23.5	23.9	23.7	21.9	26.8	24.3	31.8	28.7	30.3	33.0	31.4	32.2	34.3	32.3	33.3
40	21.5	22.3	21.9	22.3	25.6	23.9	27.2	26.4	26.8	32.4	28.6	30.5	33.1	30.8	32.0
50	21.2	22.7	21.9	22.0	23.4	22.7	26.8	24.4	25.6	30.3	27.2	28.8	31.4	28.9	30.1
60	20.7	22.3	21.5	20.8	23.1	22.0	24.3	22.6	23.5	27.2	26.4	26.8	29.0	27.1	28.0
90	20.8	22.0	21.4	20.4	22.7	21.6	23.1	22.3	22.7	25.6	24.8	25.2	27.8	25.6	26.7

* หมายเหตุ หลังจากนาทีที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.31 ขนาดเฉลี่ยของการเกิดตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสารตั้งต้นต่างๆกัน (ไมครอน)

เวลา (นาทึ)	Ca:Mg = 3:1			Ca:Mg = 2:1			Ca:Mg = 1:1			Ca:Mg = 1:2			Ca:Mg = 1:3		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย	ครั้งที่1	ครั้งที่2	เฉลี่ย
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	12.4	14.2	13.3	12.6	11.8	12.2	10.1	9.1	9.6	9.9	6.3	8.1	6.2	8.0	7.1
5	12.6	14.4	13.5	13.4	12.8	13.1	11.7	11.3	11.5	9.3	7.5	8.4	7.7	8.5	8.1
10	13.2	13.8	13.5	13.6	12.8	13.2	10.9	10.7	10.8	9.1	7.5	8.3	7.8	8.0	7.9
20	13.0	13.8	13.4	12.2	12.4	12.3	11.1	10.3	10.7	8.7	7.7	8.2	7.6	8.0	7.8
30	12.5	13.9	13.2	12.2	12.4	12.3	11.1	10.5	10.8	8.5	7.5	8.0	7.8	7.8	7.8
31	13.1	13.7	13.4	12.4	11.6	12.0	10.9	10.1	10.5	8.7	8.7	8.7	7.8	8.0	7.9
35	12.2	13.2	12.7	12.6	12.2	12.4	10.1	9.3	9.7	8.0	7.8	7.9	7.3	7.7	7.5
40	12.0	12.2	12.1	11.7	11.3	11.5	10.2	9.0	9.6	8.6	8.0	8.3	7.2	7.6	7.4
50	12.0	12.2	12.1	11.5	11.5	11.5	9.9	9.5	9.7	8.7	8.3	8.5	7.0	7.4	7.2
60	10.8	12.2	11.5	10.7	9.9	10.3	9.6	8.4	9.0	8.4	8.0	8.2	7.0	7.2	7.1
90	11.1	11.7	11.4	10.9	10.3	10.6	9.8	9.2	9.5	8.3	7.7	8.0	6.8	7.2	7.0

* หมายเหตุ หลังจากนาทึที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ตารางที่ ง.32 ความสูงของชั้นตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการตกตะกอนของ
ตะกอนร่วมที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมในสาร
ตั้งต้นต่าง ๆ กัน (cm)

