การเตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนโดยวิธีพ่นฟองแก๊ส

นาย จีรวัฒน์ อริยประยูร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4 9 7 2 2 5 3 2 2 3

PREPARATION OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE POWDER VIA GAS BUBBLING METHOD

Mr.Jeerawat Ariyaprayoon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนโดยวิธีพ่นฟองแก๊ส
โดย	นาย จีรวัฒน์ อริยประยูร
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.อัญชลี ศุภสกุลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.อัญชลี ศุภสกุลชัย)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

จีรวัฒน์ อริยประยูร : การเตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนโดยวิธีพ่นฟองแก๊ส. (PREPARATION OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE POWDER VIA GAS BUBBLING METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.อัญชลี ศุภสกุลชัย, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย คือ เตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีพ่นฟองแก๊สที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายที่มีแคลเซียมไอออนด้วยเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยเลือกสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พ่นฟองแก๊สที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายโดยผ่านหลอดแก้ว และ porous glass membrane ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 2 ลิตรต่อนาทีที่ช่วงเวลาการพ่นแก๊สต่างๆ กัน พบว่าสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่เหมาะที่จะใช้เตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการพ่นฟองอากาศ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในสารละลาย ทำให้แคลเซียมคลอไรด์ละลายน้ำได้ดีขึ้น ไม่เกิดการตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย และปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สที่พ่น จากการทดลอง พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น เวลาในการพ่นฟองแก๊ส และปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สที่พ่น สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมผงแคลเซียมคาร์บอเนต คือ พ่นแก๊สผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไนโตรเจน (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 5 นาที ลงในสารละลายใสปริมาณ 80 มิลลิลิตร ที่ได้จากการกรองสารแขวนลอยของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.2 โมล/ลิตร ได้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย ($d_{0.5}$) 3.442 ไมครอน

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

4972253223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: CALCIUM CARBONATE / CARBONATION / GAS BUBBLING METHOD / CARBON DIOXIDE

JEERAWAT ARIYAPRAYOON: PREPARATION OF PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE POWDER VIA GAS BUBBLING METHOD. THESIS ADVISOR: URAIWAN LEELA-ADISORN, D. Eng., THESIS CO–ADVISOR: ANCHALEE SUPSAKULCHAI, D. Eng., 81 pp.

The purpose of this research is to prepare calcium carbonate powder by gas bubbling method in Ca^{2+}- containing solution with non-complicated equipment. The experiments were tested on calcium hydroxide solutions and calcium chloride solutions. The carbon dioxide – containing gas mixtures were bubbled in the solutions via glass tube and porous glass membrane at flow rate of 2 l/min in various concentrations and bubbling times. The calcium chloride solutions were not proper to prepare calcium carbonate powder by this technique because dissolved carbon dioxide in the solution enhanced the solubility of calcium chloride in the water. Therefore, no precipitation occurred. Calcium hydroxide solutions reacted with carbon dioxide at any concentration of solutions and at any ratios of carbon dioxide in gas mixtures. Average particle size ($d_{0.5}$) of calcium carbonate powders depend on the concentration of starting solution, bubbling time and amount of carbon dioxide in bubbling gas. The appropriate condition for calcium carbonate powder preparation is bubbling gas mixture of carbon dioxide and nitrogen (ratio 1:1 by volume) for 5 min by porous glass membrane through 80 cm^3 of clear-filtrated solution prepared from 0.2 mol/l of calcium hydroxide suspension. The average particle size of calcium carbonate powder prepared by this technique is 3.442 micron.

Department	Materials Science	Student's Signature	
Field of Study	Ceramic Technology	Advisor's Signature	
Academic Year	2009	Co-Advisor's Signature	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำแนวทางการดำเนินงานวิจัย และคำปรึกษา

ดร.อัญชลี ศุภสกุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำเรื่องอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้พ่นฟองแก๊ส และเทคนิคในการใช้เครื่องมือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ รวมถึงคณาจารย์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิศานาถ ไตรผล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาค

คุณวิรพงษ์ ครพนม เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับผลวิเคราะห์ XRD

คุณธนากร เทพามาตย์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับผลวิเคราะห์ SEM

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับการตรวจแก้ไขรูปเล่ม และคำแนะนำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนสนับสนุนระหว่างศึกษาในระดับปริญญาโท

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสาร Bromthymol blue สำหรับใช้ในการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวัสดุศาสตร์สำหรับความช่วยเหลือต่างๆ และกำลังใจที่มีให้

สุดท้าย กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า และทุกๆคนในครอบครัว ที่ดูแล อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจมาตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1. แคลเซียมคาร์บอเนต 3
2.1.1. ลักษณะการเกิดของแคลเซียมคาร์บอเนต 3
2.1.2. กรรมวิธีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต 4
2.1.3. การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต 5
2.1.4. สมดุลการละลายของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 5
2.2. องค์ประกอบของอากาศ 8
2.3. ระบบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ 10
2.4. การเกิดปฏิกิริยาของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต 11
2.5. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าคงที่ของการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 12
2.5.1. อุณหภูมิ 12
2.5.2. ความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในสารละลาย 12
2.6. กระบวนการเกิดผลึก 14
2.6.1. ค่าความอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) 14
2.6.2. การเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) 14

2.6.3. อัตราการเกิดนิวเคลียสผลึกและการเพิ่มขนาดของผลึก 15
2.6.4. กระบวนการรวมตัวกันของผลึก 16
2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
2.7.1. Han และคณะ, 2004 16
2.7.2. Hadiko และคณะ, 2005 17
2.7.3. Han และคณะ, 2005 18
2.7.4. Feng และคณะ, 2006 19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 21
3.1. สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 21
3.1.1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 21
3.1.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 21
3.1.3. เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ และศึกษาคุณลักษณะจำเพาะ 21
3.2. วิธีการทดลอง 22
3.2.1. ความสามารถในการละลายของสารประกอบแคลเซียม 22
3.2.2. การเกิดคาร์บอเนชันที่สภาวะนิ่ง 22
3.2.3. การเกิดคาร์บอเนชันกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศในสภาวะที่มีการพ่นฟองอากาศ 23
3.2.4. การเกิดคาร์บอเนชันของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สผสมของคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน ในสภาวะที่มีการพ่นฟองแก๊ส 26
3.2.5. การเปรียบเทียบแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากงานวิจัยและผลิตภัณฑ์ทางการค้า 26
3.3. การศึกษาลักษณะจำเพาะ 27
3.3.1. การหาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสารละลาย 27
3.3.2. การตรวจเฟสที่เกิดขึ้น 28
3.3.3. การศึกษาลักษณะจุลภาค 28
3.3.4. การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค 28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล 29
4.1. ความสามารถในการละลายของสารประกอบแคลเซียมในน้ำกลั่น 29
4.1.1. ความสามารถในการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 29

4.1.2. ความสามารถในการละลายของแคลเซียมคลอไรด์.....31
4.2. การเกิดคาร์บอเนชันกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศที่สภาวะนิ่ง.....32
4.2.1. การเกิดคาร์บอเนชันของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะนิ่ง.....32
4.2.2. การเกิดคาร์บอเนชันของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สภาวะนิ่ง.....36
4.3. การเกิดคาร์บอเนชันกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศในสภาวะที่มีการพ่นฟองอากาศ.....38
4.3.1. การเกิดคาร์บอเนชันเบื้องต้น.....38
4.3.2. การเกิดคาร์บอเนชันของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ถูกปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....39
4.3.3. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตจากการพ่นอากาศด้วยวิธีการเก็บตะกอนที่ต่างกัน.....41
4.3.4. การเกิดคาร์บอเนชันระหว่างสารละลาย S-0.01 โดยการพ่นอากาศผ่าน porous glass membrane.....47
4.3.5. การเกิดคาร์บอเนชันระหว่างสารละลาย S-0.01 โดยการพ่นอากาศผ่านหลอดแก้วนำแก๊ส.....51
4.3.6. การเกิดคาร์บอเนชันระหว่างสารละลาย S-0.2 โดยการพ่นอากาศผ่าน porous glass membrane.....54
4.3.7. การเกิดคาร์บอเนชันระหว่างสารละลาย S-0.2 โดยการพ่นอากาศผ่านหลอดแก้วนำแก๊ส.....59
4.3.8. การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่มีที่มีผลต่อขนาดอนุภาค และการกระจายขนาดอนุภาค.....62
4.4. การเกิดคาร์บอเนชันของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ และส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนในสภาวะที่มีการพ่นฟองแก๊ส.....67
4.4.1. การทดลองพ่นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....67
4.4.2. การทดลองพ่นแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน.....68
4.5. การเปรียบเทียบแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากงานวิจัยและผลิตภัณฑ์ทางการค้า.....73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....77

รายการอ้างอิง.....79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....81

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของอากาศ 9
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และค่า pH.....30
ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการไทเทรต.....30
ตารางที่ 4.3 ผลการสังเกตสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....31
ตารางที่ 4.4 การเกิดคาร์บอเนชันกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศในสภาวะที่มีการพ่นฟอง อากาศ ลงในสารละลาย S-0.2, S-0.01 และ แคลเซียมคลอไรด์ 0.2 โมล/ลิตร.....39
ตารางที่ 4.5 ความเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย S-0.01 และ S-0.2.....63

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดในสมดุลการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH 7
รูปที่ 2.2 ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่อยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงตามค่า pH 8
รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศระหว่างปี 1958-2004 9
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง HCO^{3-}, CO_3^{2-}, OH^- กับ pH 11
รูปที่ 2.5 ผลกระทบของค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดที่มีต่ออัตราการเกิดนิวเคลียส และอัตราการเพิ่มขนาดผลึก 15
รูปที่ 2.6 รูปแบบการรวมตัวกันของผลึก 16
รูปที่ 2.7 แบบจำลองการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตกลวง 18
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการทดลองการพ่นฟองแก๊สลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 25
รูปที่ 3.2 แบบจำลองการทดลองการพ่นฟองแก๊ส 27
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจุลภาคของฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลา 5 นาที 33
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจุลภาคของฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลา 30 นาที 34
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจุลภาคของฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เวลา 1 ชั่วโมง 35
รูปที่ 4.4 ของผลึกบนผิวของสารละลาย S-0.01 และ S-0.2 ที่เวลา 20 นาที 35
รูปที่ 4.5 เฟสของผลึกบนผิวของสารละลาย S-0.01 ที่เวลา (a) 24 ชั่วโมง และ (b) 6 วัน 36
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจุลภาคของฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.2 37
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจุลภาคของฝ้าที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 37
รูปที่ 4.8 เฟสของตะกอนที่ได้จากการพ่นฟองอากาศด้วยหลอดแก้วนำแก๊ส 30 นาทีลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.05 โมล/ลิตร หลังจากปรับ pH ด้วย NaOH 40
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจุลภาคตะกอนที่ได้จากการพ่นฟองอากาศด้วยหลอดแก้วนำแก๊ส 30 นาทีลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.05 โมล/ลิตร ที่ปรับ pH ด้วย NaOH 41
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ที่เวลา 5 นาที 42

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ที่เวลา 10 นาที 43
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ที่เวลา 1 ชั่วโมง 44
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ที่เวลา 5 นาที 45
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ที่เวลา 10 นาที 46
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้เกิดขึ้นจากที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ที่เวลา 1 ชั่วโมง....47
รูปที่ 4.16 เฟสของตะกอนที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงใน S-0.01 48
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01....49
รูปที่ 4.18 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 49
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01....50
รูปที่ 4.20 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 51
รูปที่ 4.21 กราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของตะกอนที่เกิดจากการพ่นฟองอากาศ....52
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายจุลภาคที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01....53
รูปที่ 4.23 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.01 ด้วยหลอดแก้วนำแก๊สเป็นเวลา 3 ชั่วโมง....53
รูปที่ 4.24 เฟสของตะกอนที่เกิดจากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 1 ชั่วโมง....54
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 1 ชั่วโมง....55
รูปที่ 4.26 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 56

รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการพ่นฟองอากาศ 57
รูปที่ 4.28 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่น ฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 57
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....58
รูปที่ 4.30 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่น ฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วย porous glass membrane เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 59
รูปที่ 4.31 กราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของตะกอนที่เกิดจากการพ่นฟองอากาศ.....60
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ได้จากการพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วยหลอดแก้วนำแก๊สเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....61
รูปที่ 4.33 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่น ฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วยหลอดแก้วนำแก๊สเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....61
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของช่องเปิดที่มีต่อการกระจายขนาดอนุภาคจาก การพ่นฟองอากาศลงในสารละลาย S-0.2 ด้วยหลอดแก้วนำแก๊สเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 63
รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นสารละลายที่มีต่อการกระจายขนาดอนุภาค.....65
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการพ่นแก๊ส 66
รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายการทดลองพ่นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ลิตรต่อนาทีลงสารละลาย S-0.01 67
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายการล้างตะกอน และเมื่อทิ้งไว้ให้ตกตะกอน.....68
รูปที่ 4.39 กราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดใน S-01 และ S-0.2 หลังจากการพ่นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจน.....69
รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ผสมกับแก๊สไนโตรเจน 5 นาที 70
รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายจุลภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ผสมกับแก๊สไนโตรเจน 5 นาที 71

รูปที่ 4.42 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนลงในสารละลาย S-0.01 72
รูปที่ 4.43 กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการพ่นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนลงในสารละลาย S-0.2 72
รูปที่ 4.44 ลักษณะของอนุภาคและ เฟสของผง แคลเซียมคาร์บอเนต ทางการค้า 73
รูปที่ 4.45 การกระจายขนาดอนุภาคของผง แคลเซียมคาร์บอเนต ทางการค้า 74
รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบการกระจายขนาดอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนต 74
รูปที่ 4.47 กราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระดาษดับเบิ้ลเอ 75
รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายจุลภาคของอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนต ในกระดาษ 75
รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายจุลภาคผิวกระดาษเมื่อกัดด้วยกรด 76