เวลา	Ca:Mg = 3:1			Ca:Mg = 2:1			Ca:Mg = 1:1			Ca:Mg = 1:2			Ca:Mg = 1:3		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
10 min	75.8	76.8	76.3	82.6	83.0	82.8	89.8	89.2	89.5	89.9	89.5	89.7	89.9	89.6	89.8
20 min	61.4	64.2	62.8	76.0	76.8	76.4	88.9	88.5	88.7	89.7	89.3	89.5	89.9	89.5	89.7
30 min	50.2	53.4	51.8	70.0	70.8	70.4	86.2	85.4	85.8	89.7	89.1	89.4	89.8	89.4	89.6
40 min	41.1	43.5	42.3	64.0	65.0	64.5	84.0	83.2	83.6	89.5	88.9	89.2	89.7	89.1	89.4
50 min	34.0	35.6	34.8	58.5	59.6	59.1	81.3	80.3	80.8	88.6	88.4	88.5	89.6	89.0	89.3
1 hr	28.6	30.0	29.3	53.4	54.6	54.0	78.6	78.0	78.3	87.9	87.1	87.5	89.5	88.9	89.2
1hr 10min	24.7	26.9	25.8	48.3	49.6	49.0	76.4	75.2	75.8	86.6	85.2	85.9	89.3	88.7	89.0
1hr 20min	21.5	23.1	22.3	43.4	45.0	44.2	72.0	71.0	71.5	84.6	84.0	84.3	88.4	88.6	88.5
1hr 30min	19.0	20.6	19.8	38.8	40.5	39.7	69.3	68.1	68.7	83.0	82.0	82.5	87.6	87.0	87.3
1hr 40min	16.8	18.2	17.5	34.3	36.0	35.2	66.4	65.2	65.8	81.4	80.2	80.8	85.7	85.1	85.4
1hr 50min	15.6	16.6	16.1	30.0	31.7	30.9	63.2	62.0	62.6	79.5	78.3	78.9	85.0	84.2	84.6
2hr	15.0	15.8	15.4	26.0	27.7	26.9	59.3	58.7	59.0	77.5	76.9	77.2	82.4	81.8	82.1
2hr 10min	14.2	15.2	14.7	23.5	25.0	24.3	55.1	54.5	54.8	75.2	74.8	75.0	80.8	80.0	80.4
2hr 20min	13.8	14.2	14.0	21.5	23.2	22.4	52.4	51.4	51.9	73.8	72.6	73.2	79.0	78.2	78.6
2hr 30min	13.2	13.6	13.4	19.5	21.3	20.4	48.5	47.5	48.0	71.3	70.7	71.0	77.1	76.1	76.6
2hr 40min	12.7	12.9	12.8	17.5	19.5	18.5	45.4	44.6	45.0	69.5	68.1	68.8	75.3	74.3	74.8
2hr 50min	11.9	12.5	12.2	15.5	17.5	16.5	42.4	41.6	42.0	67.2	66.0	66.6	73.4	72.2	72.8
3hr	11.5	11.9	11.7	14.2	15.8	15.0	39.8	39.0	39.4	64.8	64.0	64.4	71.8	70.4	71.1
3hr 30min	11.0	11.4	11.2	13.1	14.6	13.9	33.5	32.3	32.9	58.1	57.1	57.6	66.1	64.7	65.4
4hr	10.5	11.1	10.8	12.0	13.6	12.8	28.3	27.1	27.7	51.4	50.8	51.1	60.5	58.7	59.6
4hr 30min	10.2	10.6	10.4	11.5	13.0	12.3	26.0	25.0	25.5	45.2	44.2	44.7	53.9	52.9	53.4
5hr	9.8	10.0	9.9	11.1	12.7	11.9	25.2	24.2	24.7	38.7	37.7	38.2	47.5	46.5	47.0
5hr 30min	9.3	9.7	9.5	10.8	12.5	11.7	23.5	22.3	22.9	34.6	33.8	34.2	41.6	41.0	41.3
6hr	9.1	9.5	9.3	10.5	12.3	11.4	22.2	21.2	21.7	30.9	30.1	30.5	36.9	35.9	36.4
9hr	8.0	8.4	8.2	9.6	11.3	10.5	21.3	20.3	20.8	29.7	28.9	29.3	35.2	35.0	35.1
9hr 30min	7.8	8.0	7.9	9.5	11.2	10.4	21.0	20.0	20.5	28.5	28.1	28.3	34.2	34.0	34.1
10hr	7.8	7.8	7.8	9.4	11.2	10.3	20.4	19.6	20.0	27.5	26.7	27.1	33.6	32.2	32.9
10hr 30min	7.5	7.7	7.6	9.3	11.1	10.2	19.8	19.0	19.4	26.4	25.4	25.9	32.1	31.5	31.8
11hr	7.2	7.6	7.4	9.3	11.0	10.2	19.5	18.3	18.9	25.5	24.3	24.9	30.9	30.3	30.6
11hr 30min	7.1	7.5	7.3	9.2	10.9	10.1	19.0	18.0	18.5	24.6	23.2	23.9	29.8	29.0	29.4
12hr	7.0	7.4	7.2	9.1	10.8	10.0	18.1	17.7	17.9	23.4	23.0	23.2	28.6	28.2	28.4

หมายเหตุ หลังจากนาฬิกาที่ 30 จะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 11.1

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว จุฑามาศ โชติพานิช เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2521 ที่ อ.เมือง จ.นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าทำงานในบริษัทอวอเตอร์ ดีออกเตอร์จำกัด ในตำแหน่ง Technical sale and service engineer หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย