



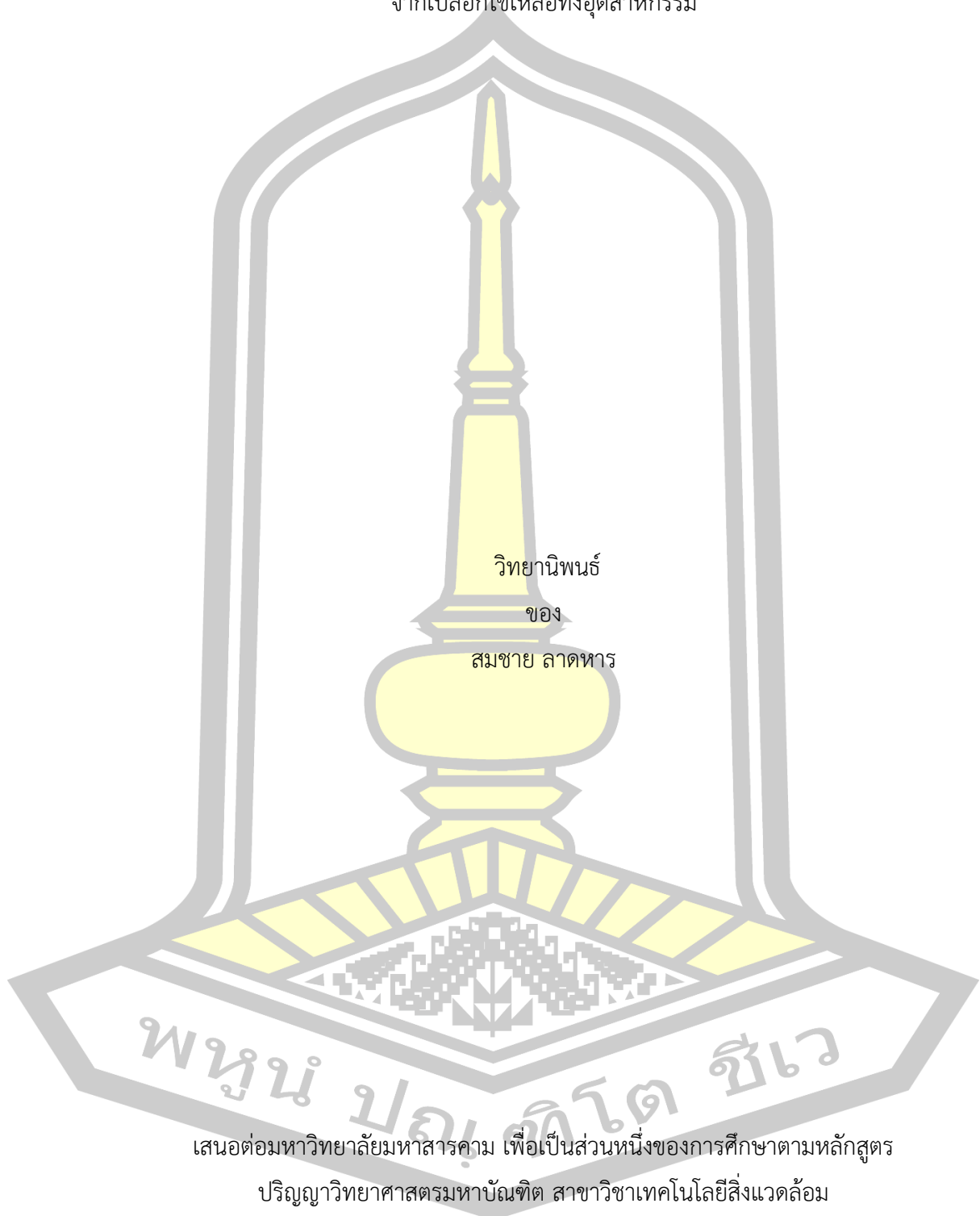
การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคไมโครเมตร
จากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์
ของ
สมชาย ลาดหาร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
กันยายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

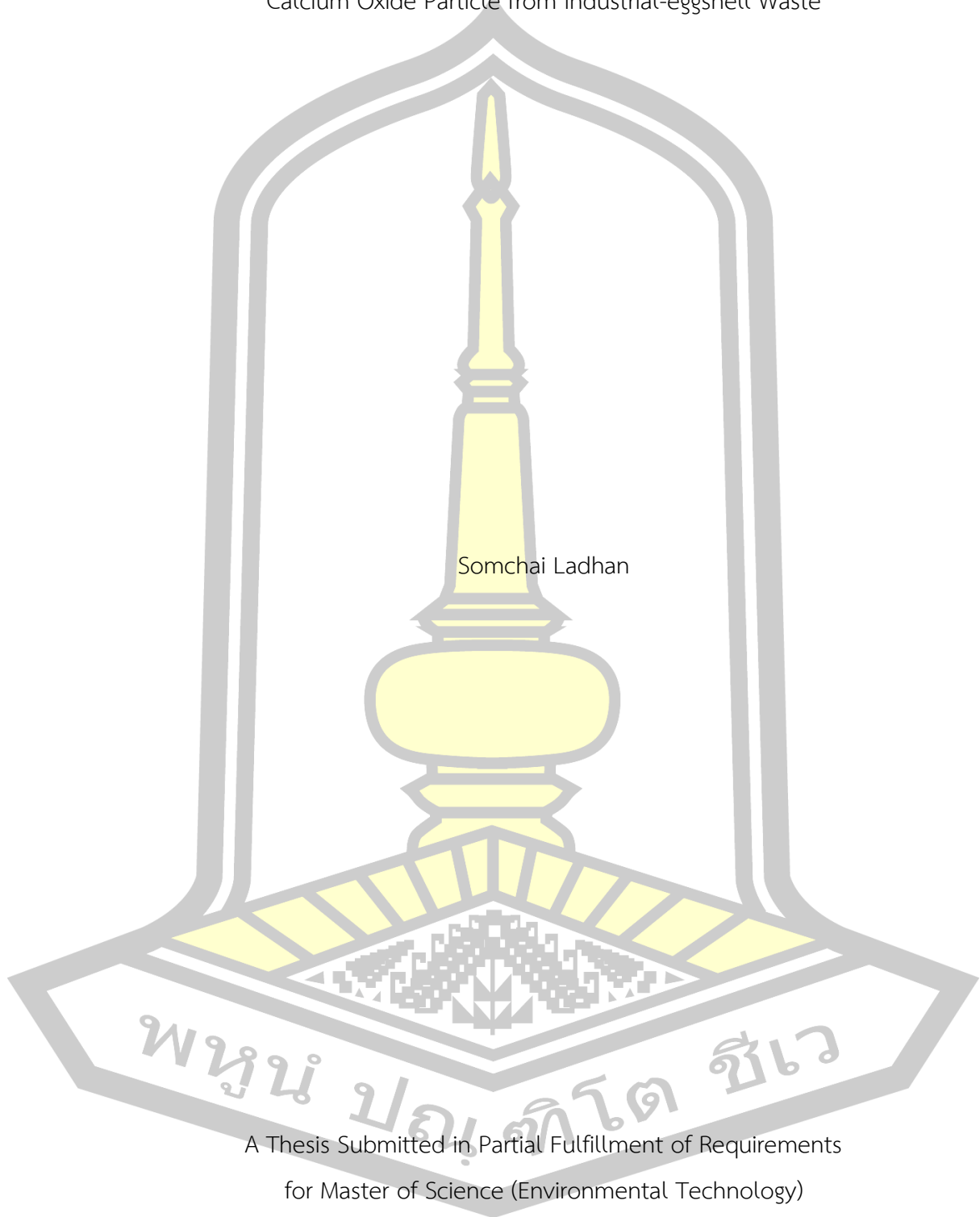
การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคไมโครเมตร
จากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรม



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
กันยายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of a Process for Production of Micro-sized Calcium Carbonate and
Calcium Oxide Particle from Industrial-eggshell Waste



Somchai Ladhan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Environmental Technology)

September 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสมชาย ลาดหาร แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. อภิพงษ์ พุฒคำ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อ. ดร. ยุวดี ไชยเชษฐ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. มลฤดี เขาวรัตน์)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผศ. ดร. วุฒิกิจ สายแก้ว)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผศ. ดร. อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. อติศักดิ์ สิงห์สีโว)

คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคไมโครเมตรจากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรม

ผู้วิจัย สมชาย ลาดหาร

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิพงษ์ พุฒคำ

อาจารย์ ดร. ยุวดี ไชยเชษฐ์

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต **สาขาวิชา** เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

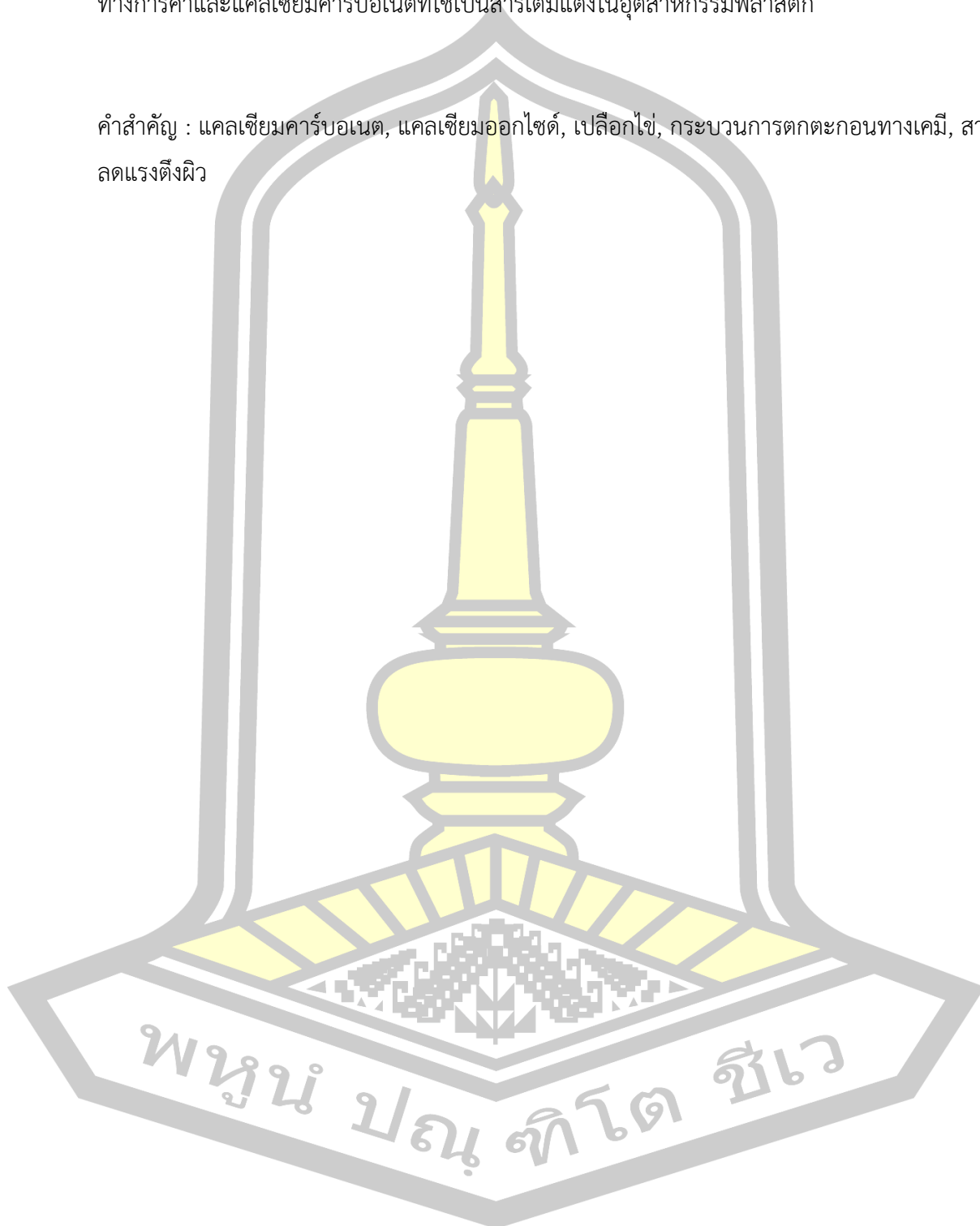
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและการแคลไซต์ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการสกัดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่และขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ระยะเวลาและอุณหภูมิของปฏิกิริยาตกตะกอนต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ จากการทดลองว่าเมื่อใช้สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ทำให้สามารถสกัด สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นได้สูงสุดคือ 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตร เมื่อสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1 โมล: 1 โมล และใช้ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตร เวลาในกวนผสม 30 วินาที พบว่าได้ค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาดเล็กที่สุดคือ 6.48 ± 6.844 ไมโครเมตร แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มีลักษณะทรงกลม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 60 องศาเซลเซียส ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดเล็กคือ 4.41 ± 3.25 ไมโครเมตร โดยมีรูปทรงลูกบาศก์ อย่างไรก็ตามเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เพิ่มระยะเวลาในการกวนผสม พบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น เมื่อเติม cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ในระหว่างการตกตะกอนพบว่าส่งผลให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นถึง 7.20 ± 44.17 ไมโครเมตร ขณะที่การเติม polyethyleneglycol (PEG) ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ขนาดเล็กกว่า 4.56 ± 3.18 ไมโครเมตร เมื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ทั้งที่ไม่มีสารเติมแต่งและมีสารเติมแต่ง PEG, CTAB เป็นตัวช่วยในการตกตะกอน แคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าได้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้มีขนาด 3.61 ± 2.74 , 3.79 ± 3.24 และ 4.10 ± 7.17 ไมโครเมตร ตามลำดับ ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตและ

แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากับแคลเซียมคาร์บอเนต
ทางการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพลาสติก

คำสำคัญ : แคลเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมออกไซด์, เปลือกไข่, กระบวนการตกตะกอนทางเคมี, สาร
ลดแรงตึงผิว



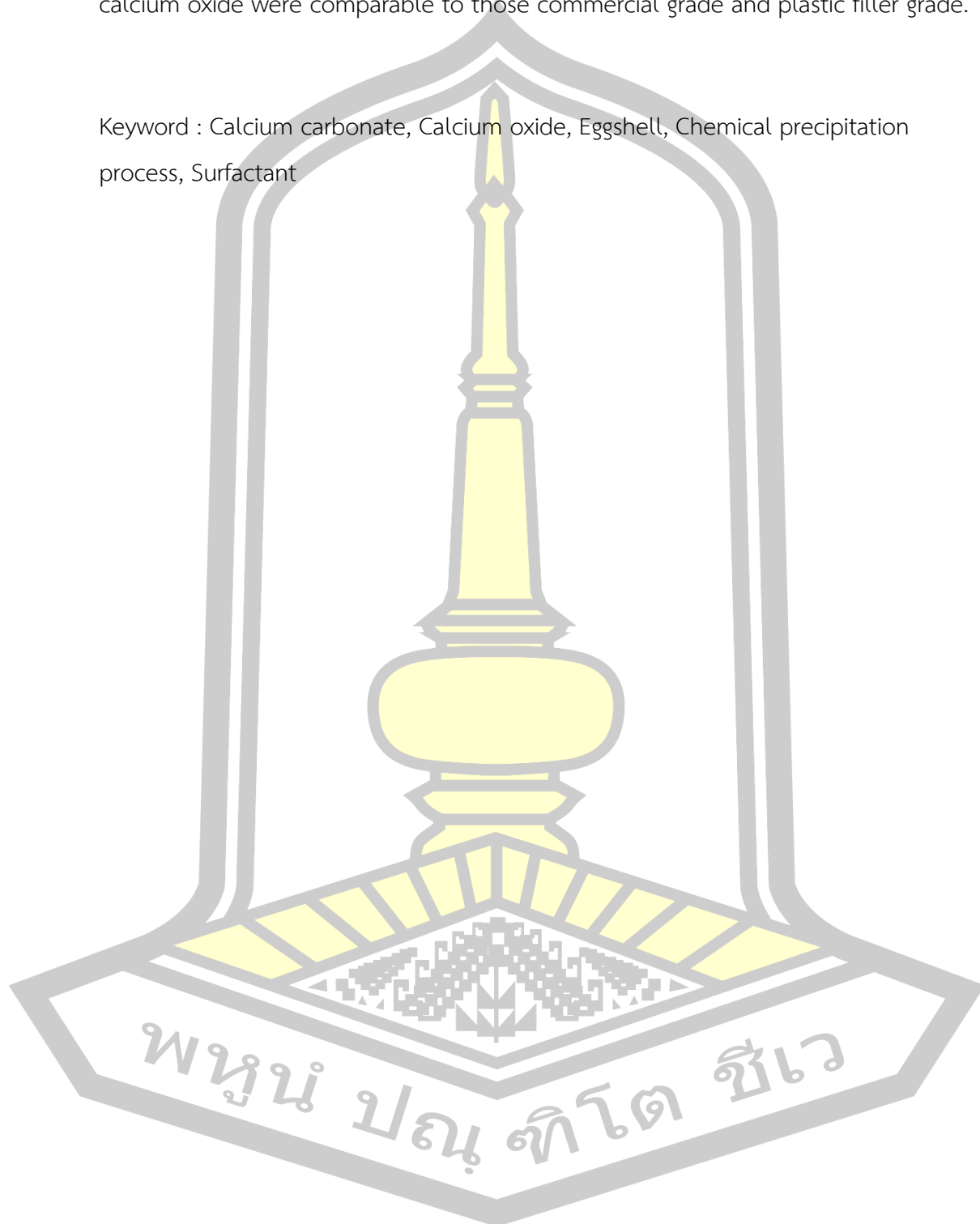
TITLE	Development of a Process for Production of Micro-sized Calcium Carbonate and Calcium Oxide Particle from Industrial-eggshell Waste		
AUTHOR	Somchai Ladhan		
ADVISORS	Assistant Professor Apipong Putkham , Ph.D. Yuvadee Chaiyachet , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Environmental Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

In this study, calcium carbonate and calcium oxide from eggshell waste was synthesized via chemical precipitation and calcination process, respectively. There are two main steps for determining the effect of initial concentration of extracted calcium chloride, agitation time, and reaction temperature on both physical and chemical properties of calcium carbonate. The smallest median particle size of precipitated calcium carbonate was found to be $6.486 \pm 6.844 \mu\text{m}$ and was obtained at $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ with 1.74 M calcium chloride, 1:1 ratio of sodium carbonate calcium chloride and 30 second agitation time. This precipitated calcium carbonate exhibited round shape with rough surface. In addition, cubic-liked shape was found on synthesizing temperature at $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ with median particle size of $4.41 \pm 3.25 \mu\text{m}$. However, median particle size of precipitated calcium carbonate tends to increase with decreasing of initial concentration of extracted calcium chloride and also increasing of agitation time. Additional of small amounts of cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) or polyethyleneglycol (PEG) during precipitation reaction tends to increase particle size of precipitated calcium carbonate and also promoted round shape of the particle. Particle size of calcium oxide obtained from $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ calcination temperature of precipitated calcium carbonate without additive, with PEG and CTAB were 3.61 ± 2.74 , 3.79 ± 3.24 and $4.10 \pm 7.17 \mu\text{m}$, respectively. In

conclusion, both particle size and purity of precipitated of calcium carbonate and calcium oxide were comparable to those commercial grade and plastic filler grade.

Keyword : Calcium carbonate, Calcium oxide, Eggshell, Chemical precipitation process, Surfactant



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับทุนจากบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ร่วมกับโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโทปีงบประมาณ 2560 และทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคามปีงบประมาณ 2561

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิพงษ์ พุฒคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ยุวดี ไชยเชษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิกร. สายแก้ว อาจารย์ ดร.มลฤดี เซาว์รัตน์ และอาจารย์ ดร.อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะการดำเนินงานวิจัยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณโรงผลิตลูกไก่เนื้อในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำเศษเปลือกไข่ไก่มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการศึกษางานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านต่างๆ ตลอดงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สมชาย ลาดหาร

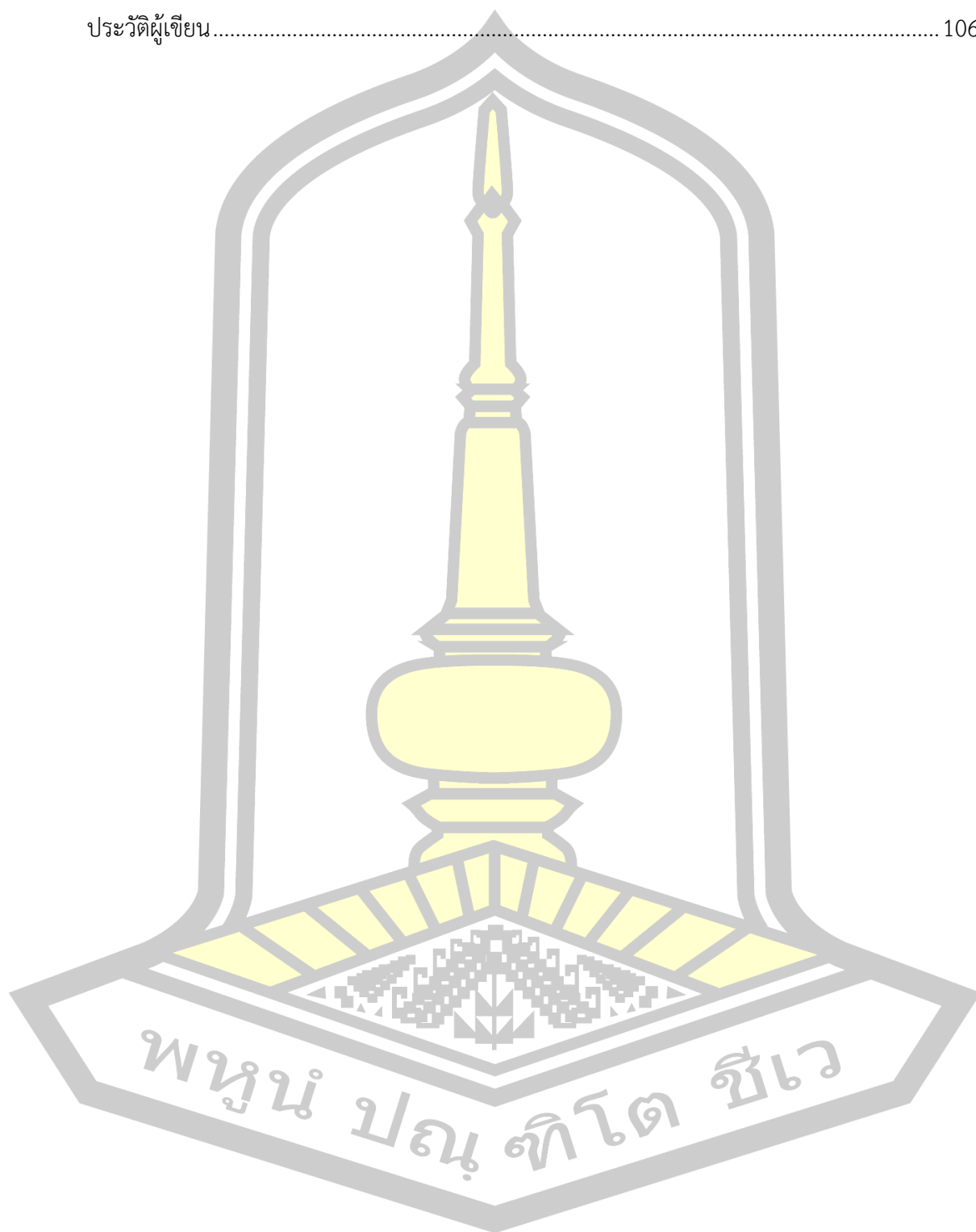
พูน ปณ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO_3).....	4
2.2 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide; CaO).....	6
2.3 เปลือกไข่.....	10
2.4 การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์.....	17
2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ.....	18
2.4.2 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกหรือแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์.....	19
2.5 การผลิตและการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 อุปกรณ์.....	40

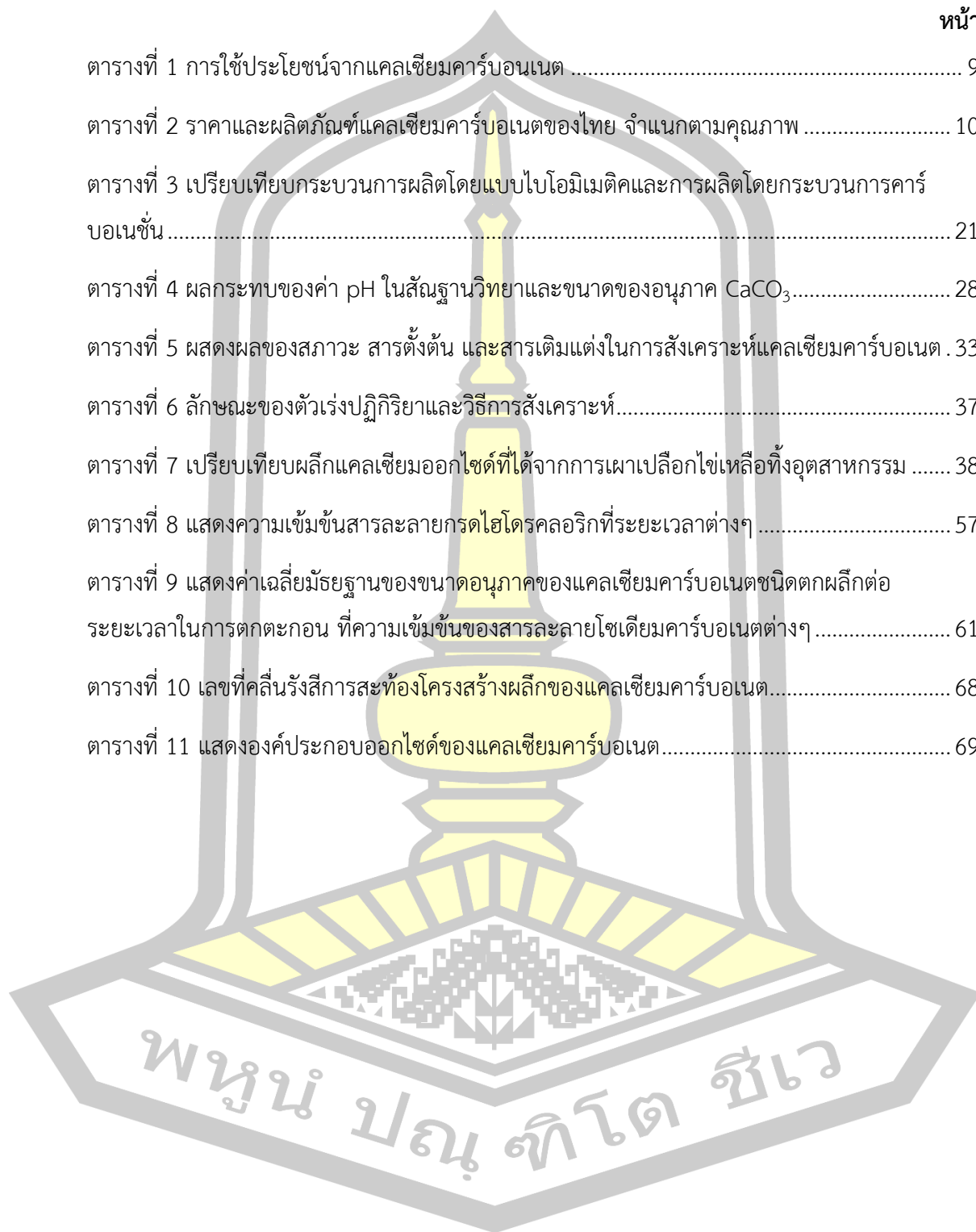
3.2 สารเคมี.....	40
3.3 เครื่องมือทดสอบ.....	41
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	41
3.4.1 การเตรียมเศษเปลือกไข่ไก่.....	41
3.4.2 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่.....	42
3.4.3 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก.....	47
3.4.4 การศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก.....	52
3.4.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซน์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก.....	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	55
4.1 ผลการเตรียมเศษเปลือกไข่ไก่.....	55
4.2 ผลการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ไก่.....	56
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิในขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต.....	58
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	69
4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์.....	76
บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก ตัวอย่างภาพประกอบในงานวิจัย.....	89

ภาคผนวก ข การคำนวณ..... 99
ประวัติผู้เขียน..... 106



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การใช้ประโยชน์จากแคลเซียมคาร์บอเนต	9
ตารางที่ 2 ราคาและผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตของไทย จำแนกตามคุณภาพ	10
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตโดยแบบไบโอมิเมติกและการผลิตโดยกระบวนการคาร์บอเนชั่น	21
ตารางที่ 4 ผลกระทบของค่า pH ในสัณฐานวิทยาและขนาดของอนุภาค CaCO ₃	28
ตารางที่ 5 แสดงผลของสภาวะ สารตั้งต้น และสารเติมแต่งในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต .	33
ตารางที่ 6 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการสังเคราะห์.....	37
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรม	38
ตารางที่ 8 แสดงความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ระยะเวลาต่างๆ	57
ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกต่อระยะเวลาในการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตต่างๆ	61
ตารางที่ 10 เลขที่คลื่นรังสีการสะท้อนโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	68
ตารางที่ 11 แสดงองค์ประกอบออกไซด์ของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	69



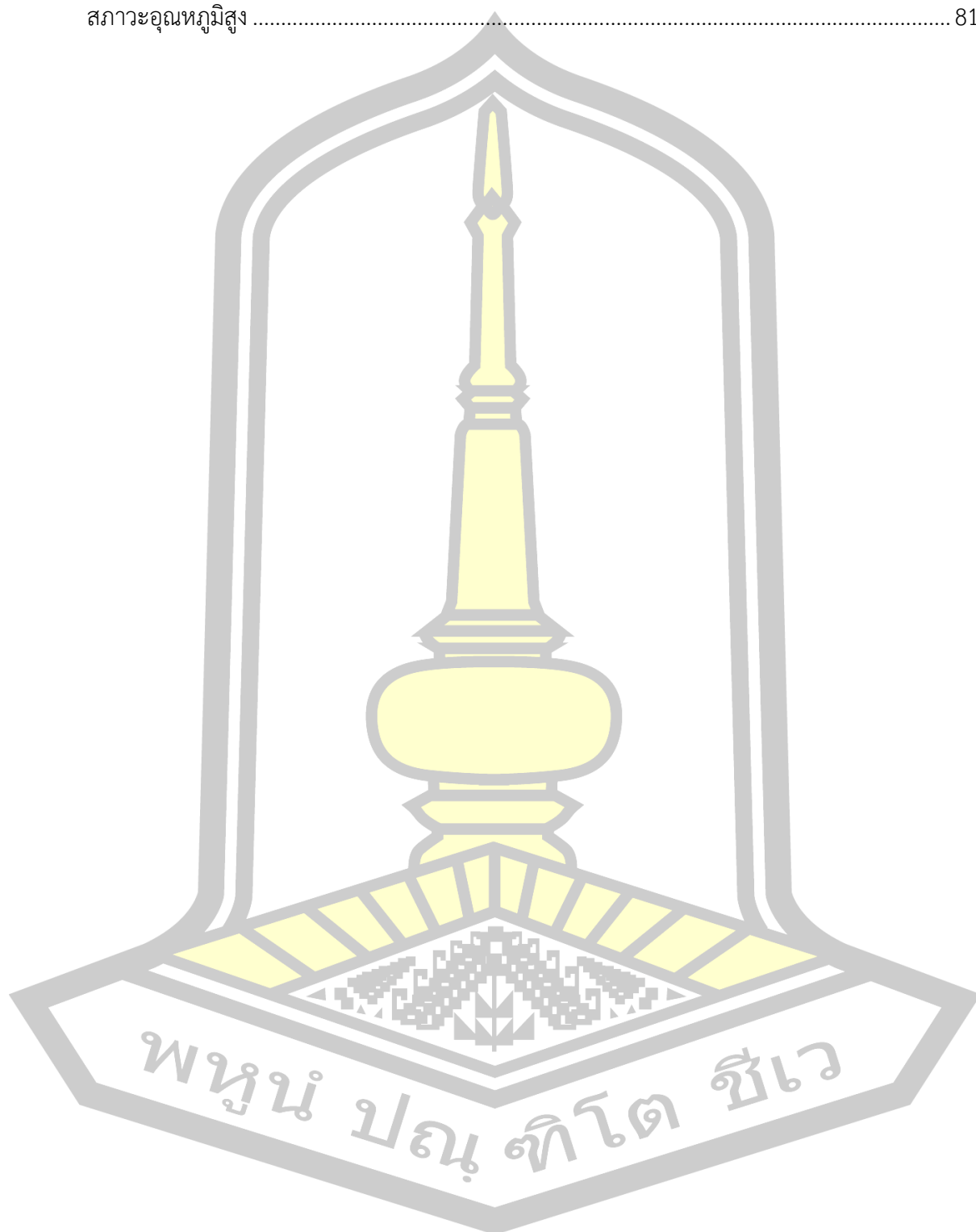
สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 ร้อยละความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มปูนขาว.....	8
ภาพประกอบที่ 2 โครงสร้างของไขไก่	12
ภาพประกอบที่ 3 เปลือกไข่ที่ถ่ายด้วยเทคนิค SEM.....	14
ภาพประกอบที่ 4 ภาพตัดขวางผ่านตามหน้าตัดด้านข้างของเปลือกไข่ไก่.....	15
ภาพประกอบที่ 5 แสดงโครงสร้างลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่.....	16
ภาพประกอบที่ 6 แผนผังกระบวนการผลิตเปลือกไข่ผง (แคลเซียมจากเปลือกไข่)	17
ภาพประกอบที่ 7 การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์.....	18
ภาพประกอบที่ 8 เปรียบเทียบคุณภาพกระดาษหลังจากเติม PCC/GCC เป็นส่วนผสมในกระดาษ..	20
ภาพประกอบที่ 9 ขั้นตอนผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกระบวนการรีเวอร์สอิมัลชัน	23
ภาพประกอบที่ 10 กระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากแหล่งธรรมชาติ	24
ภาพประกอบที่ 11 SEM images ของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการเติมสารละลาย Asp ลงใน สารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนต	25
ภาพประกอบที่ 12 ลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันในแต่ละสถานะของอุณหภูมิ และความเป็น กรด-เบส.....	26
ภาพประกอบที่ 13 ผลของอุณหภูมิที่มีสารเติมแต่ง และความเข้มข้นแตกต่างกันของ CaCO_3 ใน a, b และ c.....	27
ภาพประกอบที่ 14 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว	29
ภาพประกอบที่ 15 สารลดแรงตึงผิวในสารละลายที่เป็นน้ำ.....	30
ภาพประกอบที่ 16 ลักษณะการเกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาปัจจัยต่างๆ...	32
ภาพประกอบที่ 17 ขั้นตอนการทดสอบร้อยละมวลของ CaCO_3 ในเปลือกไข่	34
ภาพประกอบที่ 18 ขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ไก่ที่บด และแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศา เซลเซียส ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง.....	38
ภาพประกอบที่ 19 เส้นโค้ง TG ของเปลือกไข่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้รับในอัตราการให้อุณหภูมิที่ แตกต่างกันความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแบบไดนามิก.....	39

ภาพประกอบที่ 20 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ EDTA เป็นไทเทรนต์ สารประกอบเชิงซ้อน.....	43
ภาพประกอบที่ 21 กราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	43
ภาพประกอบที่ 22 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณ ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้.....	45
ภาพประกอบที่ 23 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมต่อปริมาณความเข้มข้น สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้.....	46
ภาพประกอบที่ 24 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติทาง กายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	49
ภาพประกอบที่ 25 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอ ไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	50
ภาพประกอบที่ 26 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอ ไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	51
ภาพประกอบที่ 27 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง.....	53
ภาพประกอบที่ 28 ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์....	54
ภาพประกอบที่ 29 a) เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด b) ผงเปลือกไข่ ขนาดไม่เกิน 125 ไมโครเมตร.....	56
ภาพประกอบที่ 30 ภาพถ่ายเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด (กำลังขยาย 8,000 เท่า) b) ภาพถ่ายแคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM).....	56
ภาพประกอบที่ 31 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ต่ออัตราส่วนสารละลายแคลเซียมคลอ ไรด์ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต.....	59
ภาพประกอบที่ 32 แนวโน้มค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อระยะเวลา ในการกวนผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตต่างๆ.....	61
ภาพประกอบที่ 33 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สภาวะอุณหภูมิสูง.....	63
ภาพประกอบที่ 34 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สภาวะอุณหภูมิสูง.....	64

ภาพประกอบที่ 35 ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของแคลเซียมคาร์บอเนต	66
ภาพประกอบที่ 36 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต	67
ภาพประกอบที่ 37 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	71
ภาพประกอบที่ 38 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่งต่อสภาวะอุณหภูมิสูง	72
ภาพประกอบที่ 39 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	73
ภาพประกอบที่ 40 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อ	73
ภาพประกอบที่ 41 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งที่ระยะเวลาต่างๆ.....	74
ภาพประกอบที่ 42 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งที่อุณหภูมิสูง	75
ภาพประกอบที่ 43 ลักษณะสัณฐานของโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่ง	76
ภาพประกอบที่ 44 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์จากอิทธิพลของสารเติมแต่งที่ระยะเวลาต่างๆ	77
ภาพประกอบที่ 45 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ต่อสภาวะอุณหภูมิสูง	78
ภาพประกอบที่ 46 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	79
ภาพประกอบที่ 47 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	79
ภาพประกอบที่ 48 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	80
ภาพประกอบที่ 49 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อสภาวะอุณหภูมิสูง	80

ภาพประกอบที่ 50 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งต่อ
สภาวะอุณหภูมิสูง..... 81



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตสินค้านอกจากจะต้องผลิตสินค้าที่มีคุณภาพตามมาตรฐานไทยและอาจรวมถึงมาตรฐานโลกแล้ว ในปัจจุบันต้องคำนึงถึงวิธีการผลิตสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย การผลิตสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนอกจากจะเป็นการแสดงความรักชอบโดยตรงของผู้ประกอบการในการลดปัญหามลพิษจากกระบวนการผลิตที่จะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมแล้ว ยังช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ที่ดีต่อผู้ผลิตและต่อตัวสินค้าเอง ทำให้เพิ่มศักยภาพของสินค้าในการแข่งขันกับผลิตภัณฑ์อื่นๆด้วย ส่วนอุตสาหกรรมผลิตอาหารประเภทเนื้อไก่ จำเป็นต้องมีการเพาะเลี้ยงพ่อแม่ไก่ ในหนึ่งปีที่ลูกไก่จะเจาะเปลือกไข่ออกมา จะมีเปลือกไข่เกิดขึ้นประมาณ 3,778 ตัน จากโรงฟักภายในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ซึ่งทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดโดยการฝังกลบประมาณ 8,000,000 บาทต่อปี นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการหาพื้นที่ในการฝังกลบเพิ่มไม่ได้ เนื่องจากเกิดการต่อต้านจากประชาชน อีกทั้งการฝังกลบก่อให้เกิดแก๊สมีเทนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จากไก่มีรอยเท้าคาร์บอนเกิดมากขึ้น ดังนั้นการหาแนวทางใหม่ในการจัดการปัญหาเศษเปลือกไข่ที่เกิดขึ้นจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนและสำคัญ เปลือกไข่ไก่เป็นเซรามิกคอมโพสิตทางชีวภาพ โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่มิมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ผลึกแคลไซต์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย เปลือกไข่ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก (98%) และเมื่อนำเปลือกไข่ไปเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ≥ 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์เป็นผลผลิต ทางบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จึงได้หาแนวทางแปรรูปเปลือกไข่เหลือทิ้งนี้ให้เป็นวัตถุดิบ ทั้งในรูปของ แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งหากผลิตได้จะทำให้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมภายในกลุ่มธุรกิจของเครือซีพี เช่น อุตสาหกรรมสัตว์ อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมนอกกลุ่มของเครือซีพี เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตสี เป็นต้น ในเบื้องต้นบริษัท ซีพีเอฟได้ทำการทดลองแปรรูปเปลือกไข่ด้วยเครื่องบดอุตสาหกรรมทั้งที่มีในเครือและนอกเครือซีพี พบว่าอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบด มีขนาดอนุภาคในช่วง 45 - 147 ไมโครเมตร แคลเซียมคาร์บอเนตที่บดได้ขนาดดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปใช้งานเชิงอุตสาหกรรมในวงแคบ เหมาะต่อการนำไปใช้บางอุตสาหกรรมเท่านั้น อีกทั้งยังมีราคาต่ำ ดังนั้นทางผู้ประกอบการซีพีเอฟ จึงต้องการหาแนวทางในการแปรรูปเปลือกไข่ให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 45 ไมโครเมตรเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพการนำไปใช้และก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง

ปัจจุบันมีความต้องการอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ขนาดละเอียด (Submicron) เพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมหลายประเภท ซึ่งปัจจุบันเครื่องบดละเอียดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ บอลมิลล์ โรลเลอร์มิลล์ เครื่องบดแบบสั่น (Vibration mills) Ang mill และ Planetary ball mill เครื่องบดเหล่านี้มีข้อเสียในเรื่องของการสึกหรอ การปนเปื้อน จากเครื่องบด โดยเฉพาะเมื่อบดวัสดุที่มีความแข็งสูง และขนาดอนุภาคที่บดได้ยังมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่อุตสาหกรรมต้องการ อีกทั้งทางผู้ประกอบการซีพี ได้ทดลองนำเปลือกไข่ไปบดและใช้เป็นวัสดุผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าทำให้สีของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้เปลี่ยนไป ดังนั้นเปลือกไข่จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุเติมแต่งโดยตรง อีกทั้งโรงงานผลิตพลาสติกในเครือซีพีเองยังมีความต้องการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดมัลติฐาน ไม่เกิน 5 ไมโครเมตร จากรายงานการวิจัยพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (Precipitate Calcium carbonate: PCC) เป็นวิธีการที่ง่ายและโดยทั่วไปจะสามารถควบคุมให้เกิดขนาดอนุภาคที่ต้องการได้ ดังนั้นการแปรรูปเปลือกไข่ด้วยวิธีทางเคมีเพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก จึงเป็นทางเลือกหนึ่งทำให้ได้ CaCO_3 และ CaO ที่มีขนาดเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม อีกทั้งราคาของ PCC ที่ผลิตได้มีราคาสูงกว่า CaCO_3 จากวิธีการบดเชิงกล รวมถึงเชิงความร้อน 3-8 เท่า กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Precipitated Calcium Carbonate: PCC) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการทำในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเศษเปลือกไข่อุตสาหกรรม ทั้งในเรื่องที่กระบวนการสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางธรรมชาติที่มีสารอื่นเจือปนได้ กระบวนการสังเคราะห์ไม่ซับซ้อนรวมถึงไม่ต้องทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความร้อนและอุณหภูมิสูง และไม่มีน้ำมันเจือปนในน้ำเสียซึ่งบำบัดได้ยาก ข้อดีเหล่านี้ยังตรงกับความต้องการของภาคเอกชน ดังนั้นผู้วิจัยและบริษัทเอกชนจึงได้เลือกกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมาใช้ในการวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเศษเปลือกไข่อุตสาหกรรม

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก
- 3) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซน์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เปลือกไข่ไก่อุตสาหกรรมเหลือทิ้งที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ นำมาจากโรงฟัก บริษัท ซีพีเอฟ โชนชัย จำกัด

- 2) การเตรียมแคลเซียมคลอไรด์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างผงเปลือกไข่ 10 กรัม ต่อความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5, 1, 2, 3 และ 5 โมลต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร
- 3) การศึกษาอัตราส่วนโมลต่อลิตรในการเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนที่ 1:1, 1:1.5 และ 1:2 เท่า
- 4) อิทธิพลของระยะเวลาในขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 30 วินาที 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง
- 5) อิทธิพลของอุณหภูมิในขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต 60, 100, และ 160 องศาเซลเซียส
- 6) การศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) และ Polyethyleneglycol (PEG) ด้วยความเข้มข้น 20 มิลลิโมล ในปริมาตร 3 มิลลิลิตร
- 7) การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่สังเคราะห์ได้ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 8) การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุสังเคราะห์ คือ ลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดของขนาดอนุภาค (Pore-size distribution) คุณสมบัติทางเคมีคือ X-ray Diffractometer (XRD), Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบข้อมูลสัดส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกจากเปลือกไข่อุตสาหกรรม
- 2) ทราบอิทธิพลของสารเติมแต่งที่ใช้ตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก
- 3) สามารถช่วยลดปริมาณค่าใช้จ่ายจากการฝังกลบเปลือกไข่ ลดปัญหาข้อร้องเรียนจากการฝังกลบ การสร้างมีรายได้จากการขายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปเปลือกไข่
- 4) ได้องค์ความรู้ใหม่ในการแปรรูปเปลือกไข่ไก่ที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมด้วยวิธีการตกตะกอนให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดเหมาะสมต่อความต้องการของอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถนำความรู้นี้ไปใช้ดำเนินการออกแบบและจัดสร้างกระบวนการผลิตได้
- 5) เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและทางเลือกในการนำกลับมาใช้ใหม่ให้กับวัสดุเหลือใช้ (เปลือกไข่ไก่)

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตสินค้ามักจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องกากของเสียอุตสาหกรรมขึ้น การแก้ปัญหาของเสียอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่หลายวิธีการ แตกต่างกันไปขึ้นกับคุณสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วการบำบัดและกำจัดของเสียมักถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันแนวทางในการลดของเสียจากแหล่งกำเนิด การแปรรูปของเสียเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่น ๆ มักถูกมาใช้แทนหรือควบคู่กับกระบวนการบำบัดและกำจัดของเสียเนื่องจากการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด และบางครั้งยังสามารถใช้ประโยชน์จากการแปรรูปของเสีย ในส่วนของกระบวนการผลิตลูกไก่ จะมีเปลือกไข่ที่ถูกลูกไก่เจาะออกมา ในแต่ละปีจะมีเปลือกไข่เกิดขึ้นประมาณ 3,778 ตัน และทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดโดยการฝังกลบมหาศาล แล้วยังมีปัญหาในการหาพื้นที่ในการฝังกลบ เกิดการต่อต้านจากประชาชน ดังนั้นเพื่อหาแนวทางใหม่ในการจัดการปัญหาเศษเปลือกไข่ที่เกิดขึ้น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่โดยการนำเศษเปลือกไข่ไก่จากอุตสาหกรรมโรงฟักไก่ ไปสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์และพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา และแคลเซียมออกไซด์ยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ไม่ใช่แค่ในด้านพลังงานทดแทน แต่ในอุตสาหกรรมต่างๆ ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ การชุบ สี การบำบัดน้ำเสีย การเกษตร เป็นต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ และเปลือกไข่ที่จะนำมาใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ กระบวนการผลิต การตรวจวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ด้วยวิธี EDTA รวมถึงผลการศึกษาศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์เบื้องต้นด้วย

2.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO_3)

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่เป็นแร่หินปูนในชั้นหิน จากพืช และสิ่งมีชีวิตที่มีองค์ประกอบเป็นที่มีแคลเซียมอยู่ เช่น กระดูก หินปะการัง เปลือกหอย และเปลือกไข่ เป็นต้น โดยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น CaCO_3 ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีคือแคลเซียมคาร์บอเนต(CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คิดเป็นร้อยละ 56 และร้อยละ 44 ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสสารแคลเซียมคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นของน้ำ 2.72 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร แร่แคลเซียมออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับเกลือจะเกิดฟองฟู สลายตัวเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ตั้งแต่ 700-1000 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติเฉพาะที่ไม่เป็นพิษ และมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายน้ำเมื่อมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำที่มี CaCO_3 เราเรียกว่าน้ำกระด้าง และสามารถตกตะกอน

เมื่อเสียคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบที่มีลักษณะต่างกันซึ่งในแต่ละลักษณะจะมีชื่อเรียกตามลักษณะที่เฉพาะของแร่ เช่นแร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเรียกว่าแร่แคลไซต์ (Calcite) หรือแคลสปาร์ (Calspar) ซึ่งมีความขาว (Whiteness) และความสว่าง (Brightness) สูงจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆ เช่น การใช้เป็นสารตัวเติมเต็ม (Filter) และสารตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรมกระดาษ สีพลาสติก พีวีซี และยาง เป็นต้น เช่น ยางในและยางนอกของรถยนต์ รองเท้า สายพานลำเลียง และแคลเซียมคาร์บอเนตยังใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน ผงซักฟอก ยาและเวชภัณฑ์ต่างๆ ชิ้นส่วนการผลิต และอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์ สายหุ้มโทรศัพท์ ฉนวนหุ้มสายไฟ ปากกา ยางลบ ถุงมือ และแว่นตา เป็นต้น ตามลักษณะของโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตมีโครงสร้างผลึก 3 แบบประกอบด้วย

2.1.1. แคลไซต์ (Calcite)

เป็นแร่คาร์บอเนตและเป็นแร่ที่เสถียรที่สุดในกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้างเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ในรูปผลึกที่มีความซับซ้อนมาก และแบบที่พบเห็นได้มากที่สุดคือผลึกที่มีรูปร่างเหมือนรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือมีลักษณะเป็นแท่งปลายด้านบนแหลม และความยาวคล้ายฟันสุนัข เรียกว่าฟันหมา (Dog-tooth spar) หรือหินเขี้ยวหมา ถ้าเหมือนปลายเล็บเรียกว่า Nail-head spar เนื้อโปร่งแสงและโปร่งใส เรียก Iceland Spar หรือ Double refracting Spar ถ้ามีลักษณะเป็นใยหรือเป็นเส้น ๆ บางที่ก็เรียก Satin Spar เช่นเดียวกับเรียกแร่ยิปซัมแบบเส้นใย หากแต่แคลไซต์มีปฏิกิริยาหรือฟุ้งก่อก่อเกลือ นอกจากนี้ยังอาจเกิดในลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ รวมกันเป็นกระจุก เนื้อแน่นละเอียด หรือพบในลักษณะเป็นหินงอกหินย้อยก็ได้ มีรอยแยกแนวเรียบที่สมบูรณ์ 3 ทาง แต่ผิดปกติเพราะแต่ละทางไม่ตั้งฉากกัน เมื่อเคาะ หรือสกัดออกมาจะแตกออกมา มีรูปร่างเหมือนสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนอยู่เสมอ ความแข็ง 3 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.72 มีความวาวคล้ายแก้ว หรือด้านเหมือนดิน (Earthy) ขึ้นอยู่กับกระบวนการเกิดและผลิตในการแคลไซต์

แร่แคลไซต์ปกติมีสีขาว หรือไม่มีสี แต่ก็อาจจะมีสีอื่นๆ ได้ เช่น สีเทา แดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ถ้ามีมลทินอื่นปะปน เช่นพวกแร่ไพไรต์ ทองแดง มาลาไคท์ เป็นต้น จะมีสีเปลี่ยนไปจากน้ำตาล ไปจนกระทั่งมีสีดำ เนื้อแร่โปร่งใสไปจนกระทั่งโปร่งแสง สีผงละเอียดสีขาว หรือเทา

จากแหล่งการกำเนิดที่พบได้ในทั่วไปในหินชั้นและหินแปร โดยเฉพาะบริเวณมีหินปูนเป็นองค์ประกอบเมื่อได้รับความร้อนและความดันที่เหมาะสมจะกลายเป็นหินอ่อน นอกจากนี้ยังพบแคลไซต์ในโพรงของหินภูเขาไฟ เช่น หินบะซอลต์ เป็นต้น และพบอยู่ในแร่ธาตุชนิดอื่น เช่น ฟลูออไรด์ ควอตซ์ แบไรต์ สฟาเลอไรต์ กาลีนา เซเลสไทท์ ซัลเฟอร์ ทอง ทองแดง มรกต อะพาไทต์ ไบโอไทท์ ซีโอไลท์ แร่ตะกั่วซัลไฟด์ คาร์บอเนต แร่โลหะพื้นฐานชนิดต่างๆ ที่เกิดจากน้ำร้อนใต้ผิวโลก เป็นต้น แหล่งที่พบแคลไซต์ในประเทศไทย ตั้งแต่จังหวัดเชียงราย จนถึงชัยนาท จนถึงจังหวัดยะลาแต่พบมาก

ที่จังหวัดลพบุรี สระบุรี กาญจนบุรี ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครสวรรค์ และเพชรบุรี ส่วนในต่างประเทศ พบมากที่ประเทศอังกฤษ จีน เม็กซิโก สหรัฐอเมริกา อิตาลี สเปน

2.1.2. อราโกไนท์ (Aragonite)

อราโกไนท์เป็นแร่ที่มีลักษณะเป็นผลึกแฝด คล้ายผลึกหกเหลี่ยม แบบแท่งยาวปลายเรียวแหลมคล้ายแท่งดินสอ มีหน้าตัดตรงปลายบน และปลายล่าง เหมือนรูจั่ว ถ้าเป็นผลึกแฝด จะพบรูปหน้าตัดคล้ายหกเหลี่ยมแตกต่างจากแร่ระบบรูปผลึกเฮกซะโกนอล

สมบัติทางเคมี มีความแข็งโปร่งแสง และโปร่งใส ส่วนใหญ่พบเป็นสีขาว หรือสีเหลืองอ่อน และไม่มีสี มีค่าความแข็งระดับ 3.5 ถึง 4.0 โมลส์ ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.95 โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนจากอราโกไนท์ที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้การสันดาปสมบูรณ์

จากลักษณะการกำเนิด พบน้อยมากเพราะเป็นแร่ที่เสถียร มักจะพบใกล้พื้นแผ่นดินและมีอุณหภูมิต่ำในบริเวณมีน้ำพุร้อน หรืออาจเกิดร่วมกับแร่ยิบซั่ม และแร่เหล็ก หรืออาจเป็นชั้นของเปลือกหอย ซึ่งทำให้เปลือกหอยมีลักษณะวาวคล้ายมุก อาจจะเป็นกระดูกเคลือบอยู่บนแร่เซอร์เพนทีน หรือในรูพรุนของหินบะซอลท์ ในประเทศไทยเกิดได้ทั่วไปในแหล่งหินปูนหรือในเปลือกหอย ส่วนในต่างประเทศพบที่ประเทศที่ประเทศเป็น ฝรั่งเศส ซิซิลี จะมีลักษณะเป็นผลึกฝาแฝด และ ประเทศอังกฤษจะพบผลึกลักษณะแบบหนา นอกจากนี้ยังพบอีกหลายรัฐในประเทศสหรัฐอเมริกา

มีพบน้อยมากเพราะเป็นแร่ที่ไม่คงตัว (Unstable) มักจะพบเกิดใกล้ ๆ พื้นแผ่นดิน และมีอุณหภูมิต่ำ พบเกิดในบริเวณที่มีน้ำพุร้อน อาจเกิดร่วมในชั้นของแร่ยิบซั่มและแร่เหล็ก หรือเกิดเป็นชั้นหรือส่วนของเปลือกหอย เป็นตัวที่ทำให้เปลือกหอยวาวคล้ายเปลือกมุก อาจจะเป็นกระดูกเคลือบ อยู่บนแร่เซอร์เพนทีน หรือในรูพรุนของหินบะซอลท์

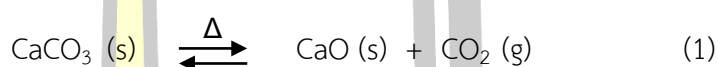
2.1.3. วาเทอร์ไรท์ (Vaterite)

เป็นผลึกที่อยู่ในสถานะระหว่างการแคลไซต์ และอราโกไนท์พบได้ระหว่างการตกตะกอน แคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิสูง พบได้น้อย และไม่มีเสถียร

2.2 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide; CaO)

ปูนขาว ไลม์ (lime) มีชื่อเรียกทางเคมีว่า แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) และมีสูตรทางเคมีคือ CaO ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยปกติแล้วจะผลิตแคลเซียมออกไซด์, CaO จากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO₃) เป็นองค์ประกอบ ณ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการเผาใหม้ว่า calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมา ปูนขาวนี้ สามารถทำ

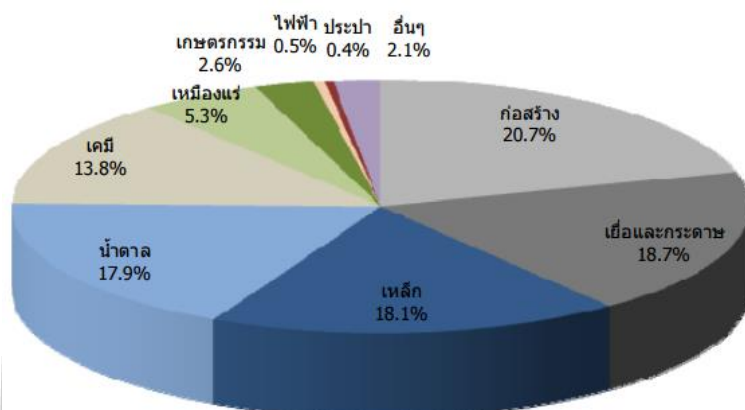
ปฏิกิริยากับ CO_2 ที่อยู่ในอากาศ โดยอาศัยระยะเวลาที่นานพอ กลับกลายเป็น CaCO_3 ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บได้ คุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ สูตรโมเลกุล CaO มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือเหลืองอ่อน มีความหนาแน่น 3.35 g/cm^3 จุดหลอมเหลว $2,572 \text{ }^\circ\text{C}$ ($2,845 \text{ K}$) จุดเดือด $2,850 \text{ }^\circ\text{C}$ ($3,123 \text{ K}$) และน้ำหนัก 56.077 g/mol แคลเซียมออกไซด์สามารถเตรียมได้จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง $900 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยมีลักษณะผงแคลเซียมออกไซด์จะมีรูปร่างไม่แน่นอนปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงสมการ



จากสมการปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมตัวกับ CaO แล้วกลับไปเป็น CaCO_3 ได้เนื่องจากความดันที่ได้จากแก๊ส CO_2 ที่อยู่ในสมดุลระหว่าง CaO กับ CaCO_3 นั้นเอง ซึ่งความดันแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความดันจึงเพิ่มสูงขึ้นด้วยเป็นผลให้ในกระบวนการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการดูดเอาแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้นออกจากปฏิกิริยาเพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ แล้วเป็นการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ให้มากขึ้นด้วย

แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำเร็จรูปในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และอุตสาหกรรมยาง เป็นต้น สำหรับแคลเซียมออกไซด์ปัจจุบันยังมีการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ใช้ผสมในปุ๋ย ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เช่น เซอร์ชีวภาพ (Biosensors) อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น จากการสำรวจปริมาณความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มปูนขาวโดยบริษัท สุราษฎร์จนจำกัด (มหาชน) พบว่าอุตสาหกรรม ก่อสร้างมีความต้องการมากที่สุดที่ประมาณร้อยละ 20.7 และมีอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมน้ำตาล และอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งมีความต้องการรองลงมาที่ร้อยละ 18.7, 18.1, 17.9 และ 13.8 ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 1

การนำแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ไปใช้กับอุตสาหกรรมนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลากหลายอย่างแล้วแต่การนำไปใช้ มีการนำเอาแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมพลาสติกใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกหีบห่ออาหาร ใช้ปรับสภาพผลิตภัณฑ์ให้ทนต่อสภาพอากาศ ใช้ปรับปรุงการนำความร้อน และลดราคาวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษสามารถใช้ลดราคาของวัสดุสารตั้งต้น ใช้เป็นสารเพิ่มความขาว ใช้เป็นตัวปรับให้มีความสามารถทางการพิมพ์ให้สูงขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมสี และหมึกพิมพ์ สามารถใช้

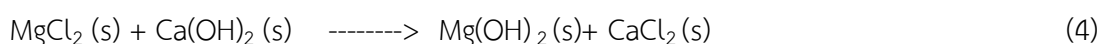


ภาพประกอบที่ 1 ร้อยละความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มปูนขาว
ที่มา: บริษัท สุราษฎร์จันจำกัด (มหาชน) พ.ศ. 2559

เป็นสารเพิ่มความขาว ใช้เป็นสารผสมทำให้สี หมึกเกิดความเสถียร เรียบเนียนเกิดความสม่ำเสมอของเนื้อสี หมึกพิมพ์และปรับสภาพผลิตภัณฑ์ให้ทนต่อสภาพอากาศ มักจะใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติม (Filter) ที่สำคัญ โดยมีคุณสมบัติคือทำให้สีมีความต่อเนื่องและเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตยังใช้แทนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งมีราคาสูงกว่า เพื่อให้สีมีความเงามากขึ้น และในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติใช้ลดราคาวัสดุตั้งต้นและอุตสาหกรรมอาหารปศุสัตว์ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารโดยเพิ่มปริมาณของแคลเซียม นอกเหนือจากการใช้ในเชิงอุตสาหกรรมแล้วยังมีการใช้ในด้านอื่นๆ ด้วย เช่น ด้านการเกษตร ช่วยปรับค่าความเป็นกรดต่างในดิน ทำให้แบคทีเรียบางชนิดในดินเปลี่ยนไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อโรครวมทั้งช่วยปรับโครงสร้างดินให้ร่วน ไถพรวนได้ง่ายขึ้น มาตรฐานแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ในการเกษตรคือ มอก.223-2520 เรื่องวัสดุพวกแคลเซียมออกไซด์เพื่อการเกษตร ด้านการบำบัดน้ำ จะช่วยแก้ไขน้ำกระด้าง โดยจะเอาไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นต้นเหตุให้เกิดน้ำกระด้าง กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนออกมา แสดงสมการได้ดังนี้ กรณีน้ำกระด้างชั่วคราวที่เกิดจากไบคาร์บอเนตของแคลเซียม และแมกนีเซียม



กรณีน้ำกระด้างถาวรที่เกิดจากสารประกอบคลอไรด์ สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบไนเตรตของแคลเซียมและแมกนีเซียม



ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง นำไปใช้งานก่อสร้างได้โดยตรง เช่น การสร้างถนน ใช้เป็นสารตัวเติมในยางแอสฟัลต์สำหรับลาดถนน ใช้ผสมทราย ทำปูนฉาบ ปูนสอสำหรับงานก่อ ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ มีมาตรฐานกำหนดคุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้อยู่หลายมาตรฐานทั้งในประเทศและต่างประเทศ อุตสาหกรรมเคมีถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมเคมีหลายชนิด เช่น การผลิตโซดาไฟ ผลิตสารฟอกขาว และอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้า ก็ต้องใช้แคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์สูง เป็นตัวช่วยดึงสารเจือปนต่างๆ เพื่อผลิตเหล็กคุณภาพสูง

ตารางที่ 1 การใช้ประโยชน์จากแคลเซียมคาร์บอเนต

อุตสาหกรรม	ประโยชน์จากการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้
พลาสติก	<ul style="list-style-type: none"> เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกหีบห่ออาหาร ปรับสภาพผลิตภัณฑ์ให้ทนต่อสภาพอากาศ ปรับปรุงการนำความร้อน ลดราคาวัสดุตั้งต้น
กระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> ลดราคาวัสดุตั้งต้น เป็นสารเพิ่มความขาว ปรับให้มีความสามารถทางการพิมพ์สูงขึ้น
สี หมึกพิมพ์	<ul style="list-style-type: none"> เป็นสารเพิ่มความขาว เป็นสารผสมทำให้สี หมึกเกิดความเสถียร ปรับสภาพผลิตภัณฑ์ให้ทนต่อสภาพอากาศ
ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ	<ul style="list-style-type: none"> ลดราคาวัสดุตั้งต้น
อาหารปศุสัตว์	<ul style="list-style-type: none"> ส่วนผสมอาหารเพิ่ม แคลเซียม

ที่มา: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ พ.ศ. 2547

ทั้งนี้ปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาเป็นอันดับแรกๆ คือ ขนาดของอนุภาค โดยขนาดของอนุภาค ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ดังตารางที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเมื่อมีขนาดที่เล็กกว่า 45 ไมโครเมตรเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมมากในหลายประเภท ของอุตสาหกรรม และขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กของแคลเซียมคาร์บอเนตยิ่งทำให้มีขนาดเล็กยิ่งมีมูลค่าในเพิ่มขึ้นเชิงพาณิชย์ที่สูงขึ้นอีก

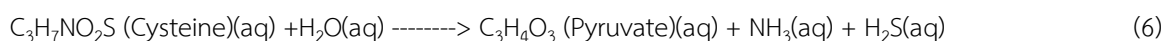
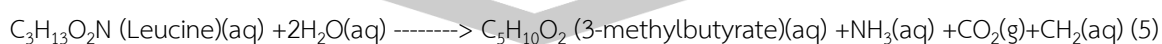
ตารางที่ 2 ราคาและผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตของไทย จำแนกตามคุณภาพ

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	แคลเซียม คาร์บอเนต (%)	ความขาว	การใช้ประโยชน์	ราคา (บาท/ตัน)
0.3-1	98.5	>95	อุตสาหกรรมกระดาษในรูป slurry 65-75% solid	5000-8000
1-2	98.5	>95	อุตสาหกรรมกระดาษเกรดสูง อุตสาหกรรมสีเกรดสูง อุตสาหกรรมพลาสติกเกรดสูง	3000-5000 2500-5000
2-3	98.5	>95	อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก และพีวีซี อุตสาหกรรมยางเส้นน้ำมัน wall paper กระจกบปุย ถุงพลาสติก	1500-2000 1000-15000
5	98	>94	อุตสาหกรรมสีเกรดต่ำ	1000-15000
45	98	>94	ผงซักฟอก ยาสีฟัน อุตสาหกรรม ยาง	800-1000
147	98	>94	อาหารสัตว์และปุ๋ย	400-600

ที่มา: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ พ.ศ. 2547

2.3 เปลือกไข่

ไข่ถือเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการประกอบเป็นอาหาร ทั้งในระดับครัวเรือนจนถึงระดับในภาคอุตสาหกรรม และในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมนั้นมีการผลิตในปริมาณมาก ดังนั้นสิ่งที่เหลือทิ้งคือเปลือกไข่ เปลือกไข่จึงเป็นปัญหาที่สำคัญในการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ และวิธีที่นิยมมากที่สุดคือการฝังกลบ ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายมากและยังต้องนำมาซึ่งปัญหาต่างๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมามากมาย เช่น การหาพื้นที่ในการฝังกลบ ปัญหาจากการฝังกลบ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงต่างๆ แหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวแพร่เชื้อโรค กลิ่นที่เหม็นเนื่องจากการเกิดก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แอมโมเนีย (H₂S) ที่เกิดจากการหมักของกรดอะมิโนที่ได้จากการย่อยสลายส่วนที่เป็นโปรตีนในเปลือกไข่โดยจุลินทรีย์ดังสมการ

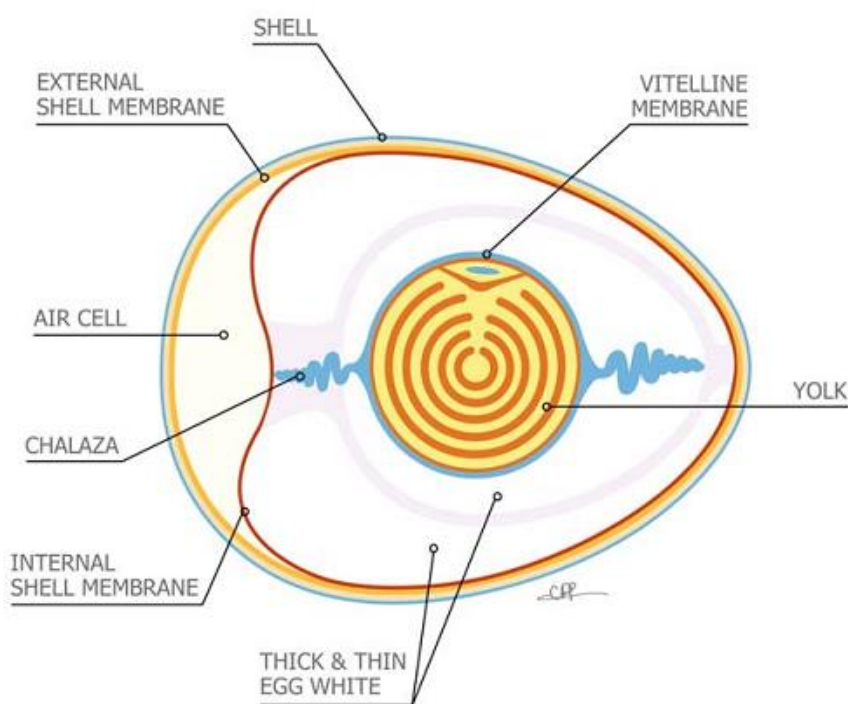


นอกจากนี้เมื่อเกิดฝนตกทำให้น้ำขังและเป็นที่มาของน้ำเสียแล้วปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะอีกทั้งยังทำให้น้ำดินในบริเวณที่เป็นพื้นที่ในการฝังกลบเปลือกไข่จะมีความกระด้างสูงมาก เนื่องจากมีแคลเซียมในเปลือกไข่ปริมาณมากทำให้น้ำดินในบริเวณดังกล่าวมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เช่น การดึงเยื่อเปลือกไข่ออกไปใช้เป็นคอลลาเจน (Collagen) การนำเปลือกไข่ไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากเปลือกไข่ แปรรูปเป็นแหล่งแคลเซียมที่นำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ และการนำไปใช้สำหรับการปรับปรุงพื้นที่ทางการเกษตรที่มีความเสื่อมโทรมมากเช่นปัญหาดินเปรี้ยว เป็นต้น

จากการศึกษาข้อมูลด้านต่างๆของเปลือกไข่ เมื่อพิจารณาไข่ไก่ทั้งฟองของไข่เป็ด และไข่ไก่ สามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ประกอบด้วย ไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ มีสัดส่วนใกล้เคียงกันทุกฟอง จะมีปริมาณต่างกันตามขนาด และชนิดของสัตว์ปีก เมื่อพิจารณาเฉพาะไข่ไก่ มีน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 58 กรัม มีองค์ประกอบของไข่ขาว ไข่ไก่ และเปลือกไข่ไก่คิดเป็นร้อยละ โดยประมาณ 55.8, 31.9 และ 12.3 ตามลำดับจากงานวิจัยของ เกษตรสุวรรณ. (2529)

ลักษณะของเปลือกไข่ไก่ เปลือกไข่ไก่นั้นมีหินปูนแข็งที่เรียบติดแน่นอยู่กับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอก ดังนั้นในการที่จะแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่ได้นั้นจึงเป็นการยาก แต่ในปัจจุบันมีวิธีการแยกด้วยวิธีการทางเคมี แต่ปริมาณที่ได้ก็มีปริมาณน้อยและสูญเสียค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่คุ้มทุนในการแยกเยื่อไปใช้ประโยชน์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีราคาสูง และเนื่องจากเปลือกไข่มีความหนา ซึ่งลักษณะความหนาขึ้นอยู่กับขนาดของไข่ ไข่ใหญ่มีเปลือกหนากว่าไข่เล็ก รวมถึงลักษณะของไก่แต่ละตัว พันธุ์ อาหาร และฤดูกาลอีกด้วย และที่สำคัญคืออายุของไก่ ไก่ที่มีอายุเป็นไก่สาวจะมีเปลือกไข่ที่หนามาก แล้วเมื่อมีอายุที่มากขึ้นเปลือกไข่จะบางลง จนถึงระดับที่เปลือกไข่มีลักษณะนิ่มๆ ไม่แข็งตัว และลักษณะพันธุ์ของไก่พื้นเมือง ไก่ป่า มีเปลือกไข่หนากว่าไก่พันธุ์ที่ต่างๆ หรือไก่สายพันธุ์ใหม่ หน้าที่ของเปลือกไข่โดยธรรมชาติต้องทนรับน้ำหนักแม่ไก่เวลากกฟักไข่ และมีความบางพอที่ลูกไก่จะเจาะดินออกไปจากเปลือกนี้ได้ เปลือกไข่ยังจะต้องโปร่งพอที่จะให้เชื้อลูกไก่ได้ออกมาหายใจได้ และต้องหนาพอที่จะป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ไม่ให้เข้าไปในไข่ได้ และยังมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ความชื้นหนีหายได้ง่าย นอกจากนี้โดยธรรมชาติเปลือกไข่ยังต้องมีสารอนินทรีย์ต่างๆ มากพอที่จะเป็นแร่ธาตุไปหล่อเลี้ยงเชื้อลูกไก่ให้เติบโตได้อีกด้วย ถ้าเปลือกไข่แบนและไม่มี ความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักกดทับได้ หรือแรงกระทบกระเทือนต่างๆ ด้วยธรรมชาติจึงได้สร้างให้เปลือกไข่โค้งติดกับเยื่อหุ้มไข่ และจะโค้งลดหลั่นกันเป็นรัศมีจากศูนย์กลางไข่ด้วยการเรียงตัวของผลึกธาตุหินปูน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 พวก พวกหนึ่งมีประมาณครึ่งหนึ่งจะเป็นโครงสร้างของเปลือกจะประกอบไปด้วยอินทรีย์สารที่คอยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเซลล์สิ่งนั้นเป็นโปรตีนประเภทแบบเดียวกันกับพังผืด และกระดูกที่ประสานโยงยึดกันไว้ ส่วนพวกที่สองเป็นส่วนประกอบของอนินทรีย์สารต่างๆ โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีอยู่มากที่ด้านนอกเคลือบคลุมเป็นเนื้อพื้น (Matrix) ของเปลือก ทั้งสองพวกนี้

สร้างมาจากท่อไขส่วนล่าง (Uterus) ทั้งนี้เปลือกไข่ประกอบด้วยชั้นสำคัญๆ 2 ชั้น คือ เปลือกชั้นนอก เรียกว่า Spongy layer กับเปลือกชั้นใน เรียกว่า Mammillary layer ชั้นนอกเป็นแคลเซียมในรูปผลึกของหินปูน (Calcite) ตั้งตรงทางแกนยาวของผลึกกับผิวเปลือก เป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุด และแน่นที่สุด ชั้นในนั้นเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมกับฟอสเฟต แร่ธาตุต่างๆ เหล่านี้ไม่อยู่ในรูปผลึก ดังนั้นเวลาไขร้าวก็จะร้าวถึงภายในด้วย



ภาพประกอบที่ 2 โครงสร้างของไข่ไก่

ที่มา: Hincke *et al.* (2012)

1) เปลือกชั้นนอก

เปลือกชั้นนอกเป็นเปลือกที่ฉาบติดอยู่กับเปลือกชั้นใน เป็นชั้นที่ผนึกติดกันแน่นและมีรูเล็กๆ จำนวนมากเป็นตัวเชื่อมโยงจากชั้นในมาเปิดที่ชั้นนี้เป็นรูพรุนแบบฟองน้ำแต่มีความแข็งแรงมาก เปลือกชั้นนอกนี้ให้ความเป็นรูปทรง และความแข็งแรงแก่เปลือกไข่ จากภาพขยายที่ดูด้วยเอ็กซ์เรย์ จะเห็นว่าความแน่น และแกร่งของชั้นนี้มีมากที่ผิวด้านนอก เกือบแร่ต่างๆที่เป็นเนื้อหาของชั้นนี้มีลักษณะเป็นผลึกเล็กๆ ส่วนประกอบของชั้นนี้เมื่อย้อมด้วยสีโปรตีนจะเห็นว่ามันไม่มีทิวผิวเปลือกแต่จะมีมากขึ้นตอนติดกับเปลือกชั้นใน สีนี้นำให้เห็นเปลือกชั้นนอกนี้แบ่งออกเป็น 3 ชั้นตามลักษณะของเส้นใยโปรตีน (Matrix fiber) คือ ชั้นที่อยู่ข้างในมีเส้นใยโปรตีนมากกว่าชั้นกลางชั้นนอกนั้นมีเส้นใยโปรตีนน้อยที่สุด

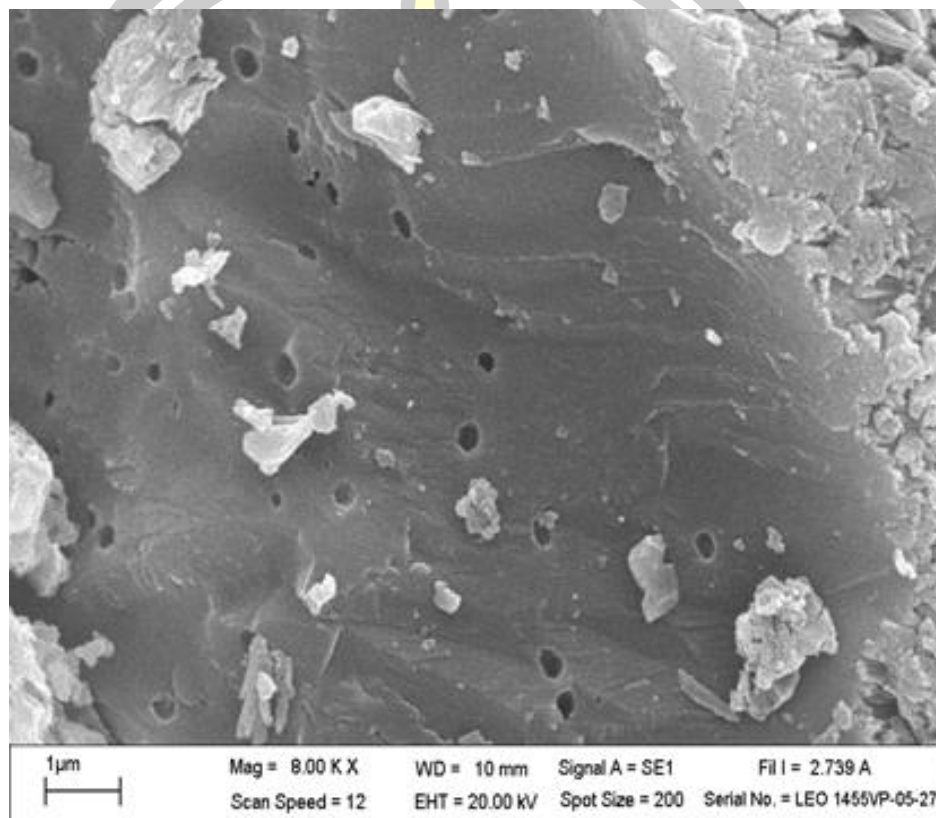
2) เปลือกชั้นใน

เปลือกชั้นในเป็นเปลือกชั้นที่บางที่สุดของเปลือก และอยู่ติดกับเยื่อหุ้มไขชั้นนอก ซึ่งประกอบไปด้วยปุ่มพื้นเปลือกลักษณะหยาบๆ (Mammilla) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตั้งแต่ทรงรูปไข่ถึงทรงกลม ปุ่มเหล่านี้ผนึกติดกันเป็นชั้นเดี่ยวและอยู่ชิดอยู่กับเยื่อหุ้มไข ปลายปุ่มผายออกไปเปิดที่เยื่อหุ้มไขชั้นในเป็นทางผ่านของอากาศให้กระจายไปทั่วเปลือกชั้นนี้ไปสู่บริเวณปลายปุ่มพื้นเปลือก ในไข่ต่างๆ ผิวพื้นโปรตีนเหล่านี้มีลักษณะคล้ายฝาชีเรียงรายอยู่ใต้ปุ่มหินปูน ขนาด และรูปร่างของปุ่มพื้นเปลือก ปุ่มพื้นเปลือกประกอบด้วยเกลือแร่ที่ไม่เป็นผลึกกระจายอยู่รอบผิวพื้นโปรตีนของเปลือก (Granular matrix material) และการเรียงตัวของปุ่มพื้นเปลือกจะแตกต่างกันตามชนิดของสัตว์ปีก ความหนาของเปลือกชั้นในประมาณ 0.11 มิลลิเมตร หรือเป็นเนื้อที่ประมาณ 1/3 ของความหนาของผิวพื้นไขทั้งพอง ความสูงของแต่ละปุ่มเหล่านี้แล้วแต่ความหนาของเปลือกชั้นใน เส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละปุ่มประมาณ 0.096 - 0.144 มิลลิเมตร

3) เยื่อเปลือกไข่ (Membranes)

เยื่อหุ้มไขแบ่งออกเป็น 2 ชั้นกระชับติดกับเปลือกไข่จนเป็นรูปทรงเช่นเดียวกัน ชั้นแรกเป็นเยื่อชั้นในล้อมรอบไข่ขาวส่วนนอก ที่ส่วนหัวท้ายไม่มีเส้นใยมิวซินของไข่ขาวชั้นมาเชื่อมติดอยู่ เรียกว่า Ligamenta albuminis อีกชั้นหนึ่งจะเป็นเยื่อชั้นนอกอยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือก ชั้นนี้ผลึกแน่นกับเปลือกชั้นใน โดยทั่วไปเยื่อชั้นใน และนอกมีสิ่งเชื่อมติดกัน ยกเว้นที่ส่วนป้านอันจะเกิดเป็นช่องอากาศของไข่ (air cell) เมื่อไขนั้นอายุมากขึ้นรูเปลือก (Pores) มีลักษณะเป็นรูปร่างต่างๆ ตั้งแต่รูปไข่ถึงกลม รูเปลือกเชื่อมโยงจากภายนอกเข้าไปถึงเยื่อเปลือกไข่ ขนาดของรูมีขนาดต่างๆตั้งแต่เห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดเล็กมากต้องดูด้วยกล้องขยาย รูเหล่านี้อยู่ไม่เป็นระยะ และไม่มีควมสม่ำเสมอ รูเหล่านี้เชื่อมโยงระหว่างเปลือกชั้นนอกกับระบบเชื่อมโยงของช่องอากาศที่เปลือกชั้นใน ตอนที่รูนี้เริ่มผ่านเปลือกชั้นนอกออกมานั้นจะมีขนาดเล็กที่สุดแล้วมาเปิดกว้างเป็นแฉกผายออกที่ผิวของเปลือกชั้นนอก ในไข่ใหม่บางรูที่ปากรูตัน หรือถูกอุดด้วยนวลไข่ ฉะนั้นการขุดสีผิวไข่จึงเป็นเหตุให้ปากรูถูกเปิดมากขึ้น ทำให้น้ำในไข่ระเหยออกง่ายขึ้น และจุลินทรีย์จากภายนอกเข้าทำลายไข่ได้ สะดวกขึ้นชั้นเคลือบผิวไข่ (Cuticle) เป็นชั้นเยื่อมิวซินที่บางฉาบเคลือบอย่างแน่นกับผิวนอกของเปลือก มีคุณสมบัติให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ ที่ปากรูเปลือกตรงส่วนพื้นเปลือกไข่ด้านใน (Plaque of matrix) ก็เป็นส่วนของเคลือบผิวไข่ เพราะมันไปติดต่อเป็นอันหนึ่งอันเดียวกับเคลือบผิวไข่ชั้นใน นอกจากนี้เปลือกไข่ยังมีเม็ดสีที่เปลือกไข่ ซึ่งเกิดจากวัตถุสีของเม็ดโลหิตแดง และยังมีที่เยื่อเปลือกไข่อีกเล็กน้อยส่วนประกอบของเปลือกไข่ จากภาพประกอบที่ 3 เป็นภาพของผิวเปลือกไข่ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) จะเห็นได้ว่าในส่วนต่างๆของเปลือกไข่ประกอบไปด้วยผิวเคลือบไข่หรือ Cuticle ปกป้องชั้นนอกของเปลือกไข่ตามมาด้วยเปลือกชั้นนอก (Spongy layer) และมีผิวพื้นเปลือก (Mammillary knob or

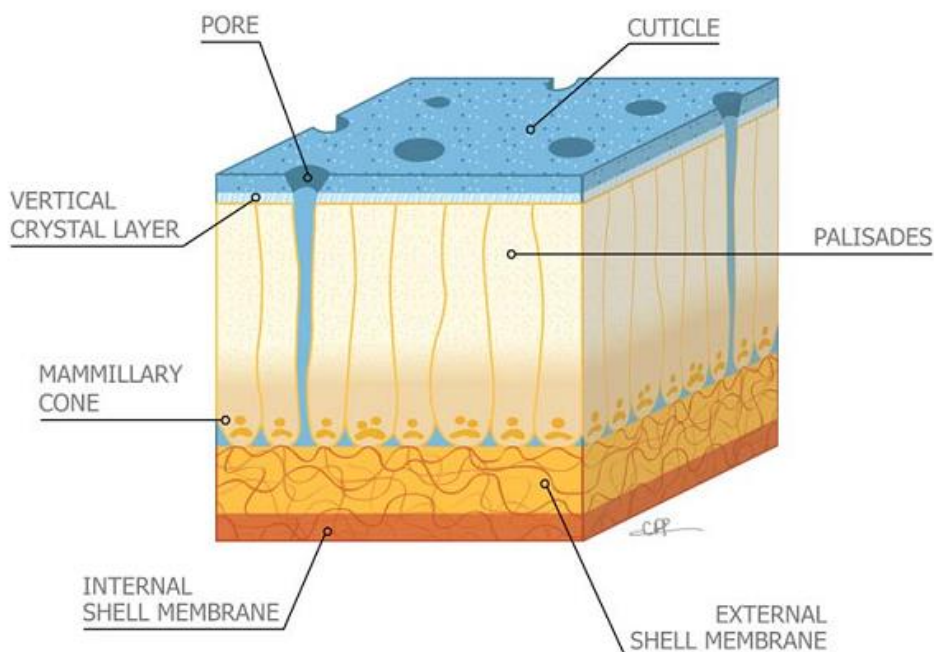
mammilla) ซึ่งจะอยู่ด้านล่างของพื้นเปลือกไข่ชั้นนอกและมีปากกรูพื้นเปลือก (mammillary core) แทรกอยู่ตามพื้นเปลือกไข่ชั้นนอก ถัดมาเป็นเปลือกชั้นใน (Mammillary layer) และเยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane) เป็นชั้นที่คอยพยุงโครงสร้างและป้องกันตัวอ่อนของไก่อยู่ภายใน แสดงในภาพตัดขวางผ่านตามหน้าตัดด้านข้างของเปลือกไข่ไก่ ดังภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 3 เปลือกไข่ที่ถ่ายด้วยเทคนิค SEM

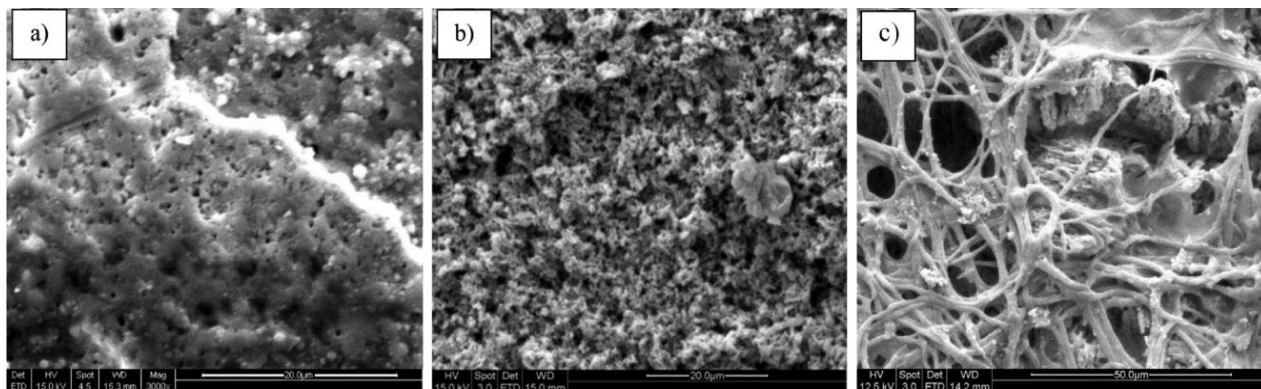
ที่มา: Pornchai *et al.* (2016)





ภาพประกอบที่ 4 ภาพตัดขวางผ่านตามหน้าตัดด้านข้างของเปลือกไข่ไก่
ที่มา: Hincke *et al.* (2012)

เปลือกไข่ประกอบด้วยแร่ธาตุที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 96-98 และสารอนินทรีย์อื่นๆ ร้อยละ 2-4 เช่น แมกนีเซียมร้อยละ 1 ไนโตรเจนร้อยละ 0.9 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.24 เหล็กกับซัลเฟอร์ รวมถึงธาตุอื่นๆ ที่มีในปริมาณที่น้อย จากงานวิจัย Schaafsma *et al.* (2000) พบส่วนเกลือของสารอนินทรีย์ที่อยู่ในเปลือกไข่ส่วนมากจะเป็นคาร์บอเนต และฟอสเฟตของแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ และแมกนีเซียมเล็กน้อย ผลึก Calcite ที่มีอยู่ในเปลือกไข่จะประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และผลึก Dolomite จะประกอบด้วยแคลเซียม และแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยโครงสร้างของผลึก dolomite จะแข็งแรงกว่าผลึก Calcite เปลือกไข่จะประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย Galactosamine, Glucosamine, Galactose, Fructose, Glucose, Sialic acids และไขมันปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้เยื่อหุ้มเปลือกไข่ยังประกอบด้วยส่วนที่เป็นเม็ดสี คือ Protoporphyrin ปริมาณเล็กน้อย จึงกล่าวได้ว่าเปลือกไข่ไก่จึงมีสามารถนำมาผลิตเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งอาจใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหารหรือเวชภัณฑ์สำหรับมนุษย์ ทั้งนี้เมื่อทราบถึงเปลือกไข่ที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบ และด้วยการศึกษาถึงโครงสร้างลักษณะพื้นฐานวิทยาของเปลือกไข่ด้วยภาพเปลือกไข่ที่ขนาดภาพ 20 ไมโครเมตร และกรณีศึกษาเปลือกไข่ที่ผ่านการแช่กรดอะซิติก 2 M ด้วยระยะเวลา 30 นาที



ภาพประกอบที่ 5 แสดงโครงสร้างลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่

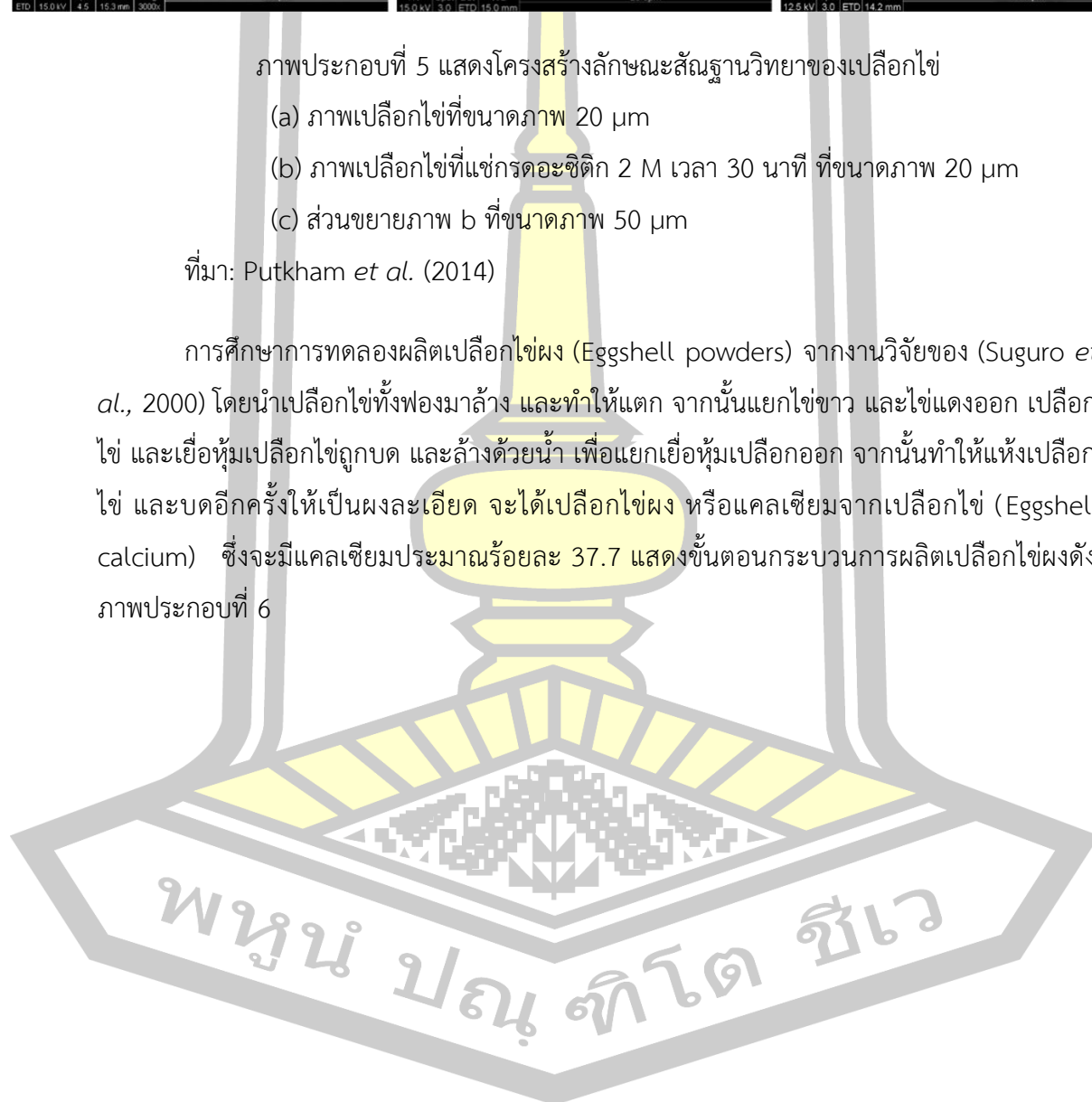
(a) ภาพเปลือกไข่ที่ขนาดภาพ 20 μm

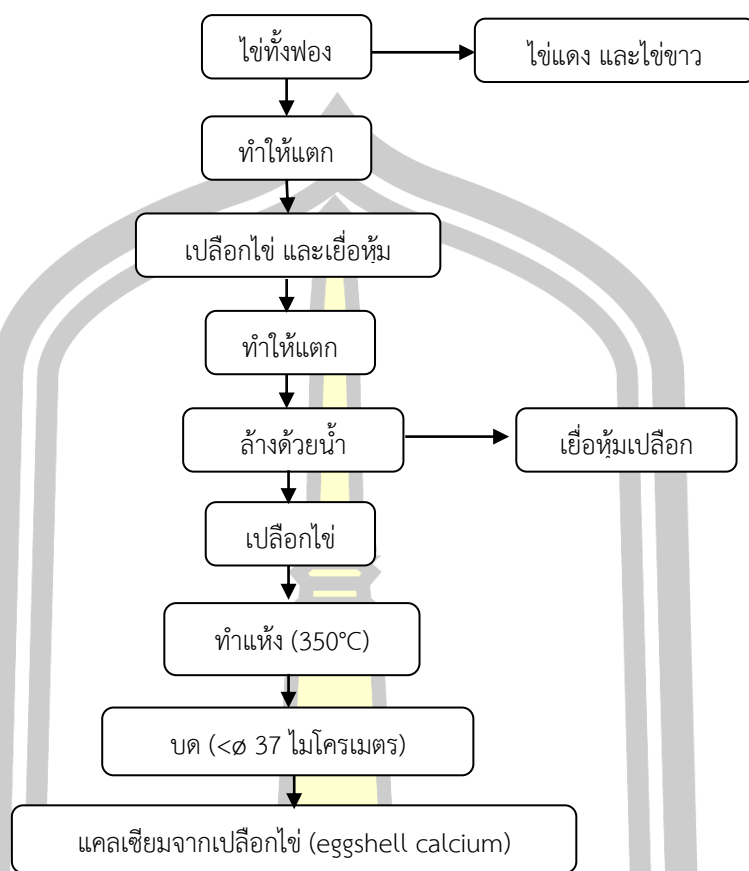
(b) ภาพเปลือกไข่ที่แช่กรดอะซิติก 2 M เวลา 30 นาที ที่ขนาดภาพ 20 μm

(c) ส่วนขยายภาพ b ที่ขนาดภาพ 50 μm

ที่มา: Putkham *et al.* (2014)

การศึกษากการทดลองผลิตเปลือกไข่ผง (Eggshell powders) จากงานวิจัยของ (Suguro *et al.*, 2000) โดยนำเปลือกไข่ทั้งฟองมาล้าง และทำให้แตก จากนั้นแยกไข่ขาว และไข่แดงออก เปลือกไข่ และเยื่อหุ้มเปลือกไข่ถูกบด และล้างด้วยน้ำ เพื่อแยกเยื่อหุ้มเปลือกออก จากนั้นทำให้แห้งเปลือกไข่ และบดอีกครั้งให้เป็นผงละเอียด จะได้เปลือกไข่ผง หรือแคลเซียมจากเปลือกไข่ (Eggshell calcium) ซึ่งจะมีแคลเซียมประมาณร้อยละ 37.7 แสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตเปลือกไข่ผงดังภาพประกอบที่ 6





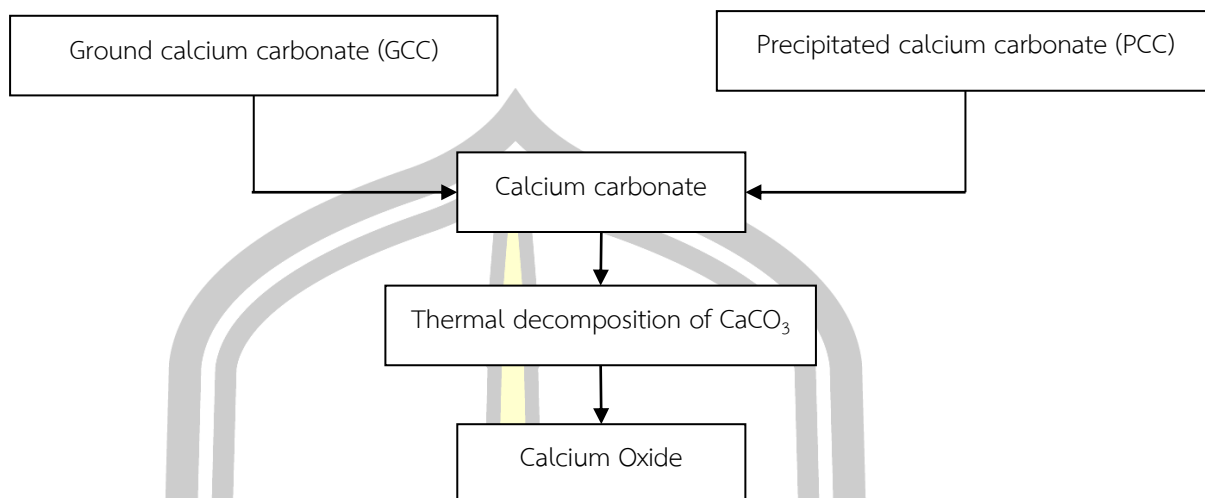
ภาพประกอบที่ 6 แผนผังกระบวนการผลิตเปลือกไข่ผง (แคลเซียมจากเปลือกไข่)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Suguro *et al.* (2000)

2.4 การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์

โดยทั่วไปแล้วแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้าสามารถผลิตได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบด (Ground calcium carbonate: GCC) หรืออาจผลิตจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Precipitated calcium carbonate: PCC) ในส่วนแคลเซียมออกไซด์นั้นโดยทั่วไปจะผลิตจากการแคลไซด์แคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 750-1,000 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบที่ 7 โดยรายละเอียดแต่ละกระบวนการมีดังนี้

พูน ปณ ทิโต ชิว



ภาพประกอบที่ 7 การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์

การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทั่วไป แบ่งเป็น 2 วิธี คือ

2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ

Ground Calcium Carbonate (GCC) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตในธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone) ที่มีความขาวและความบริสุทธิ์สูง หินอ่อน (Marble) ที่เกิดจากหินปูนแปรสภาพด้วยความร้อนและความดัน ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ หินชอล์ก (Chalk) ซึ่งเป็นหินปูนเนื้อร่วนละเอียด และแร่แคลไซต์ (Calcite) เป็นต้น โดยกรรมวิธีในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตมีหลายขั้นตอน เช่น การลดขนาดของแร่ การคัดขนาด ซึ่งถือเป็นเป้าหมายสำคัญเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ตามที่ตลาดต้องการ และง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ การผลิต GCC ในประเทศไทยส่วนใหญ่ ใช้แร่แคลไซต์ หินปูนหรือหินอ่อน เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งอาจจะได้จากการทำเหมืองเองหรือจากการรับซื้อวัตถุดิบคุณสมบัติของแร่วัตถุดิบที่กำหนดไว้ในเบื้องต้น คือต้องมียอดรวมของแคลเซียมคาร์บอเนต มากกว่า 95 และมีความขาวมากกว่าร้อยละ 94 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติส่วนใหญ่จะได้ขนาดในช่วง 44 - 74 ไมโครเมตร (Mesh size 200 - 325) ข้อดีของการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติคือใช้ต้นทุนการผลิตไม่สูง แต่มีข้อด้อยคือขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้การใช้งานอุตสาหกรรมได้ค่อนข้างแคบ และมีสิ่งเจือปนในแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตได้ (Peter *et al.*, 1996)

ผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (GCC) แบ่งประเภทได้ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์แบบ Dry Product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติโดยตรงมีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาด 1-147 ไมครอน ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี พลาสติก ยาสีฟัน ผงซักฟอก รวมทั้งการผลิตปุ๋ยและอาหารสัตว์ เป็นต้น

2) ผลิตภัณฑ์แบบ Coated Product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลิตภัณฑ์แบบ Dry Product ขนาดอนุภาค 1-15 ไมครอนมาเคลือบผิวอนุภาคเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ผิวอนุภาคเปียกได้ง่ายขึ้น อนุภาคแพร่กระจายดีขึ้นดูดซึมน้ำมันลดลงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และยาง เป็นต้น

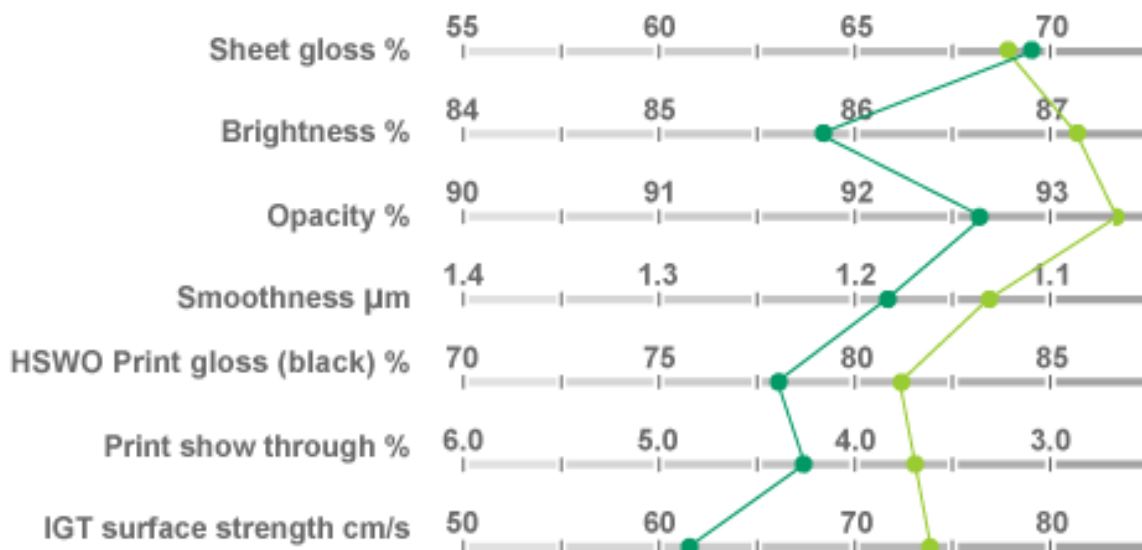
3) ผลิตภัณฑ์แบบ Calcium Carbonate Compound เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผสมกันอยู่ในรูปของแข็งระหว่างอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตบดจากธรรมชาติ (GCC) ขนาด 20-45 ไมครอน ร้อยละ 75-80 กับเม็ดพลาสติกร้อยละ 20-25 ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะคล้ายทรงกลมขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกขึ้นรูปต่างๆ เช่น ถังปุ๋ย กระสอบพลาสติก ถังพลาสติกใส่ของ ฉนวนหุ้มสายไฟ ภาชนะ และท่อต่างๆ เป็นต้น

4) ผลิตภัณฑ์แบบ Slurry Product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลิตภัณฑ์แบบ Dry Product ขนาดอนุภาค 1-20 ไมครอน โดยการเข้าสู่กระบวนการลอยแร่ (Flotation) เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนต่างๆออกไป ได้แก่ ซิลิกาและเหล็กออกไซด์ทำให้สัดส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจึงนำไปบดแบบเปียกเพื่อประหยัดพลังงานซึ่งสามารถบดได้ละเอียดถึง 0.3 ไมครอน และได้ผลิตภัณฑ์ในรูป Slurry นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ

2.4.2 แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกหรือแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์

Precipitated Calcium Carbonate (PCC) เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตบดจากธรรมชาติ(GCC) มาตกผลึกใหม่ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เพื่อให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ที่มีคุณภาพสูงมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตร ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ที่เกิดจากการตกผลึกรูปร่างของผลึกอาจแตกต่างกันตามวิธีการผลิตแต่ส่วนใหญ่จะเป็นรูปเข็มหรือ Rhomboids โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีใช้สารตั้งต้นปรับสภาพและเทคนิคการผลิตที่ต่างกันจะทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีขนาดอนุภาค รูปร่างผลึกแตกต่างกันไป จะให้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศและไม่ละลายน้ำ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความขาว (brightness) ที่สูงกว่า GCC ขนาดอนุภาคที่เล็ก พื้นที่ผิวสูงและรวมถึงความบริสุทธิ์ที่สูงกว่า GCC (Q. Ashton Acton., 2012). มีการศึกษานำ GCC และ PCC ใช้ในการผลิตกระดาษพบว่ากระดาษที่มีส่วนผสม PCC ทำให้มีคุณสมบัติโดยทั่วไปดีกว่ากระดาษที่มีส่วนผสมของ GCC จึงนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ ดังภาพประกอบที่ 8

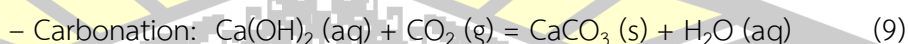
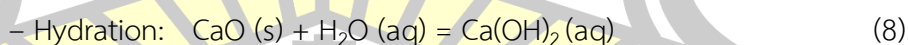
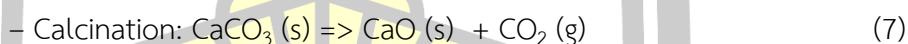
การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ สามารถทำได้โดย 2 วิธีหลัก คือ 1) การผลิตโดยกระบวนการคาร์บอเนชัน (Carbonation Process) และ 2) ผลิตโดยใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแม่แบบ (Biomimetic synthesis) จากงานวิจัยของ Boyjoo *et al.* (2014)



ภาพประกอบที่ 8 เปรียบเทียบคุณภาพกระดาษหลังจากเติม PCC/GCC เป็นส่วนผสมในกระดาษ
 หมายเหตุ : GCC –เส้นทึบดำ ที่มา: Q. Ashton Acton. (2012)

2.4.2.1 การผลิตโดยกระบวนการคาร์บอเนชัน (Carbonation Process)

เป็นกระบวนการที่นำ CaO ซึ่งอาจได้จากการแคลไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารเคมี (เช่น CaCl_2) มาผลิตเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หรือปูนไฮเดรต (Hydrated lime) จากนั้นจึงให้ฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลผลิต ดังสมการ (7)–(9)



กระบวนการคาร์บอเนชันโดยทั่วไปแล้วจะทำให้ได้อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดระดับไมโครเมตร โดยผลึกที่ได้มักจะอยู่ในรูปแคลไซด์และมักมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Rhombohedral) หรือ ทรงลูกบาศก์ (Cube) อนุภาคมักจับเป็นมวลรวม ซ้ำด้อยในการนำแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติมาเป็นวัตถุดิบคือ มักจะมีสิ่งเจือปนมีผลรบกวนกระบวนการเกิดผลึกที่ต้องการ ขณะที่การผลิตด้วยกระบวนการคาร์บอเนชันเป็นการผสมสารตั้งต้นถึงสามสถานะคือ ของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ ($\text{CaO-H}_2\text{O-CO}_2$) จึงต้องมีการควบคุมให้มีการผสมที่ดี

จึงจะได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่สูง (Yield percentage) สรุปรายละเอียดกระบวนการคาร์บอนเนชัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตโดยแบบไบโอมิเมติกและการผลิตโดยกระบวนการคาร์บอนเนชัน

คุณลักษณะ/ กระบวนการ	การผลิตโดยแบบไบโอมิเมติก	การผลิตโดยกระบวนการคาร์บอนเนชัน
พหุสัณฐาน (polymorphs)	สามารถผลิตได้หลายพหุสัณฐาน เช่น แคลไซต์ (calcite) อะราโกไนต์ (aragonite) แวทีไรต์ (vaterite) รวมถึงแคลเซียมคาร์บอนเตออสัญฐาน	ผลผลิตส่วนใหญ่เป็นแคลไซต์ (calcite)
รูปร่าง (Morphology)	ผลิตได้หลากหลายรูปร่าง	รูปร่างสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือ ทรงลูกบาศก์ (cube or rhombohedra)
ขนาด (Size)	สามารถผลิตได้ตั้งแต่ขนาด นาโนเมตรถึง ไมโครเมตรตามที่ต้องการ อนุภาคเป็นอนุภาคเดี่ยว	สามารถผลิตได้ในขนาด นาโนเมตร อนุภาคมักจับเป็นมวลรวม
กระบวนการ	ไม่ซับซ้อน ผลิตได้ในถังปฏิกรณ์เดียว (one pot synthesis) การควบคุมอุณหภูมิ pH ขึ้นกับสารปรับสภาพ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ ซึ่งสามารถปรับเพื่อให้ผลิตแคลเซียมคาร์บอนเตอได้คุณลักษณะที่ต้องการ	ใช้กระบวนการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การสังเคราะห์ต้องทำที่ pH สูง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ควรต่ำ เพื่อให้ CO ₂ ละลายเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี
การประยุกต์ ใช้งาน	นำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้กว้าง	ปกติใช้เป็นสารเติมแต่งใน อุตสาหกรรม กระดาษ สี และ โพลีเมอร์ เป็นต้น

2.4.2.2 การผลิตโดยแบบไบโอมิเมติก (Biomimetic synthesis)

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่ต่อเนื่อง เป็นลำดับก่อให้เกิดสารมัธยันต์ก่อนจะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการอาจมีการใช้สารอินทรีย์เป็นแม่แบบ (Template) และทำให้เกิดการรวมตัวเกิดขึ้นเป็นอนุภาคแคลเซียม

คาร์บอนेटรอบ ๆ แม่แบบ กระบวนการนี้สามารถดำเนินการผลิตได้ในสภาวะและอุณหภูมิที่ไม่รุนแรง รวมถึงเหมาะต่อการผลิตแคลเซียมคาร์บอนेटที่มีแหล่งสารตั้งต้นจากธรรมชาติ เช่น เปลือกหอย ที่นำมาใช้ในงานวิจัยของ Boyjoo *et al.* (2014) เป็นต้น กระบวนการนี้อาจแบ่งย่อยเป็นสองวิธีคือ กระบวนการรีเวอร์ส อิมัลชัน (Reverse emulsions) และวิธีการตกตะกอน (Precipitation method)

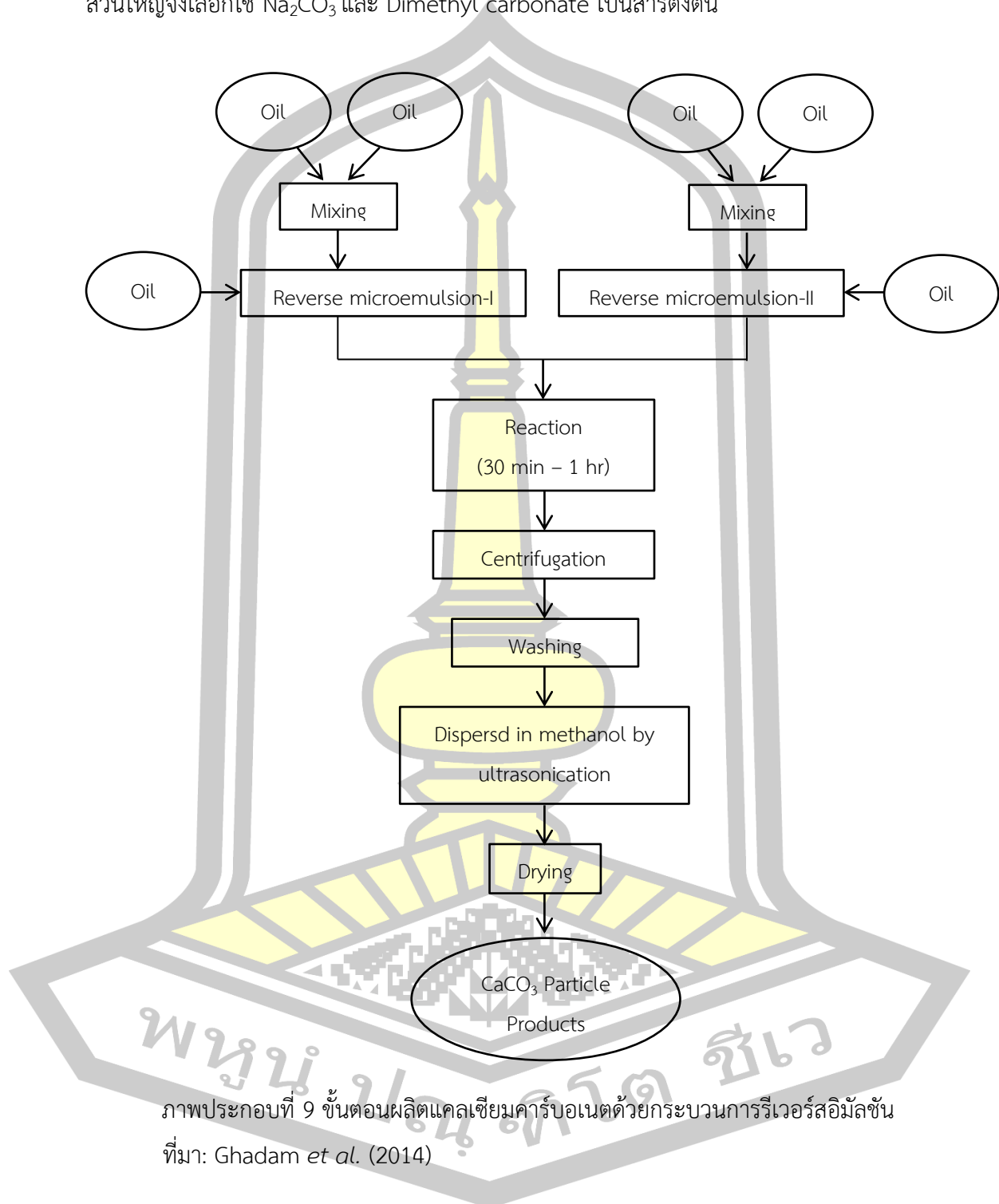
1) กระบวนการรีเวอร์สอิมัลชัน (Reverse emulsions)

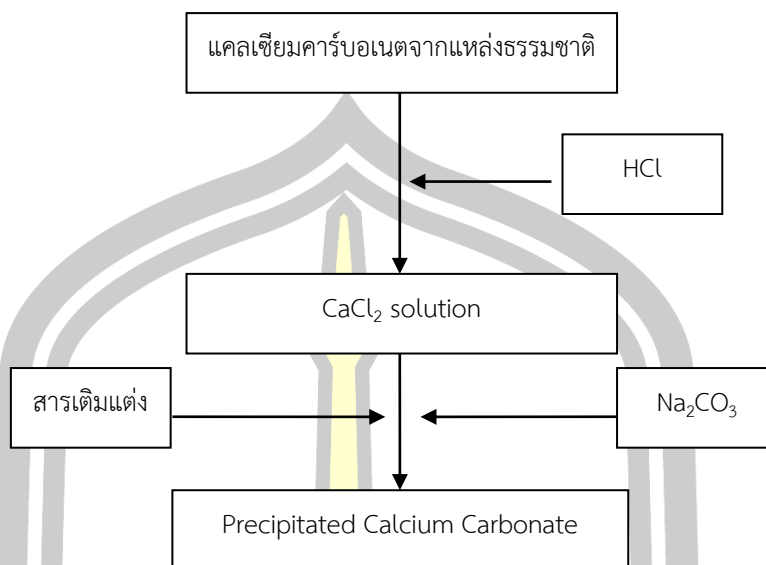
เป็นกระบวนการที่ใช้ไขมันในน้ำ (Oil in water) ระบบนี้จะประกอบไปด้วยสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ในน้ำมันซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแม่แบบ (Template) และสารตั้งต้นในการผลิตแคลเซียมคาร์บอนेट (Ca^{2+} และ CO_3^{2-}) การผลิตเริ่มโดยการเติมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมอยู่ในน้ำมันลงไปในตัวทำละลายจนกระทั่งมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นวิกฤตของ ไมเซลล์ (critical micellar concentration, CMC) สารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมกันเอง (self-assembly) ล้อมรอบสารตั้งต้นในการผลิตแคลเซียมคาร์บอนेटทำให้ Ca^{2+} และ CO_3^{2-} ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอนेट ดังภาพประกอบที่ 9 กระบวนการผลิตนี้สามารถควบคุมให้ได้แคลเซียมคาร์บอนेटที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่างนาโนเมตรถึงไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบ (Particle size distribution) อย่างไรก็ตามกระบวนการรีเวอร์สอิมัลชันต้องใช้สารเคมีหลายตัว รวมถึงน้ำมันที่เติมในระบบ ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และการบำบัดน้ำเสียสูงมากขึ้น อีกทั้งหากใช้สารตั้งต้นจากแหล่งธรรมชาติที่มีสิ่งเจือปนจะส่งผลทำให้เกิดการรวมกันเอง (self-assembly) ทำให้ควบคุมขนาด รูปร่างของแคลเซียมออกไซด์ได้ยาก จากงานวิจัยของ Ghadam *et al.* (2014)

2) กระบวนการตกตะกอน (Precipitation method)

เป็นกระบวนการที่ให้สารประกอบของ Ca^{2+} และ CO_3^{2-} ทำปฏิกิริยากันโดยตรงเพื่อให้เกิดแคลเซียมคาร์บอนेट อย่างไรก็ตามอาจมีการใส่สารเติมแต่ง (additive) เพื่อให้สามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ สารตั้งต้นที่ใช้เป็นแหล่ง Ca^{2+} ที่ใช้กันแพร่หลายคือ CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ และ $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เป็นต้น อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ใช้แหล่งคาร์บอนธรรมชาติ และเปลือกหอย มาใช้เป็นแหล่ง Ca^{2+} โดยจะนำวัตถุดิบธรรมชาตินี้มาทำปฏิกิริยากับไฮโดรคลอริก เพื่อให้เกิดสารละลาย CaCl_2 เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นต่อไป ดังภาพประกอบที่ 10 จากงานวิจัยของ Hawae *et al.* (2015), นิชิมา *et al.* (2553), และ (Oladoja *et al.*, 2012) ในส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้เป็นแหล่ง CO_3^{2-} นั้นที่นิยมใช้ เช่น $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, Na_2CO_3 , $\text{NH}_2\text{COONH}_4$ และ Dimethyl carbonate (DMC) เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลการวิจัยพบว่าการใช้ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ทำให้ยากต่อการผลิตแคลเซียม

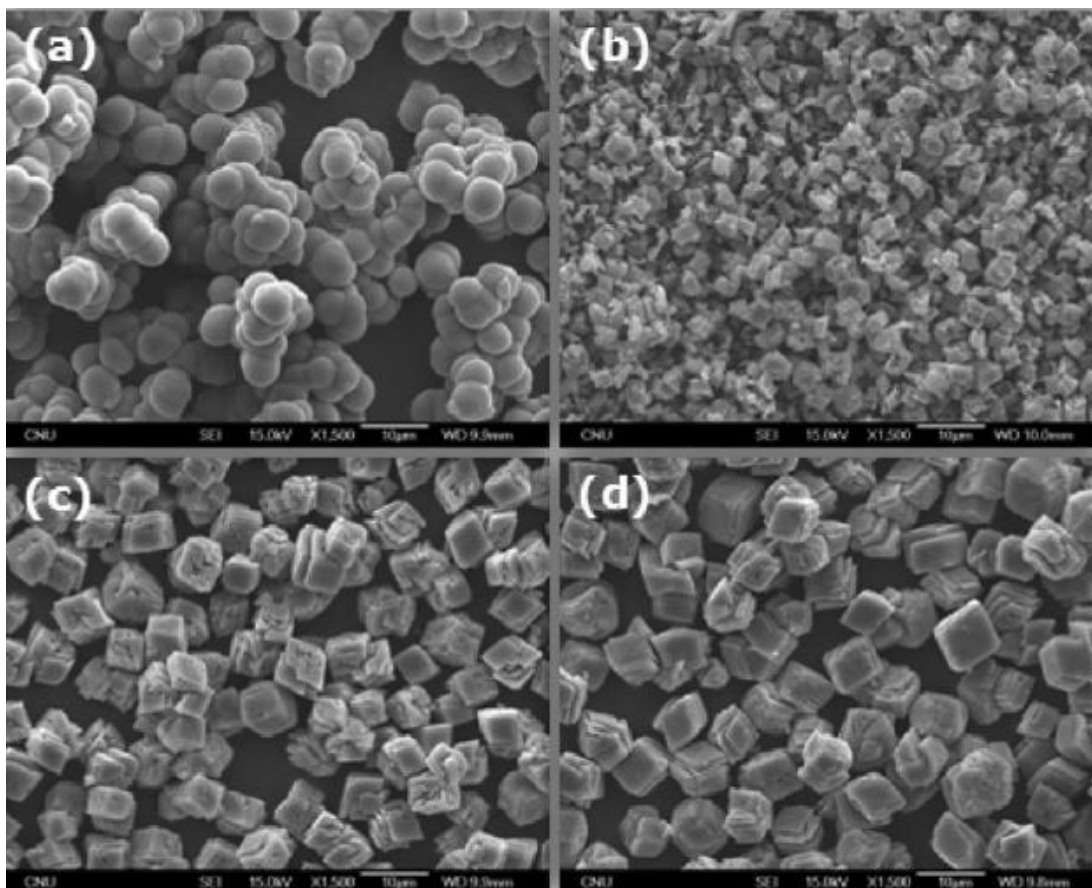
คาร์บอเนตให้มีขนาดและรูปร่างเดิมที่ต้องการ จากงานวิจัยของ Kim *et al.* (2010) ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงเลือกใช้ Na_2CO_3 และ Dimethyl carbonate เป็นสารตั้งต้น





ภาพประกอบที่ 10 กระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากแหล่งธรรมชาติ

นอกจากการใช้สารประกอบของ Ca^{2+} และ CO_3^{2-} ทำปฏิกิริยากันโดยตรงเพื่อให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วยังอาจใส่สารเติมแต่งเพื่อช่วยให้การควบคุมขนาดและรูปร่างของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นไปได้ตามต้องการ โดยสารเติมแต่งที่นิยมใช้มีหลายประเภททั้งที่เป็นสารลดแรงตึงผิว เช่น Dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB), Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) และ Poly-ethylene glycol (PEG) เป็นต้น สารเติมแต่งที่เป็นโพลิเมอร์ เช่น polyvinylpyrrolidone (PVP) สารเติมแต่งกลุ่มโพลีอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ Polystyrenesulfonate (PSS) และสารเติมแต่งที่เป็นกลุ่มของกรดอะมิโน เช่น Aspartic acid เป็นต้น จากการศึกษาวิจัยของ (Ghadam et al., 2014) พบว่าการหยด Aspartic acid ในปริมาณต่างๆ จะส่งผลให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีรูปร่างกลมและทรงลูกบาศก์ ดังภาพประกอบที่ 11 และแสดงผลสรุปสถานะสารตั้งต้น และสารเติมแต่งในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตภาพประกอบที่ 14 และตารางที่ 4



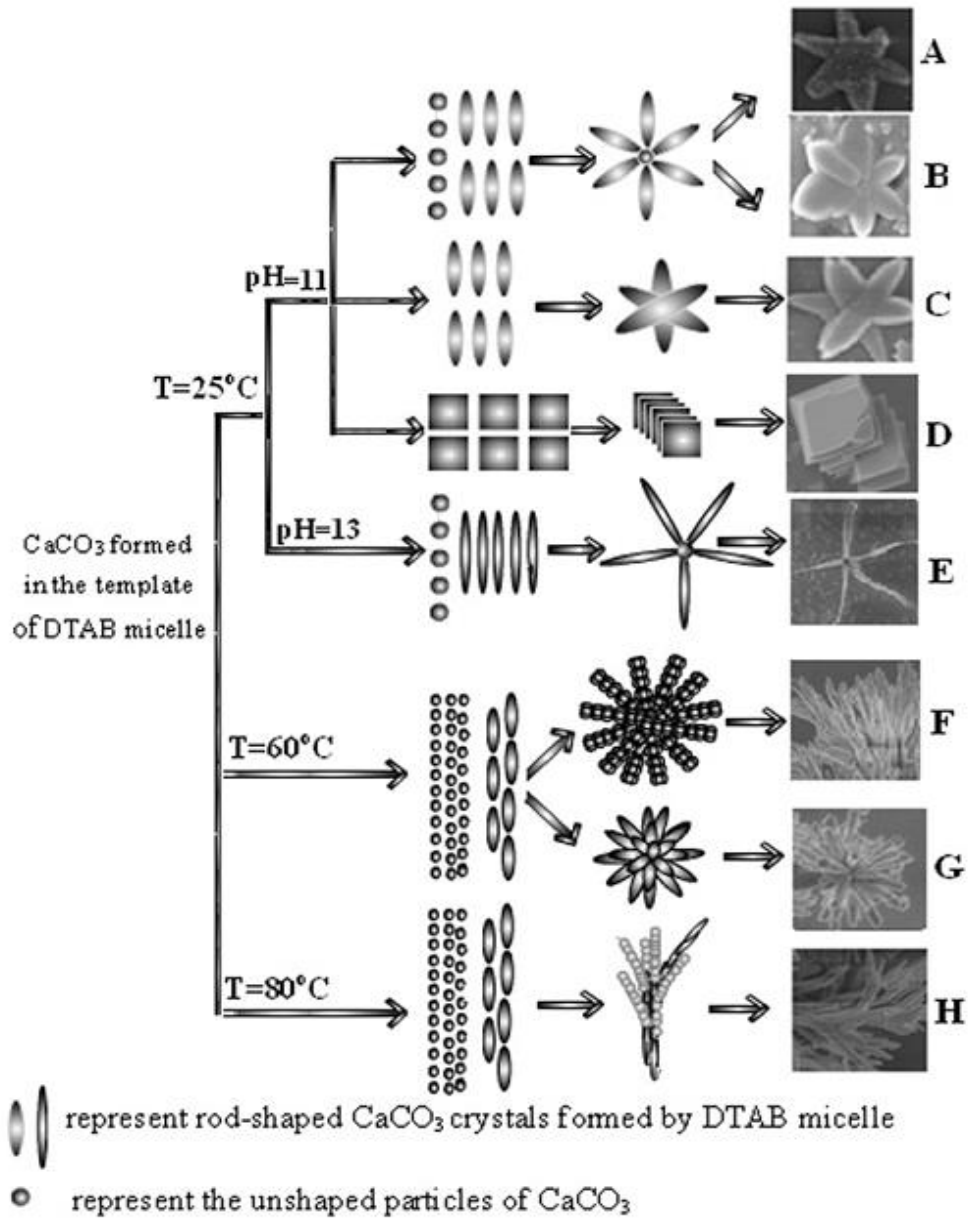
ภาพประกอบที่ 11 SEM images ของแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการเติมสารละลาย Asp ลงใน สารละลายผสมของแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนต

(a) เท Asp ลงใสสารละลายผสม (b) หยด 1mL/min, (c) 4 mL/min, (d) 10 mL/min.

ที่มา: (Ghadam et al., 2014)

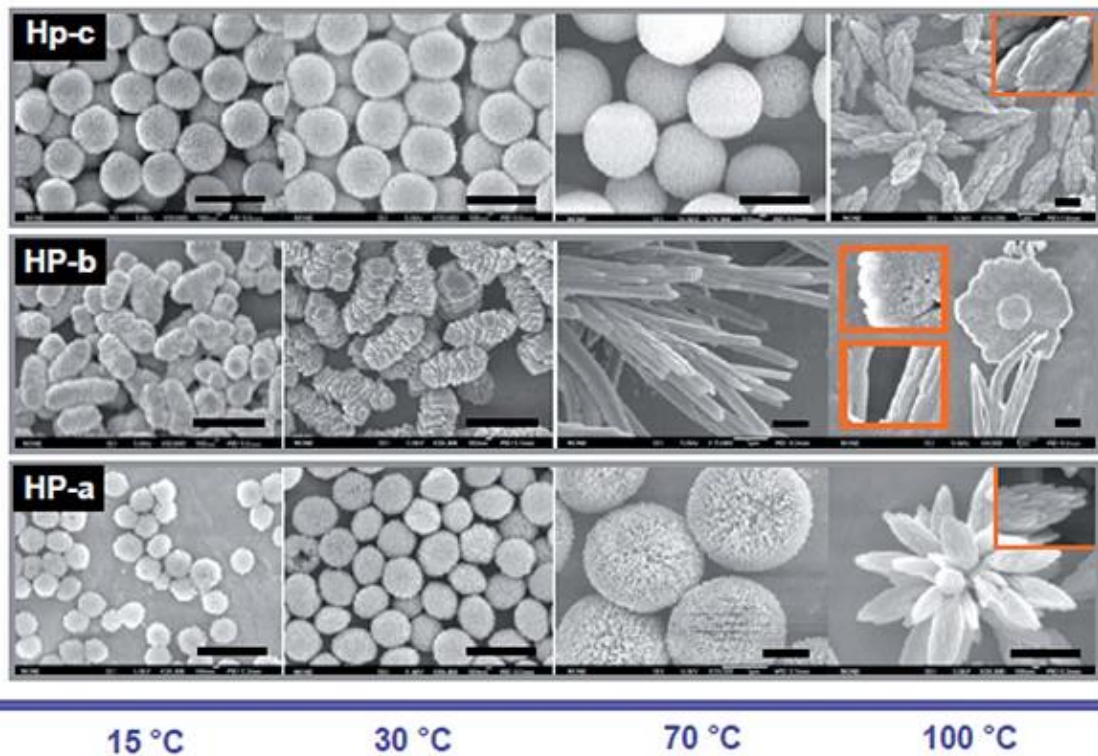
การศึกษาการใช้สารเติมแต่งในการทำปฏิกิริยาเคมี จากงานวิจัยของ Li *et al.* (2010) โดยการควบคุมสถานะของอนุภาคนิว พบว่าการให้อนุภาคนิวที่ 25, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่ามีผลต่อรูปร่างและขนาดของอนุภาค เนื่องจากกลไกการทำปฏิกิริยากับสารเติมแต่งที่สถานะอนุภาคนิวต่างกันทำให้พฤติกรรมการเข้าทำปฏิกิริยาต่างกันเกิดอาจเกิดความไวในการทำปฏิกิริยาที่เร็วหรือช้า หรืออาจเกิดกลไกการเกิดพันธะกัน มีผลทำให้รูปร่างและขนาดของสารเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น ที่สถานะอนุภาคนิวห้องที่ 25 องศาเซลเซียส ลักษณะของผลึกรูปทรงจะเป็นไปตามโครงสร้างหลักของสารเติมแต่งหรือลักษณะการจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดาว หรือเป็นแฉกๆ และเมื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงสถานะของ pH ภาพประกอบที่ 2.14 ก็พบว่าผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลึกเช่นกัน ทั้งนี้จะยังขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นฐานของตัวอนุภาคของสารตั้งต้นด้วย และเมื่อสังเกตลักษณะของอนุภาคที่ 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการเรียงตัวกันของผลึก

จะเป็นแบบเส้นเกาะกันเป็นโครงสร้างเป็นเหมือนช่อดอกไม้ตั้งนั้นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและความเป็นกรดเบสของสารตั้งต้นน่าจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาส่งผลให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป (Boyjoo et al., 2014) ดังภาพประกอบที่ 12 และภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบที่ 12 ลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะของอุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบส

ที่มา: Li et al., 2010



ภาพประกอบที่ 13 ผลของอุณหภูมิที่มีสารเติมแต่ง และความเข้มข้นแตกต่างกันของ CaCO_3 ใน a, b และ c

ที่มา: Boyjoo et al., 2014

สารเติมแต่ง (Additives) สารเคมีที่ใช้เติมในโพลีเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ มีหลายประเภท เช่น สารกันออกซิเดชัน สารกันไฟฟ้าลัด สารเพิ่มสี และสารหน่วงการติดไฟ เป็นต้น หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นสารตัวเติมถ้าสารเคมีนั้นมีในปริมาณน้อยซึ่งเติมในเซรามิกเพื่อปรับปรุงสมบัติให้เป็นที่ต้องการ โดยปกติสารเติมแต่งนี้จะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของสารตั้งต้น จนสำเร็จเป็นผลิตภัณฑ์มันจะนิยมนำมาใช้ในงานด้านพลาสติก เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญ ๆ ของสารตั้งต้นหลักหรือผลิตภัณฑ์ เช่น โพลีเมอร์ในพลาสติก ประเภทของสารเติมแต่งถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานตามคุณสมบัติสำคัญของสารเติมแต่งคือเป็นสารที่สามารถช่วยปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกลได้ (Mechanical properties modifiers) เช่น สารเสริมแรง การทำให้เนื้อสารเติมแต่งและสารตั้งต้นเข้ากันได้ดี สารที่ช่วยในกระบวนการผลิตสังเคราะห์ทางเคมีหรือในการแปรรูปมักจะใช้ในทางเคมี (Chemical properties modifiers) สารที่ช่วยปรับเปลี่ยนสมบัติของผิวหน้าผลิตภัณฑ์ (Surface properties modifiers) สารที่ช่วยเพิ่มความสวยงาม (Aesthetic properties modifiers) ให้กับผลิตภัณฑ์ สารที่ช่วยปรับเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพและตัดแปลงสำหรับกระบวนการผลิต (Processing modifiers)

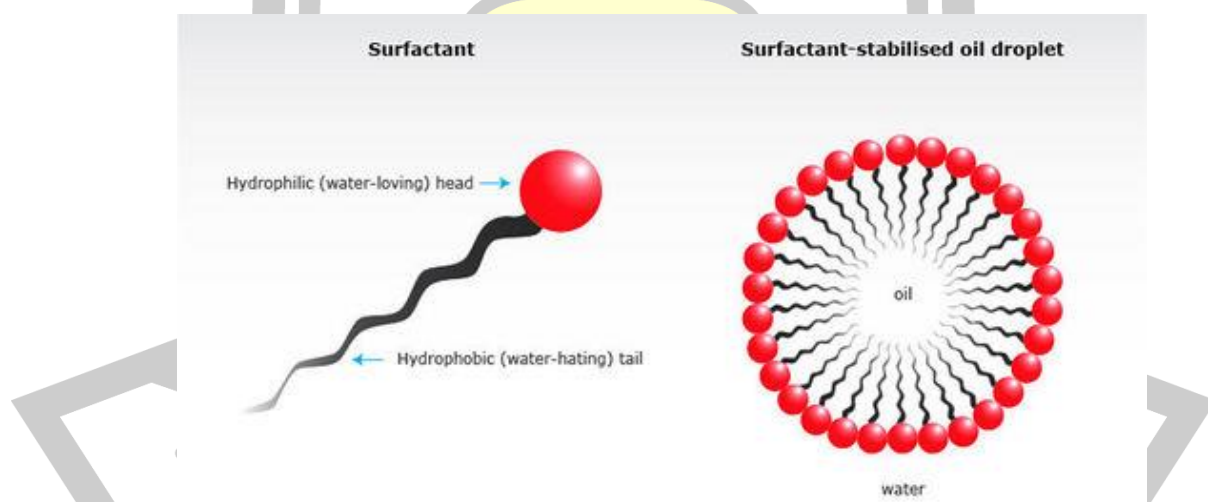
ตารางที่ 4 ผลกระทบของค่า pH ในสัณฐานวิทยาและขนาดของอนุภาค CaCO_3

Additive (s)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Morphology	Polymorph	Size (μm)
P123 [(EO) ₂₀ - (PO) ₇₂ -(EO) ₂₀]	25	10	Spherical	C, V	ca. 1-3
		11	Spherical	58%C, 42%V	1.6
		12	Rhombohedral	C	ca. 2-7
HPCHS		10	Rhombohedral	C	ca. 1-5
		11	Rhombohedral	C	4.7
		12	Rhombohedral	C	ca. 1-6
PAAL	25*	9	Spherical	C, V	5-8
		10	Spherical	C, V	5
		11	Spherical + rhombohedral	C, V	ca. 2-4
		12	Irregular aggregates	C	ca. 5-8
PSSS + CTAB	25	9	Spherical	NR	10-15
		10	Spherical	94%C, 6%V	8
		11	Spherical + irregular aggregates	NR	ca. 2-4
		12	Irregular aggregates	NR	ca. 3-6
DTAB	25	11	Multi-petal Flowers	C	0.6-0.8
		13	Multi-antenna + wire like	C	2L,0.13W (antenna)
PAA	80	9	Cubic	C	3
		10	Cubic	C	ca. 5-8
		12	Irregular aggregates	C	ca. 3-9
4-BAPTA	25	7.5	Cubic	C	4.5
		8	Spherical (60%) + irregular aggregates40%	40%C, 60%V	4.2
		9	Spherical + Rhombohedral	>80% V	3
		11	Rhombohedral	C	3
PAA	25	9	Plate like aggregates	C	4-8
		10	Spherical + irregular aggregates	C	ca. 2-8
		11	Spherical + irregular aggregates	C	ca. 3-10
		12	Irregular aggregates	C	NA
PEG- <i>b</i> -PMAA	22	9	Rod like	C	15L, 2W
		9.5	Dumbbell like	C	5.6L, 1.6W
		10	Peanut like	C	6.4L, 2.1W
		10.5-11	Ellipsoidal + irregular aggregates	C	2.5 (Ellipsoidal)

ที่มา: (Boyjoo *et al.*, 2014) โดยที่ C = แคลเซียมคาร์บอเนต, L = ยาว V = vaterite, W = ความกว้าง na = หาค่าไม่ได้ และอนุกรมที่ใช้ในการทดลองสันนิษฐานว่าเป็นอนุกรมห้อง

โดยทั่วไปควรต้องมีสมบัติที่ทำหน้าที่อย่างมีประสิทธิภาพต้องมีความเสถียร (Stable) ภายใต้สภาวะของกระบวนการผลิตต่างๆ และการใช้งานต้องไม่เกิดการตกสี (Bleeding) และ Blooming ต้องไม่เป็นพิษ (non-toxic) และไม่ทำให้เกิดรสหรือกลิ่น รวมทั้งต้องมีราคาถูก และไม่ทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์เสียไป

ลักษณะกลไกการทำงานของสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตสังเคราะห์ทางเคมีหรือในการแปรรูปมักใช้ในทางเคมี (Chemical properties modifiers) จะกลไกการทำงานคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว กล่าวคือสารเติมแต่งจะทำหน้าที่เสมือนกับสารลดแรงตึงผิวมีหลักการการทำงานแบบเดียวกัน เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) สารเติมแต่ง (Additives) ในตัวทำละลายจนกระทั่งมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical micellar concentration, CMC) สารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมกันเอง (Self-assembly) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่เพื่อให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากอันตรกิริยาของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic and Hydro-phobic moieties) กับโมเลกุลของตัวทำละลาย จึงสามารถแบ่งออก 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือ มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และโพลีเมอร์สังเคราะห์



ภาพประกอบที่ 14 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว

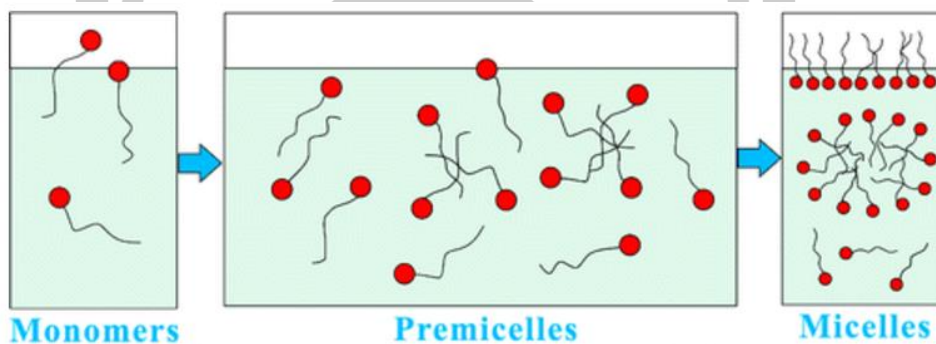
ที่มา: University of Waikato. All rights reserved. www.sciencelearn.org.nz, (2559)

ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเป็นสารประกอบอินทรีย์เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆ ง่ายขึ้น เช่น

การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายหาน้ำ โดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ

โดยปกติตัวทำละลายเป็นน้ำโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าหาตัวทำละลายและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากันเอง เกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ เรียกว่า ไมเซลล์แบบธรรมดา (Normal micelles) ในทางตรงข้าม กรณีที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งไม่มีขั้ว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการเรียงตัวในอีกลักษณะหนึ่ง กล่าวคือสารลดแรงตึงผิวจะหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหาตัวทำละลายและหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าหากันเอง เกิดเป็นโครงสร้างในลักษณะเดียวกับไมเซลล์แบบธรรมดา แต่แตกต่างกันที่การเรียงตัวของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่หันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าด้านในของโครงสร้างขนาดใหญ่ ไมเซลล์แบบนี้เรียกว่า ไมเซลล์แบบรีเวิร์ส (Reverse micelles) ไมเซลล์ที่กล่าวมาข้างต้นมีโครงสร้างหลากหลาย ได้แก่ ไมเซลล์แบบทรงกลม (Spherical micelles) แบบทรงกระบอก (Cylindrical micelles) และแบบไบเลเยอร์ (Bilayers) เป็นต้น ดังนั้นการเลือกสารเติมแต่งจึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และประเภทของการใช้งาน ขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นและสารตัวเติม ความไวในการทำปฏิกิริยา ความเป็นกรดเบสของสารรวมถึงสภาวะสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น ตัวอย่างภาพแบบจำลองของสารลดแรงตึงผิวเมื่อนำไปละลายกับน้ำดังภาพประกอบที่

15



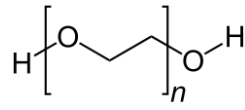
ภาพประกอบที่ 15 สารลดแรงตึงผิวในสารละลายที่เป็นน้ำ

ที่มา: Cui *et al.*, (2008)

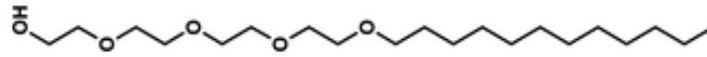
พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะโครงสร้างของสารตัวเติมหรือสารลดแรงตึงผิวที่ใช้และตัวอย่างสารอื่นๆ ต่อลักษณะความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของสาร

Non-ionic surfactants (ส่วนที่ชอบน้ำ ---> ไม่ชอบน้ำ)

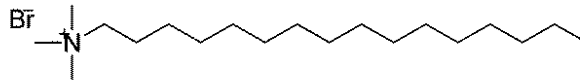


Polyethylenglykol(PEG)

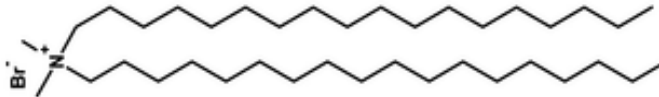


Poly(oxyethylene) 4 Lauryl Ether (C12E4)

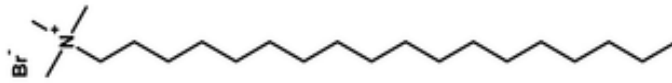
Cationic surfactants (ส่วนที่ชอบน้ำ ---> ไม่ชอบน้ำ)



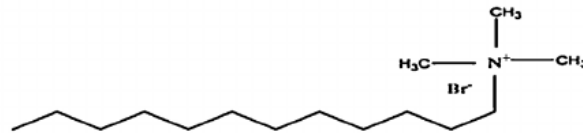
Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)



Dimethyldioctadecylammonium bromide (DODAB)

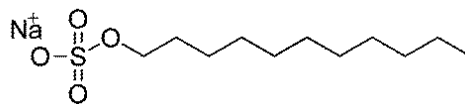


Octyltrimethylammonium bromide (OTAB)



Dodecyltrimethylammonium bromide (DTAB)

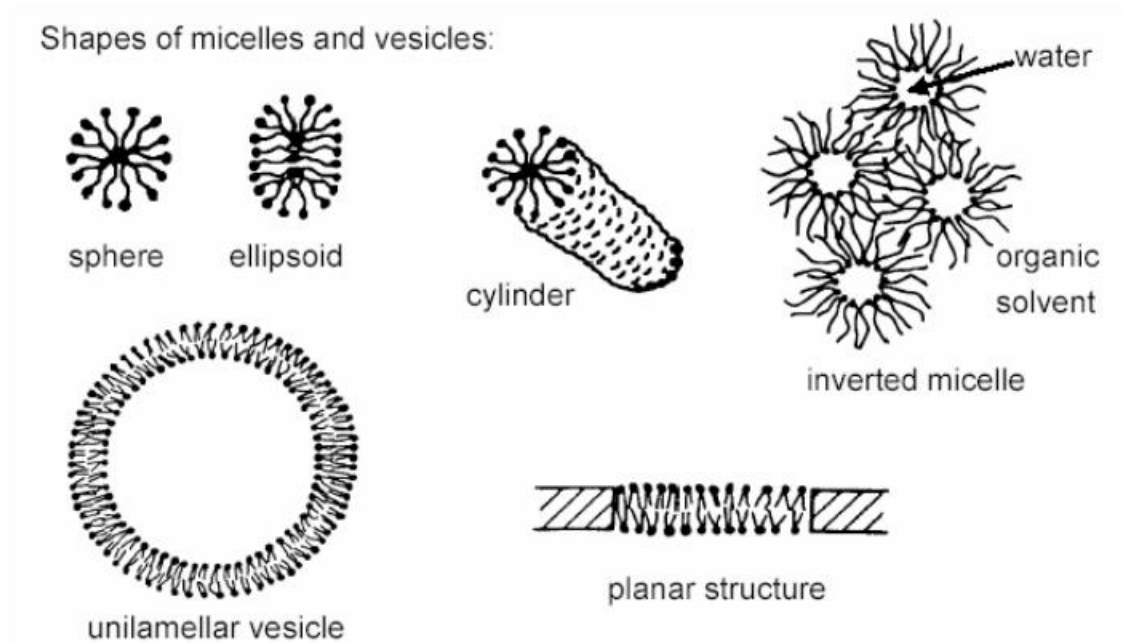
Anionic surfactants (ส่วนที่ชอบน้ำ ---> ไม่ชอบน้ำ)



Sodium dodecyl sulfate (SDS)

เมื่อสาร Surfactants ทำปฏิกิริยากับน้ำก่อนที่น้ำสารละลายไปทำปฏิกิริยาต่อกับสารตั้งต้นที่เป็นแคลเซียมคาบอร์เนต จะช่วยลดความแรงในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและจะค่อยๆเกิด

โครงสร้างใหม่เกิดขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และทำให้เกิดรูปร่างโครงสร้างใหม่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH และปัจจัยทางเคมีอื่นๆ



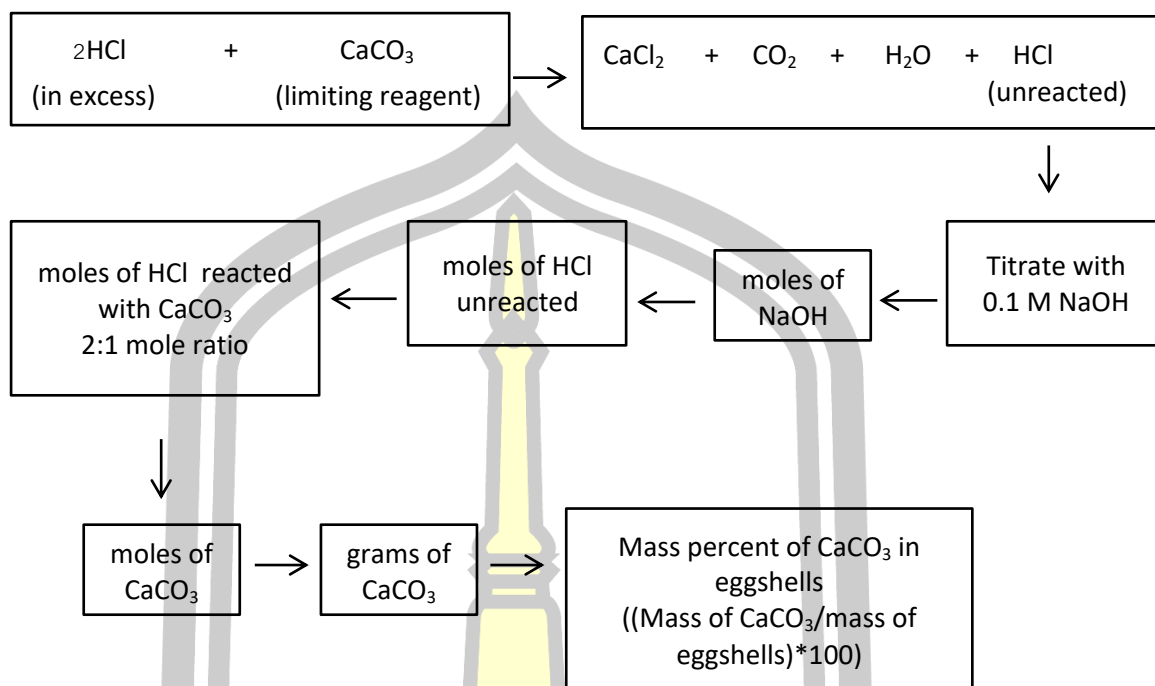
ภาพประกอบที่ 16 ลักษณะการเกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาปัจจัยต่างๆ
ที่มา: www.mpikg.mpg.de/886719/MicelleFormation.pdf, (2559)



ตารางที่ 5 แสดงผลของสภาวะ สารตั้งต้น และสารเติมแต่งในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต

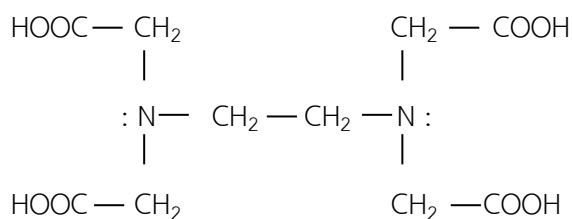
อ้างอิง	สารตั้งต้น	สารเติมแต่ง	สภาวะการผลิต		คุณลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้		
			pH	อุณหภูมิ (°C)	รูปร่าง	พหุสัณฐาน	ขนาด μm
Oladoja et al., (2012)	CaCO_3 (gastropod shell), Na_2CO_3	-	11	Room temp.	-	-	< 2.0
Kim et al., (2010)	CaCl_2 , Na_2CO_3	Aspartic acid	8.5	25	Cube, sphere	Calcite, Vaterite	-
Bai et al., (2009)	CaCl_2 , Na_2CO_3	-	-	Room temp.	Sphere	-	4-8
Prah et al., (2011)	$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_2\text{COONH}_4$	-	-	15-50	Cube, sphere	Calcite	0.03-0.05
Choi B et al., (2014)	CaCl_2 , $(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$	PVA	-	26	Rhombohedral	Calcite	0.07-0.70
Boyjoo, Y et al., (2015)	CaCl_2 , Na_2CO_3	PSS	-	Room temp.	Sphere	-	0.45
Volodkin et al., (2004)	CaCl_2 , Na_2CO_3	PSS	-	Room temp.	Sphere	-	4-6
Li, S et al., (2010)	CaCl_2 , Na_2CO_3	DTAB	11	25	Petal flower	Calcite	0.6-0.8
			13	25	Antenna-shaped		2.0
			-	60	Coral-shaped		3.0
			-	80	Dendrite-shaped		3.0

การศึกษาการหาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกไข่ โดยการทำให้ปฏิกิริยาในกรดตามปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจากองค์ประกอบหลักของเปลือกไข่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 ที่เป็นของแข็ง มีสารรงควัตถุอื่นๆ ผสมอยู่ การวิเคราะห์นี้จะทำโดยให้แคลเซียมคาร์บอเนตในรูปเปลือกไข่ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 solution) โดยอ้างอิงจากวิธีพื้นฐานสำหรับคำนวณทางเคมีจาก “Determination of Calcium Carbonate in Eggshells – Background”



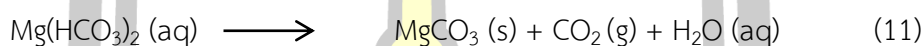
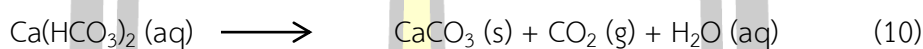
ภาพประกอบที่ 17 ขั้นตอนการทดสอบร้อยละมวลของ CaCO_3 ในเปลือกไข่

การหาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้ EDTA เป็นไทเทรนต์ในการวิเคราะห์ ความแตกต่างของสารละลายการไทเทรตไอออนของโลหะ (Metal ions) ด้วยสารละลาย Complexing agent แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับ Complexing agent นั้นไทเทรนต์ (Titrant) ที่ใช้กันมาก คือ Ethylenediamine tetraacetic acid ซึ่งนิยมเขียนแทนด้วย EDTA หรือ H_4Y มีสมบัติเป็น Aminopolycarboxylic acid มีโครงสร้างดังนี้



EDTA คือ Sodium dihydrogen ethylenediamine tetraacetate dehydrate มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ สามารถเกิด สารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรมากกับไอออนของโลหะหลายตัวในอัตราส่วน 1 : 1 ในการไทเทรตระหว่าง EDTA กับไอออนของโลหะ นิยมใช้ Eriochrom Black T หรือ Merexide เป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติจะเห็นสีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนไปได้ชัดเจนเมื่อสารละลายมี pH เหมาะสม ถ้าใช้ Eriochrom Black T เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายควรมี pH 7 - 12 หรือถ้าใช้ Merexide เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายควรมี pH 9 - 11 ดังนั้น ในการทดลองต้อง

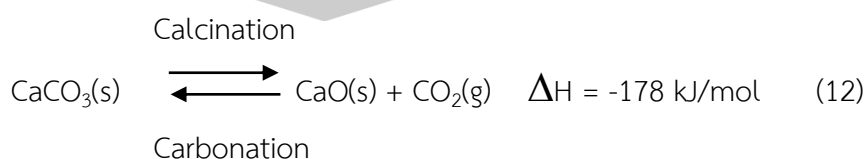
เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไปด้วยทุกครั้ง ในสารละลายจะมี Calcium ion (Ca^{2+}) และ Magnesium ion (Mg^{2+}) ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือ Calcium hydrogencarbonate ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), Calcium chloride (CaCl_2), Calcium sulfate (CaSO_4) และ Magnesium hydrogen carbonate ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$), Magnesium chloride (MgCl_2), Magnesium sulfate (MgSO_4) เกลือเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับ EDTA ผลการวิเคราะห์จะเป็นการวัดความกระด้างทั้งหมดของน้ำอันเนื่องมาจากเกลือไบคาร์บอเนต คลอไรด์และเกลือซัลเฟต ถ้าเอาสารละลายที่มีเกลือไบคาร์บอเนต เกลือคลอไรด์ และเกลือซัลเฟต ไปต้มจนเดือดจะเกิดปฏิกิริยา ตกตะกอนของ เกลือไบคาร์บอเนต



ดังนั้นสารนี้จะคงเหลือเกลือของคลอไรด์และเกลือซัลเฟต (CaCl_2 , MgCl_2 , CaSO_4 , MgSO_4) เท่านั้น จากข้อมูลงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าการบวนการตกตะกอนทางเคมี (Precipitated Calcium Carbonate: PCC) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการทำในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเศษเปลือกไข่อุตสาหกรรม ทั้งในเรื่องที่กระบวนการสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางธรรมชาติที่มีสารอื่นเจือปนได้ กระบวนการสังเคราะห์ไม่ซับซ้อนรวมถึงไม่ต้องทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความร้อนและอุณหภูมิสูง และไม่มีน้ำมันเจือปนในน้ำเสียซึ่งบำบัดได้ยาก ข้อดีเหล่านี้ยังตรงกับความต้องการของเอกชน ดังนั้นผู้วิจัยและบริษัทเอกชนจึงได้เลือกกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมาใช้ในการวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเศษเปลือกไข่อุตสาหกรรม เพื่อนำข้อมูลไปใช้ออกแบบระบบการผลิตต่อไป

2.5 การผลิตและการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์

โดยทั่วไปแล้วแคลเซียมออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ โดย (1) การทำปฏิกิริยาของสารเคมีที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ หรือนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ เช่น สารประกอบแคลเซียมไนเตรท แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ แคลเซียมอะซิเทรต เป็นต้น และ (2) การนำวัสดุธรรมชาติหรือของเสียที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบมาเผาที่อุณหภูมิสูง โดยวัสดุธรรมชาติที่เป็นสารตั้งต้น ได้แก่ หินปูนแคลไซต์ โดโลไมต์ การสังเคราะห์ทำโดยนำหินปูนแคลไซต์ โดโลไมต์ มาบดละเอียดและนำไปเผาให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



แคลเซียมออกไซด์สามารถเตรียมได้จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูนในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ลักษณะผงแคลเซียมออกไซด์จะมีรูปร่างไม่แน่นอนอนปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น และปฏิกิริยานี้ยังสามารถย้อนกลับได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) รวมตัวกับ CaO แล้วกลับไปเป็น CaCO_3 ได้เนื่องจากความดันที่ได้จากแก๊ส CO_2 ที่อยู่ในสมดุลระหว่าง CaO กับ CaCO_3 นั้นเอง ซึ่งความดันแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิ ความดันจึงเพิ่มสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้ในกระบวนการผลิต แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการดูดเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นออกจากปฏิกิริยา เพื่อเป็นการป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ แล้วเป็นการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ให้มากขึ้นด้วย จากการรวบรวมผลการศึกษาระบวนการต่างสามารถสรุปได้ดังตารางของลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการสังเคราะห์

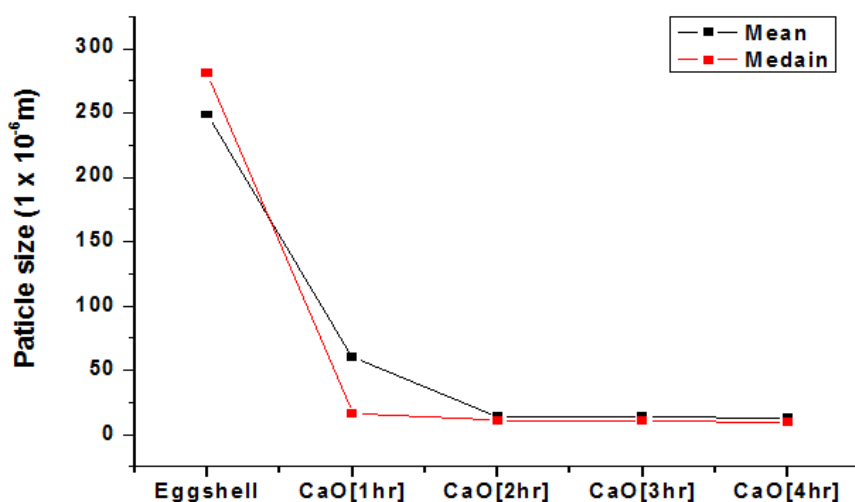


ตารางที่ 6 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาและวิธีการสังเคราะห์

รูปของตัวเร่งปฏิกิริยา/แหล่งที่ ใช้การสังเคราะห์	คุณลักษณะ				
	Surface area (m ² /g)	Basic Strength (H ₊)	Basic Site Density (mmol/g)	Calcinations temperature (°C) and time (h)	Calcination environment
CaCO ₃ จากหินปูน	10	7.2<H ₊ <9.3	0	-	-
Ca(OH) ₂ จากหินปูน	16	9.3<H ₊ <15.0	0.10	ความร้อน 900 °C 1.5 ชั่วโมง	นำ CaO ที่ได้ไปใส่ใน อีเลียมที่มีความชื้น
CaO ⁷ จากหินปูน	13	15.0<H ₊ <18.4	0.12	ความร้อน 900 °C 1.5 ชั่วโมง	แก๊สอีเลียม
CaO + Air จากหินปูน	13	9.3<H ₊ <15.0	0.03	ความร้อน 900 °C 1.5 ชั่วโมง	นำ CaO ที่ได้ไปทิ้งไว้ ให้สัมผัสอากาศ
CaO จากเปลือกไข่	13.45	-	-	ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้แก๊สไนโตรเจน
CaO จาก CaCO ₃	19.04	-	-	ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้แก๊สไนโตรเจน
CaO จากเปลือกไข่	1.1	-	0.176	ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกหอยเชอร์รี่	0.9	-	0.207	ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกหอยตลับ	0.9	-	0.172	ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	3.72	-	-	ความร้อน 900 °C 2.5 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จาก CaCO ₃	3.00	-	-	ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	8.01	-	-	บดให้มีขนาด เฉลี่ย 11 μm ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	3.54	-	-	บดให้มีขนาด เฉลี่ย 23 μm ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จาก CaCO ₃	1.73	-	-	บดให้มีขนาด เฉลี่ย 26 μm ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	1.00	-	-	ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จาก CaCO ₃	5.09	-	-	ความร้อน 800 °C 2 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	19.32	-	-	ความร้อน 800 °C 2 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากหินปูน	0.4	H ₊ <7.2	-	ความร้อน 800 °C 3 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
Ca(OH) ₂ จากหินปูน	12.4	12.2<H ₊ <15.0	-	ความร้อน 800 °C 3 ชั่วโมง นำ CaO Reflux กับน้ำ 60°C ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากหินปูน	25	12.2<H ₊ <15.0	-	ความร้อน 800 °C 3 ชั่วโมง นำ CaO Reflux กับน้ำ 60°C ชั่วโมง แล้วให้ความ ร้อนที่ 600°C	ใช้อากาศ
CaO สำเร็จรูป	2.1	9.8<H ₊ <12.2	-	-	-
Microsphere CaO	5.3	-	-	เตรียมจาก Na ₂ CO ₃ และ CaCl ₂ ให้ความ ร้อน 1000 °C 2 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
Nano CaO สำเร็จรูปขนาด 45 μm	85	-	-	-	-

ที่มา: อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และ อภิพงษ์ พุฒคำ, (2014)

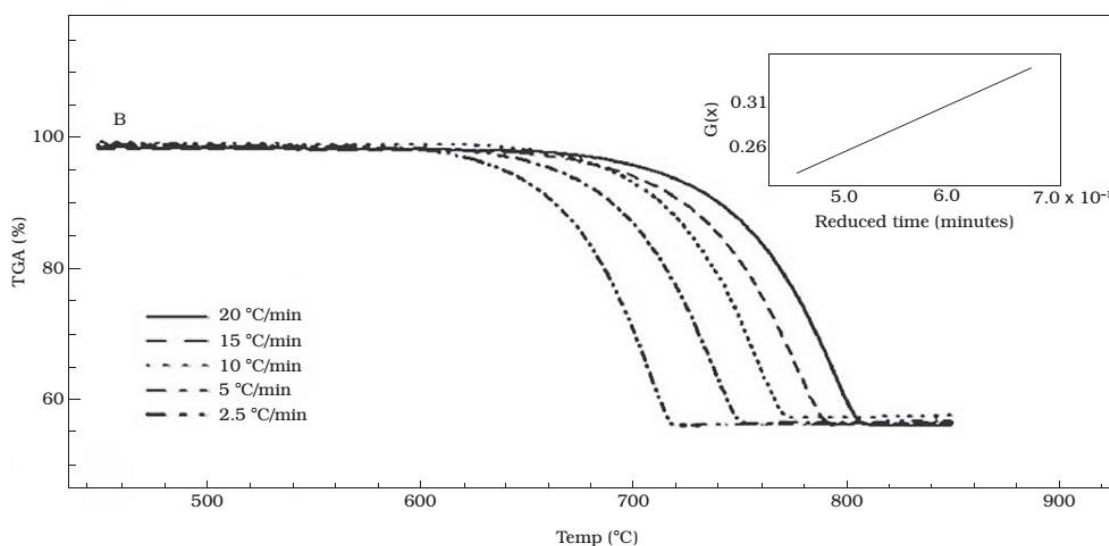
การทดลองนำเปลือกไข่มาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1-4 ชั่วโมง และนำไปวัดขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ด้วยเครื่อง Laser Diffraction Particle Size Analyzer พบว่าเปลือกไข่มีค่าขนาดอนุภาค 280.61 ไมครอน และเมื่อนำมาแคลไซน์ทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์ ที่ที่ได้มีค่าขนาดอนุภาคระหว่าง 9.92 - 16.27 ไมครอนตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 18 จะเห็นได้ว่า หากนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาแคลไซน์จะทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าสารตั้งต้นกว่า ร้อยละ 94 และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการแคลไซน์ โดยมีความบริสุทธิ์ ถึงร้อยละ 98 ดังนั้น วิธีการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง จึงเป็นทางเลือกในการผลิตแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ซับซ้อนและสามารถ นำกระบวนการใช้กับอุตสาหกรรมที่มีเตาเผาอยู่แล้วได้ จากผลการศึกษาของ Poenchai *et al.*, (2015) และดังตารางที่ 7



ภาพประกอบที่ 18 ขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ที่บด และแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรม

Sample	Decomposition temperature	Compound	2θ
JCPDS data	-	CaCO ₃	29.4° 39.4° 43.2° 47.4° 48.5°
JCPDS data	-	CaO	32.2° 37.3° 58.3° 64.1° 67.3°
Egg-shell wastes	800 °C 2h	CaO	32.3° 37.42° 53.92° 64.22° 67.42°
Egg-shell wastes (this study)	As received	CaCO ₃	29.4° 39.5° 43.2° 47.6° 48.6°
	800 °C 1h	CaO	32.2° 37.4° 53.9° 64.2° 67.4°
	800 °C 2h	CaO	32.2° 37.4° 53.9° 64.2° 67.4°
	800 °C 3h	CaO	32.2° 37.4° 53.9° 64.2° 67.4°
	800 °C 4h	CaO	32.2° 37.4° 53.9° 64.2° 67.4°

การศึกษาการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเศษเปลือกไข่เหลือทิ้งจากงานวิจัยของ Murakami *et al.*, (2007) โดยกลไกในการเผาหรือการแคลไซต์เปลือกไข่ด้วยระบบสภาวะมีไนโตรเจน ควบคุมอัตราการให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2.5, 5, 10, 15 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงระดับอุณหภูมิสุดท้ายที่ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแบบไดนามิกของ 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าผลของ TGA ของเปลือกไข่ที่ผ่านการควบคุมอัตราเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซต์ การให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่ำๆ ส่งผลต่อการสลายตัวสามารถให้แคลเซียมออกไซด์ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำประมาณ 750 องศาเซลเซียสแต่จำเป็นต้องใช้เวลาในเพิ่มอุณหภูมิจนถึงระดับที่ต้องการดังภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบที่ 19 เส้นโค้ง TG ของเปลือกไข่แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้รับในอัตราการให้อุณหภูมิที่ต่างกัน ความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแบบไดนามิก



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ จากเปลือกไข่อุตสาหกรรมเหลือทิ้ง ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี แบ่งการดำเนินการวิจัย ออกเป็น 5 ขั้นตอน (1)การนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการทำความสะอาดและการเตรียมเปลือกไข่ให้ เป็นผงเปลือกไข่ (2)ผงนำเปลือกไข่มาทำให้อยู่ในรูปของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยการทำให้ ปฏิกิริยากับไฮโดรคลอริก และหาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (3)นำสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดไปศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนต จะได้ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียม คาร์บอเนตชนิดตกผลึก จะได้อัตราส่วนความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนต ระยะเวลาการกวนผสม และ สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม (4)นำมาศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก และ(5)ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซด์แคลเซียมคาร์บอเนต ชนิดตกผลึกไปการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุสังเคราะห์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 อุปกรณ์

- 3.1.1 เครื่องปั่นผสมโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) ยี่ห้อ Nissei รุ่น AM-8
- 3.1.2 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น AL 204
- 3.1.3 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ยี่ห้อ Yellow line รุ่น Yellow MAG HS7
- 3.1.4 เตาอบ (Hot air oven) ยี่ห้อ BINDER รุ่น DE 115
- 3.1.5 เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump) รุ่น NO22
- 3.1.6 เตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace)
- 3.1.7 ตะแกรงร่อนขนาด 125 ไมโครเมตร mesh NO.120 ยี่ห้อ U.S.A. Standard testing sieve
- 3.1.8 โถดูดความชื้น แบบสุญญากาศ (Desiccation)

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% บริษัท Rci Labscan limited
- 3.2.2 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 99.5% บริษัท Loba Cheemie Pty Ltd.

3.2.3 แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) 98% บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd.

3.2.4 Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) 98% บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd.

3.2.5 Polyethyleneglycol (PEG) 99% บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd.

3.2.6 Ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) 99.9% บริษัท VWR Chemicals BDH Prolabo®.

3.3 เครื่องมือทดสอบ

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น Leo1455VP ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงชนิด Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.3.3 เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3.3.4 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.3.5 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัว (Laser Particle Size Analyzer : LPSA) ยี่ห้อ Beckman Coulter รุ่น LS 230 ห้องปฏิบัติการ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

3.4 การดำเนินการทดลอง

ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

3.4.1 การเตรียมเศษเปลือกไข่ไก่

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมเปลือกไข่ให้เป็นผงเปลือกไข่ เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ และง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา เศษเปลือกไข่ไก่ที่นำมาศึกษาเป็นเศษเปลือกไข่ไก่เหลือทิ้งที่เกิดจากการฟักตัวของไก่ จากโรงฟักไข่บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) หมู่ที่ 6 ถนนสีคิ้ว-โชคชัย ตำบลพลับพลา อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา เนื่องจากเปลือกไข่ที่ได้รับมามีลักษณะเป็นเปลือกไข่ที่มีขนาดใหญ่กว่าหนึ่งมิลลิเมตรขึ้นไป และมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น เยื่อเปลือกไข่ เศษรงควัตถุต่างๆ โดยเศษเปลือกไข่ที่ได้รับมาผ่านการบดย่อยด้วยเครื่องสกรูแบบหยาบจากโรงงาน และผ่านการคัดเอาเศษซากลูกไก่ที่ตายออกก่อนแล้ว ดังนั้นขั้นตอนการเตรียมจึงเริ่มจากการนำเศษเปลือกไข่ไก่มาล้างทำความสะอาดแล้วแยกเยื่อและสิ่งสกปรกที่ติดมาออกจากเศษเปลือกไข่ไก่ด้วยน้ำ 2-3 ครั้ง จากนั้นตากให้แห้ง และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องฮอโมจีไนซ์

(Homogenizer) แล้วคัดขนาดด้วยการนำไปร่อนตะแกรงเบอร์ 120 จะทำให้ได้ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมโครเมตร ดังภาพประกอบที่ 20

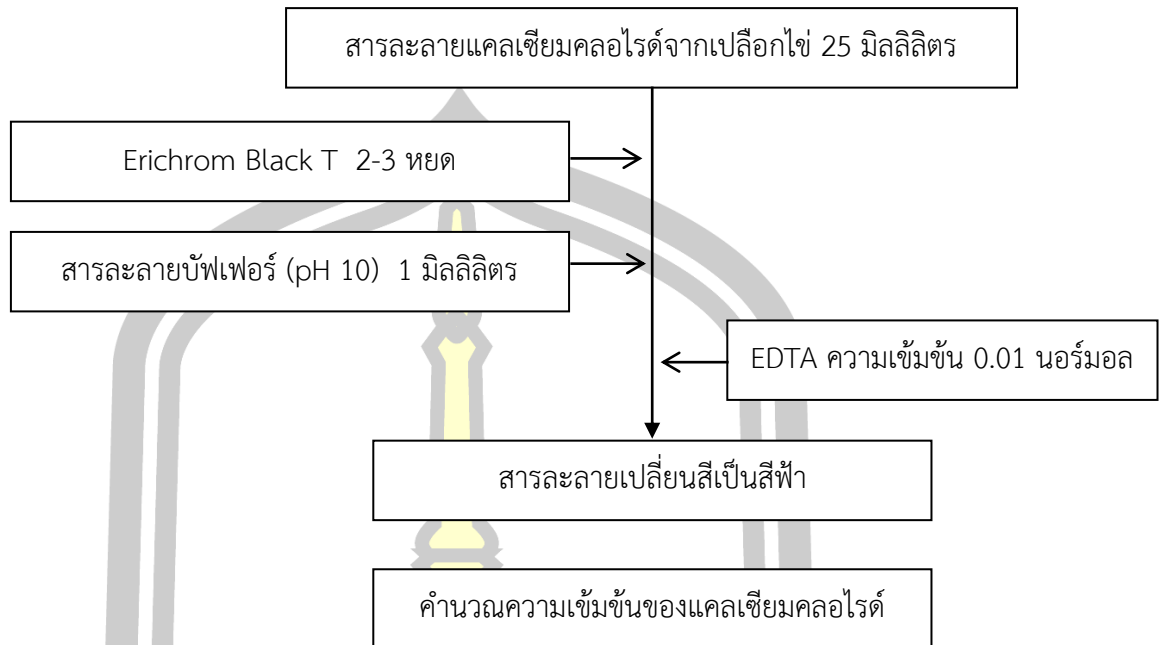
3.4.2 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่

ขั้นตอนนี้แบ่งการศึกษาย่อยออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย

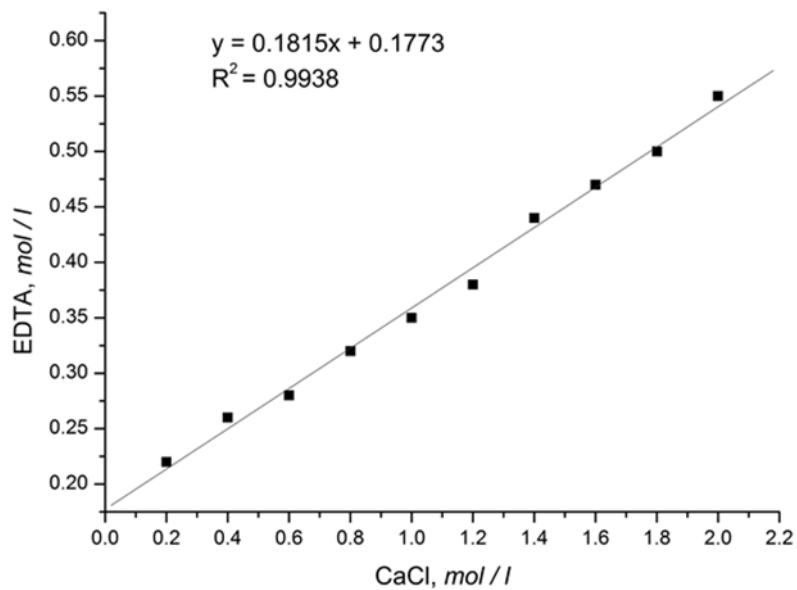
(1) การเตรียมกราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

เพื่อใช้เทียบความเข้มข้นในเชิงปริมาณของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้จากเปลือกไข่ โดยใช้ EDTA เป็นไทเทรแทนต์ในการวิเคราะห์ มีขั้นตอนดังนี้ เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอนโดยเตรียมที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2 โมลต่อลิตร นำมา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิลิตร เติม Eriochrom Black T เป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด และเติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไป 1 มิลลิลิตร ทำการไทเทรตระหว่าง EDTA กับไอออนของโลหะแคลเซียมในตัวอย่าง เมื่อถึงจุดยุติอินดิเคเตอร์จะเริ่มทำปฏิกิริยากับ EDTA และจะเห็นสีของสารละลายตัวอย่างเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีม่วงอมชมพูได้ชัดเจน จากนั้นคำนวณหาปริมาณสารละลาย EDTA ที่ใช้และหาความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จริงจากปริมาณตัวอย่าง ดังภาพประกอบที่ 21 การวิเคราะห์ความกระด้างด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน จากแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปเปลือกไข่ที่ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 solution) อ้างอิงจากวิธีพื้นฐานสำหรับคำนวณทางเคมีจาก "Determination of Calcium Carbonate in Eggshells – Background" แสดงไว้ในภาคผนวก จากวิธีดังกล่าวจึงทำการศึกษาเบื้องต้นโดยการทำการกราฟสารละลายมาตรฐานของแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 22





ภาพประกอบที่ 20 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ EDTA เป็นไทแทรนต์ สารประกอบเชิงซ้อน



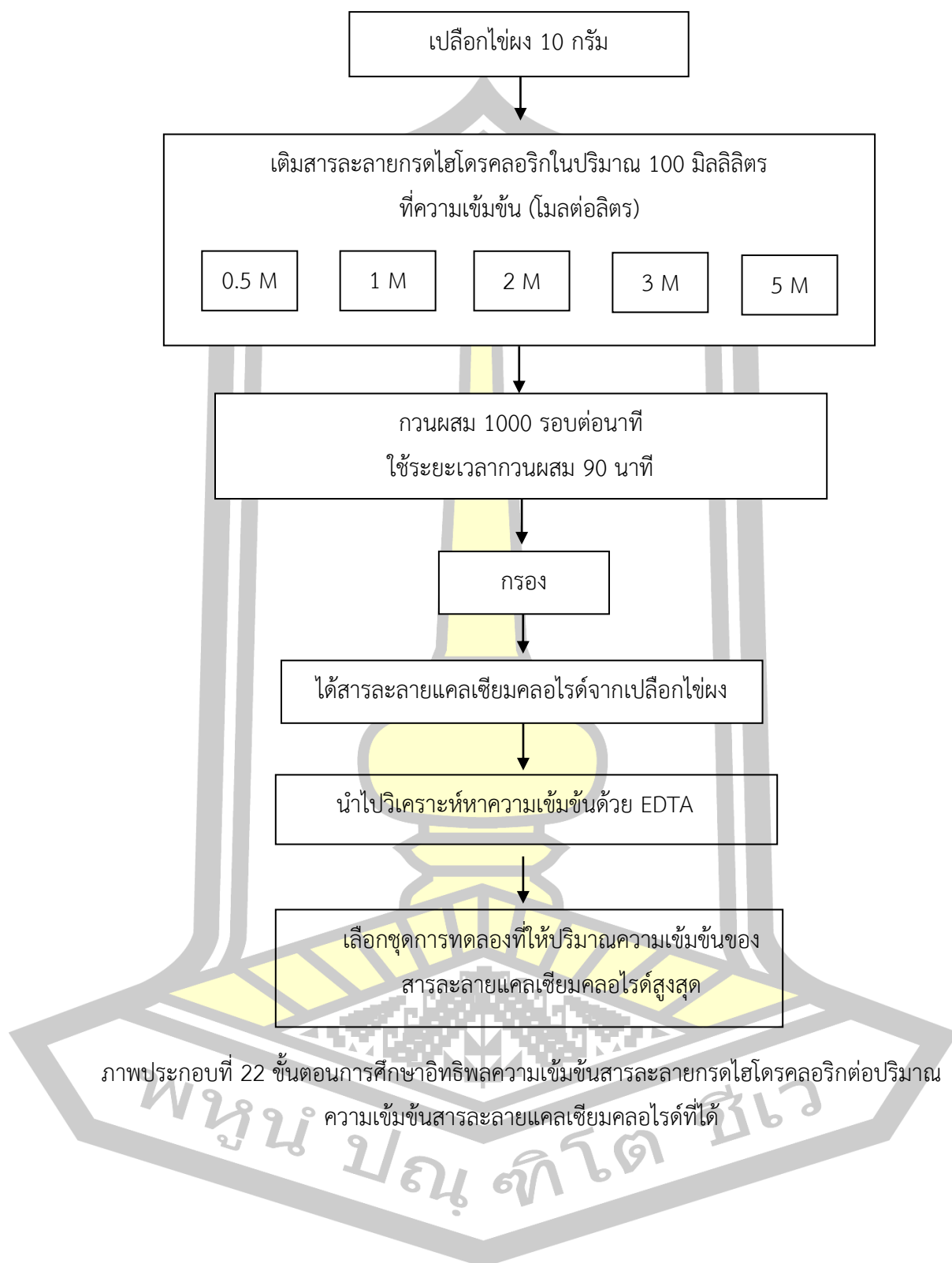
ภาพประกอบที่ 21 กราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

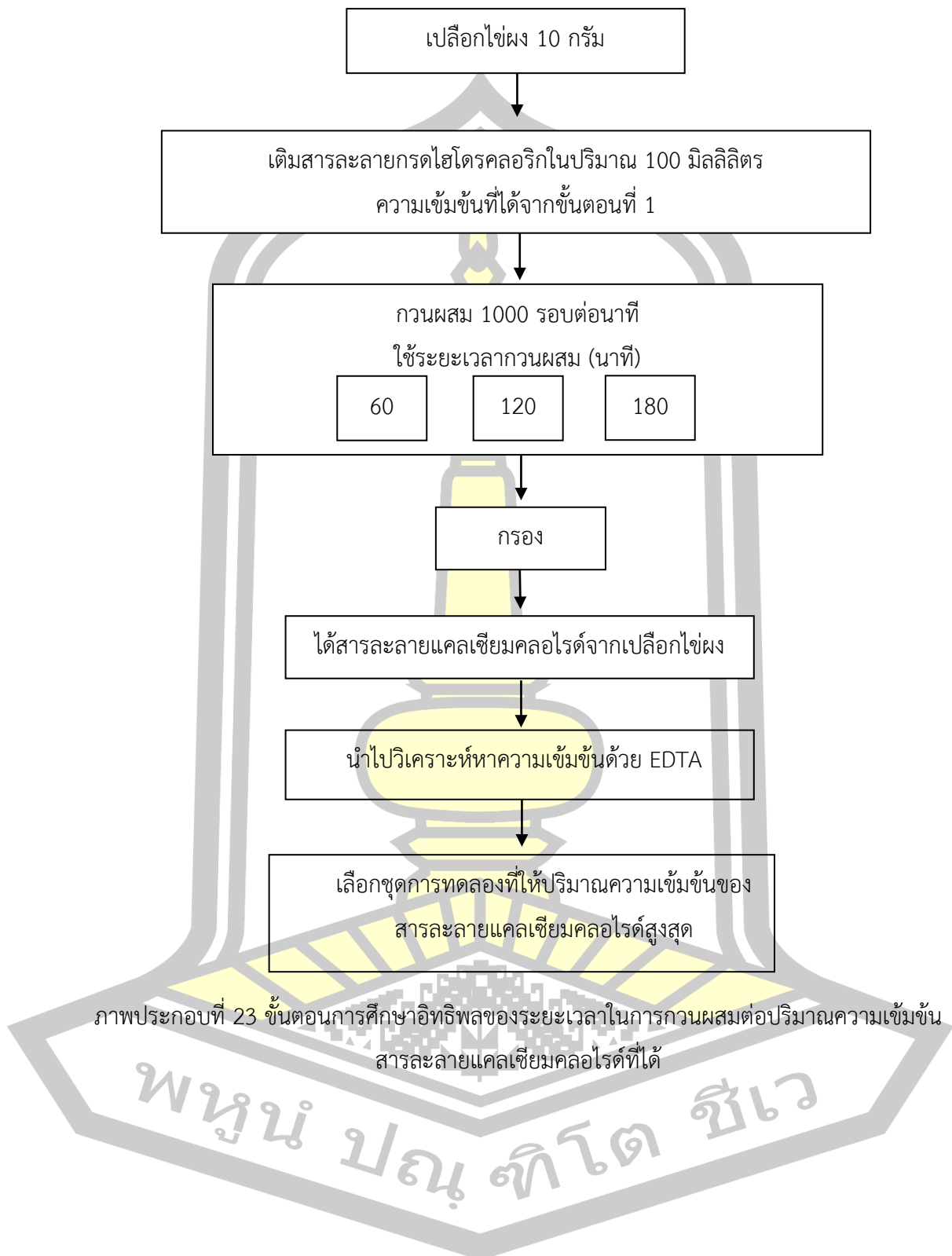
(2) ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่

เพื่อหาอัตราส่วนความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่มีความเข้มข้นสูงที่สุด โดยดัดแปลงขั้นตอนจากวิธีของ Oladoja *et al.*, (2011) มีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 37 นำมาปรับปริมาตรความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ต้องการด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้มีความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 3 และ 5 โมลต่อลิตร แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับเปลือกไข่ผงในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตร ต่อผงเปลือกไข่ในปริมาณ 10 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร และเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นใช้ความเร็วในการกวนผสม 1000 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนสาร Hotplate Stirrer และใช้ระยะเวลาการกวนผสมนาน 90 นาที เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด แต่ละชุดการทดลองนำสารละลายมากรองเอาเศษตะกอนออกจะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ โดยใช้วิธีจากขั้นตอนที่ 1 จากนั้นคำนวณและเลือกชุดการทดลองที่ให้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูงสุด ขั้นตอนแสดงดังภาพประกอบที่ 23

(3) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่

เมื่อได้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสม เพื่อพิจารณาระยะเวลาในการกวนผสมในการทำปฏิกิริยาที่จะส่งผลต่อการปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากใช้ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เลือกได้นำมา 100 มิลลิลิตร ผสมเปลือกไข่ผง 10 กรัม ทำปฏิกิริยาโดยให้ความเร็วในการกวนผสม 1000 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาการกวนผสมที่ศึกษา 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแต่ละชุดการทดลองนำสารละลายมากรองเอาเศษตะกอนออกจะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ โดยใช้ EDTA เป็นไทเทรนต์ในการวิเคราะห์ จากนั้นคำนวณเลือกชุดการทดลองของอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมโดยการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้สูงสุดเป็นเกณฑ์ในการเลือก ดังภาพประกอบที่ 24





3.4.3 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิ ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกเปลี่ยนแปลงประกอบไปด้วย

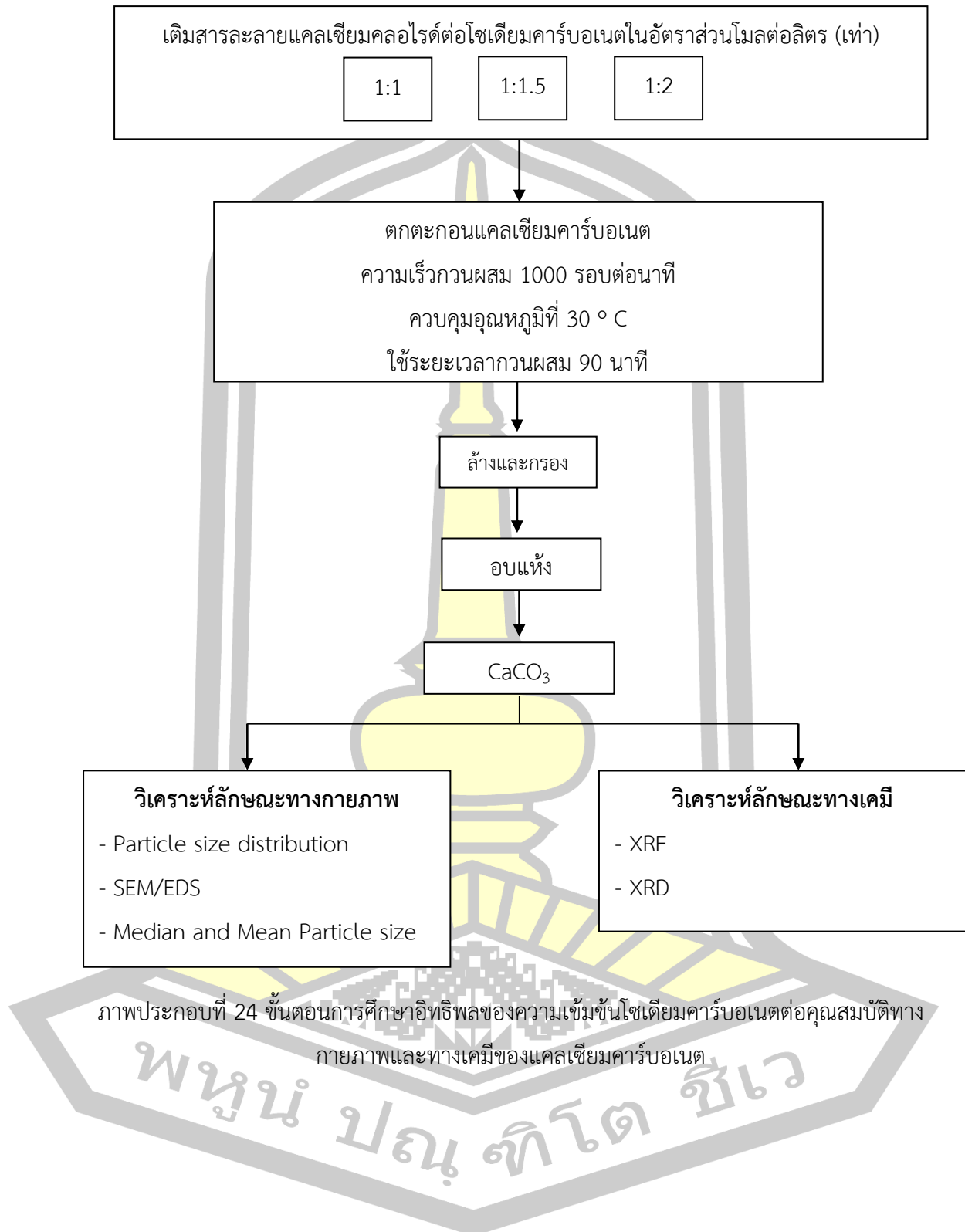
(1) ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ ส่งผลต่อขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากใช้อัตราส่วนโมลต่อลิตรสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ศึกษาเป็น 1:1 , 1:1.5 และ 1:2 เท่า ตามลำดับ ใช้ปริมาณที่ 80 มิลลิลิตรเท่ากัน ทำปฏิกิริยาในสภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นระยะเวลา 90 นาที ที่ความเร็วรอบในการกวน 1000 รอบต่อนาที เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดจะสามารถตกตะกอนผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ จากนั้นนำมากรองและล้างผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 รอบ แล้วอบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพประกอบไปด้วยลักษณะรูปร่างอณูฐานด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) กระจายขนาดของรูพรุน (pore-size distribution) และคุณสมบัติทางเคมีคือ X-ray Fluorescence (XRF) และ X-ray Diffractometer (XRD) ดังภาพประกอบที่ 25 จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยใช้ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่เล็กและกระจายขนาด เมื่ออัตราส่วนที่เหมาะสมนำไปศึกษาต่อในขั้นตอนที่ 2

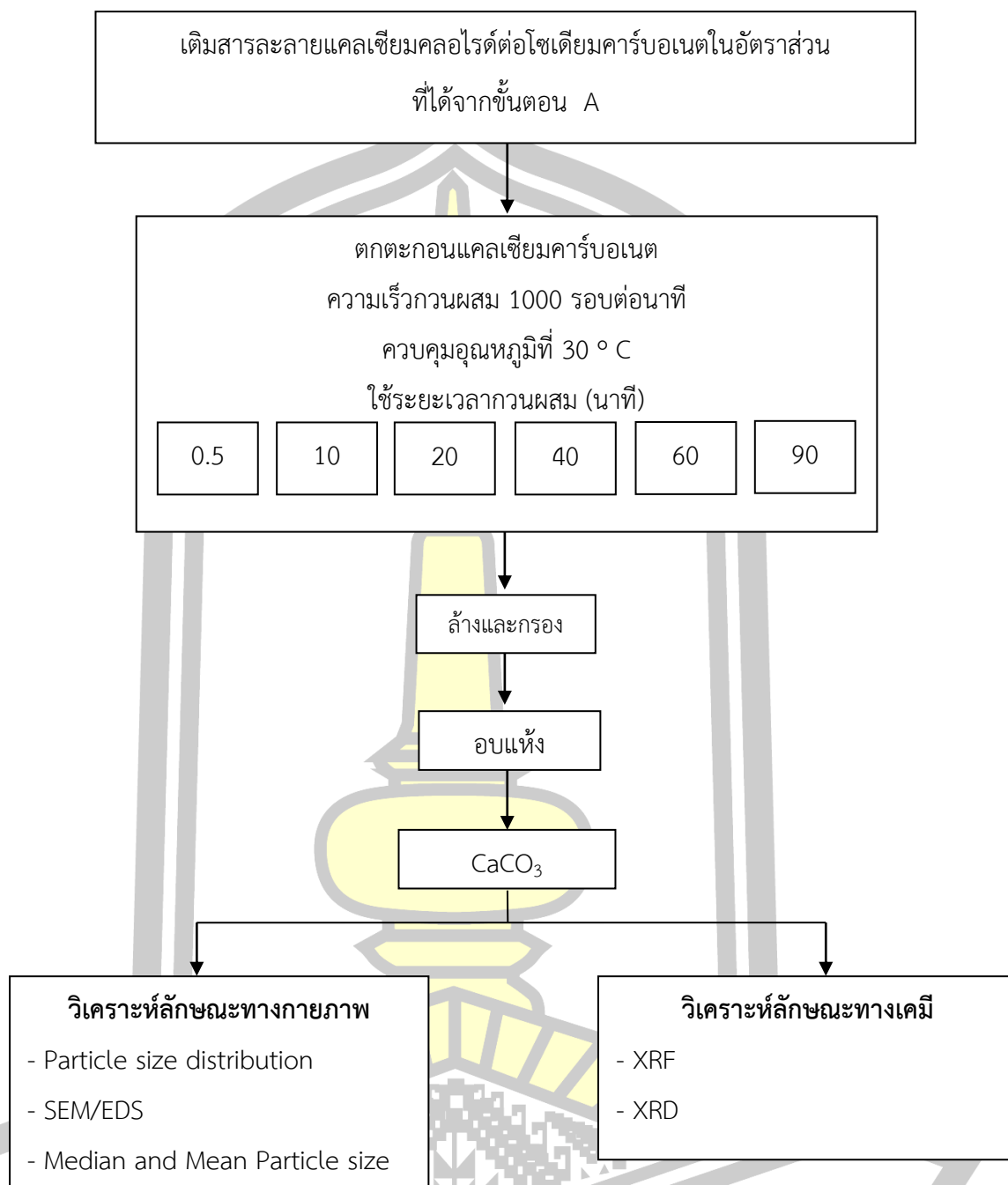
(2) การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อหาระยะเวลาในการกวนผสมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้ หลังจากที่ได้อัตราส่วนที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 แล้ว ทำการศึกษาระยะเวลาในการกวนผสมที่ 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดจะสามารถตกตะกอนผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ จากนั้นนำมากรองและล้างผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 รอบ แล้วอบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังภาพประกอบที่ 26 แล้วทำการเลือกชุดการทดลองที่เหมาะสมโดยใช้ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่

เล็กและกระจายขนาดเป็นเกณฑ์หลักในการพิจารณา เมื่อได้ระยะเวลาในการกวนผสมที่เหมาะสมแล้วนำไปศึกษาต่อในขั้นตอนที่ 3

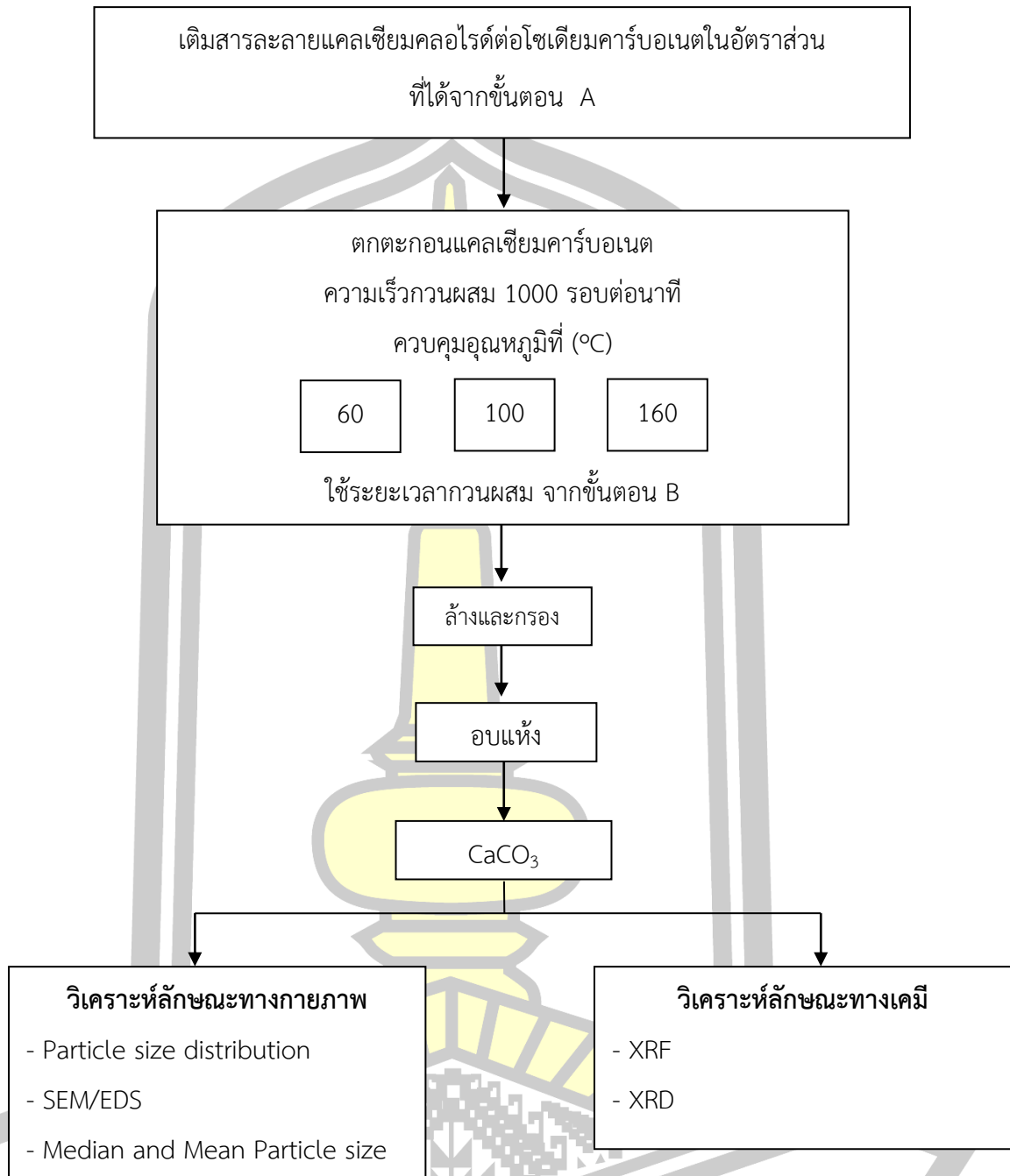
(3) การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนต ตามอัตราส่วนที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60, 100 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะสามารถตกตะกอนผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตได้ จากนั้นนำมากรองและล้างผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 รอบ แล้วอบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังภาพประกอบที่ 27 แล้วทำการเลือกชุดการทดลองที่เหมาะสมโดยใช้ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่เล็กและกระจายขนาดเป็นเกณฑ์หลักในการพิจารณา จะได้สภาวะของอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิ ที่เหมาะสมที่สุดต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก







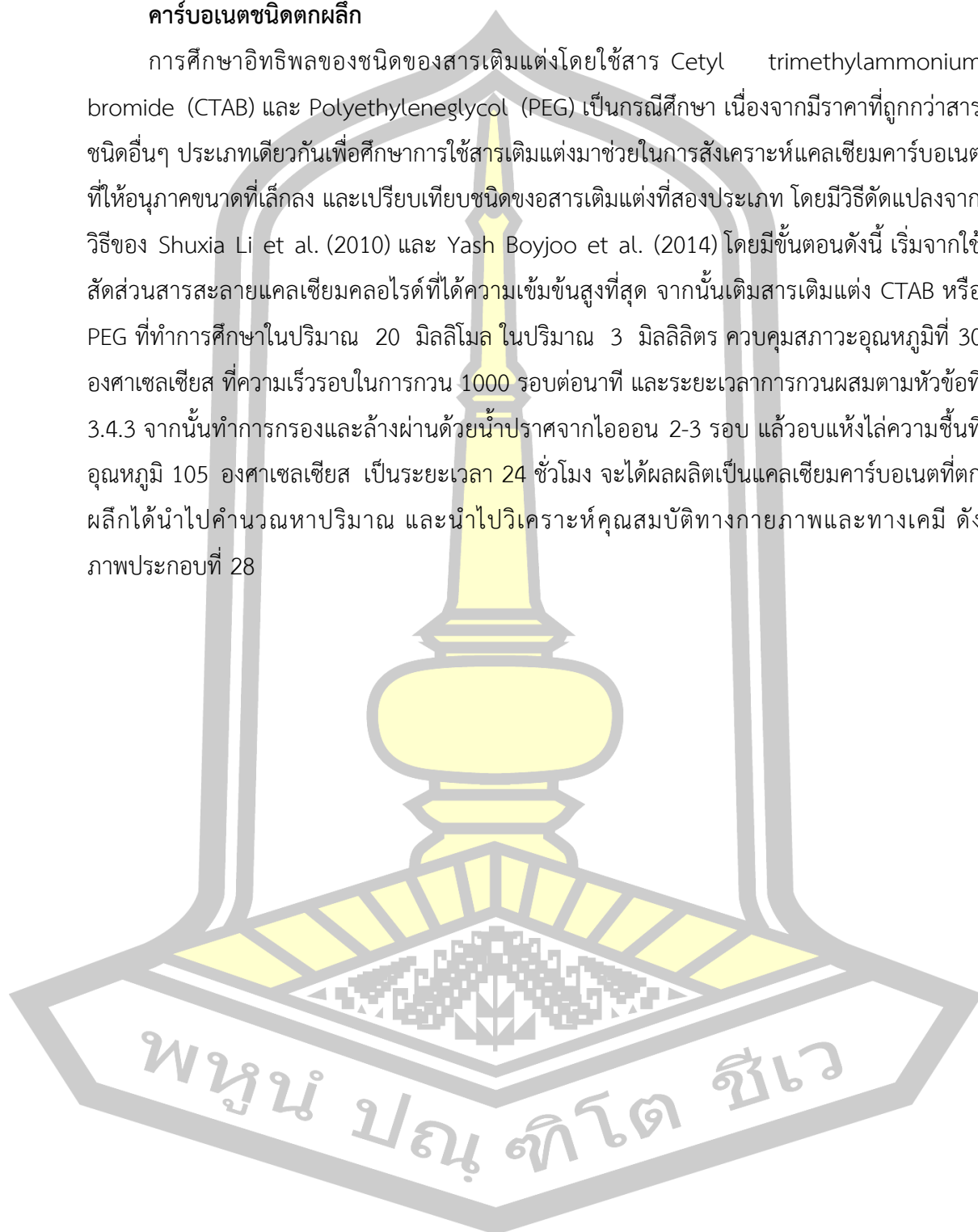
ภาพประกอบที่ 25 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

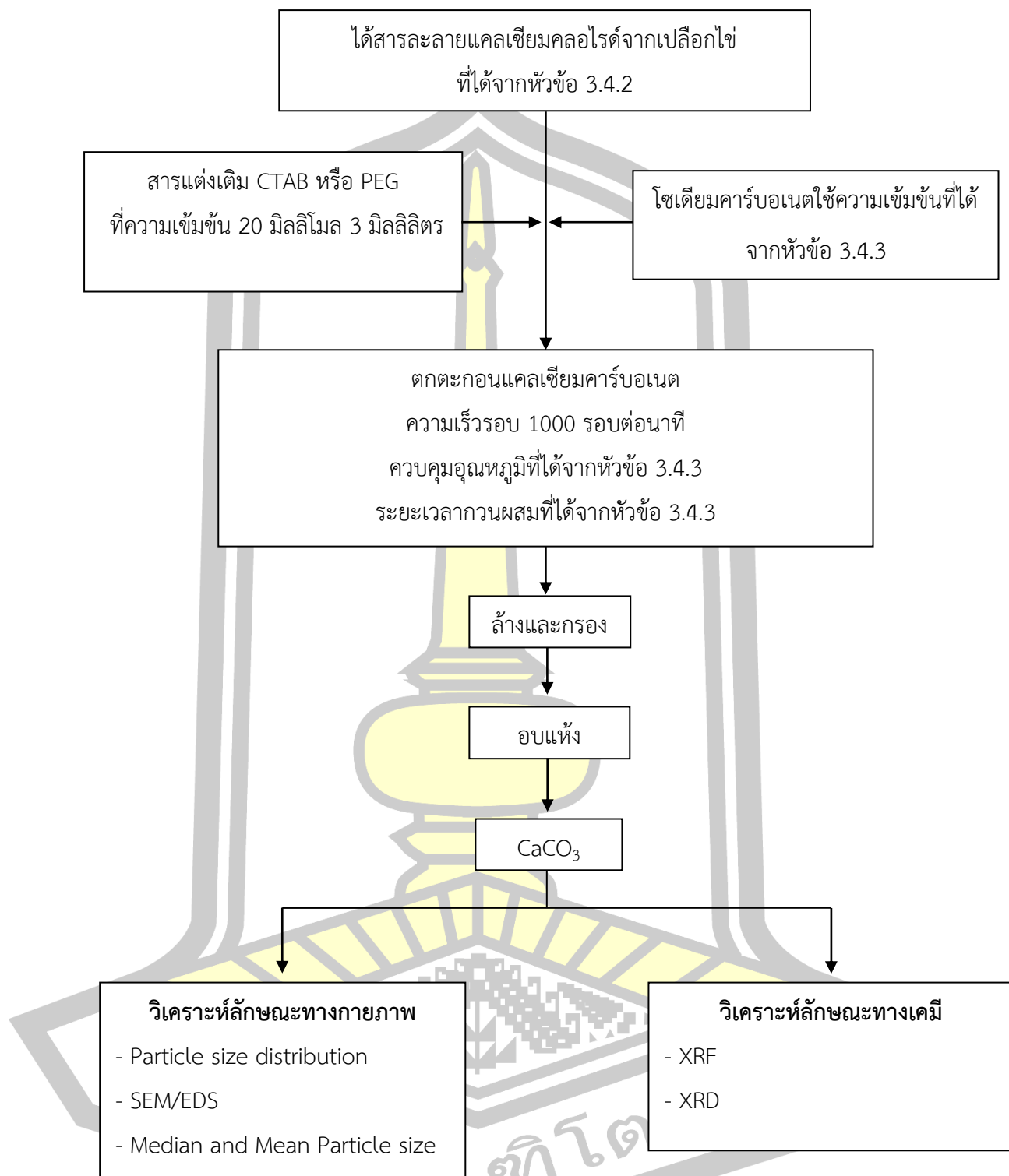


ภาพประกอบที่ 26 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

3.4.4 การศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก

การศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารเติมแต่งโดยใช้สาร Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) และ Polyethyleneglycol (PEG) เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าสารชนิดอื่นๆ ประเภทเดียวกันเพื่อศึกษาการใช้สารเติมแต่งมาช่วยในการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่ให้อนุภาคขนาดที่เล็กลง และเปรียบเทียบชนิดของสารเติมแต่งที่สองประเภท โดยมีวิธีดัดแปลงจากวิธีของ Shuxia Li et al. (2010) และ Yash Boyjoo et al. (2014) โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากใช้สัดส่วนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ความเข้มข้นสูงที่สุด จากนั้นเติมสารเติมแต่ง CTAB หรือ PEG ที่ทำการศึกษาในปริมาณ 20 มิลลิโมล ในปริมาณ 3 มิลลิลิตร ควบคุมสภาวะอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบในการกวน 1000 รอบต่อนาที และระยะเวลาการกวนผสมตามหัวข้อที่ 3.4.3 จากนั้นทำการกรองและล้างผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 รอบ แล้วอบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้นำไปคำนวณหาปริมาณ และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังภาพประกอบที่ 28

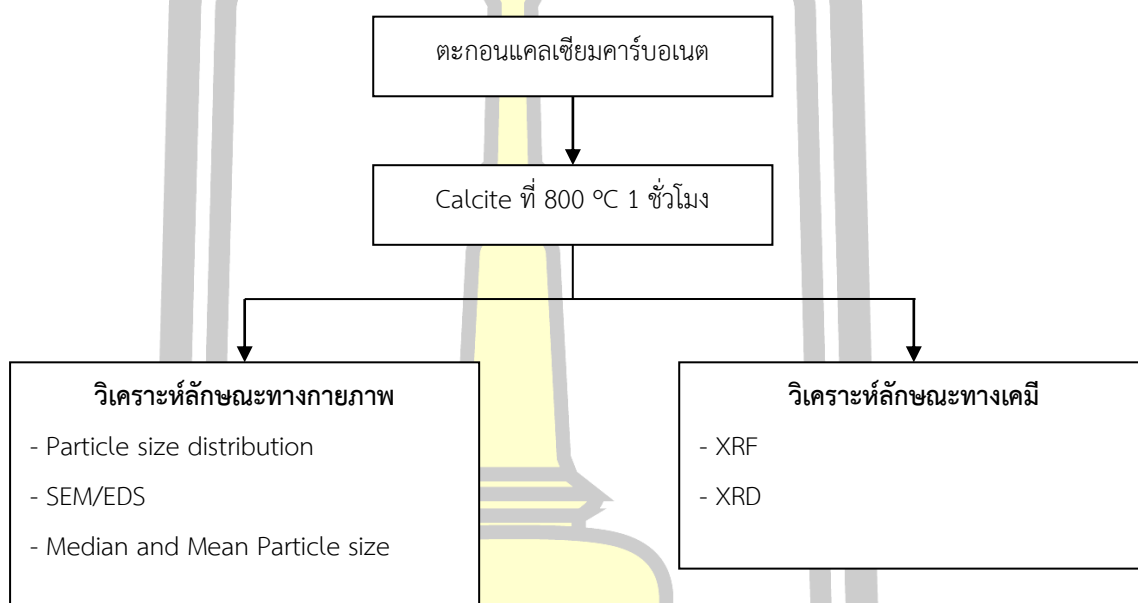




ภาพประกอบที่ 27 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง

3.4.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซน์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกลึก

เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซน์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกลึก โดยนำมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะได้แคลเซียมออกไซด์ แล้วนำผลไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบที่ 28 ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์



บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่อุตสาหกรรมเหลือทิ้ง ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางธรรมชาติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอน ประกอบไปด้วยขั้นที่ 1 คือการเตรียมเศษเปลือกไข่ไก่ โดยการนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการทำความสะอาดและบดเปลือกไข่ให้เป็นผงเปลือกไข่ ขั้นที่ 2 คือการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ไก่ โดยนำเปลือกไข่ผงที่ได้ทำให้อยู่ในรูปของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรคลอริก แล้วทำการหาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นนำไปศึกษาในขั้นที่ 3 คือการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิในขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ จะได้อัตราส่วนความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วนำมาศึกษาในขั้นที่ 4 คือการศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ ขั้นที่ 5 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ไปแคลไซต์ที่อุณหภูมิสูง ไปการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมเศษเปลือกไข่ไก่

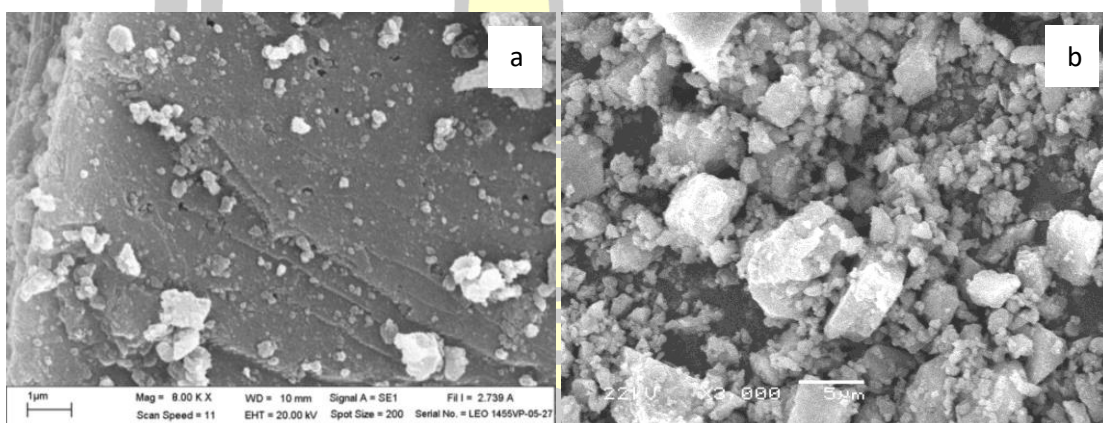
เศษเปลือกไข่ไก่ที่ได้รับมานั้นได้ผ่านการบดย่อยด้วยเกรียวสกูลแบบหยาบมาจากโรงงาน ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่ 1- 20.5 มิลลิเมตร เตรียมเศษเปลือกไข่ให้มีขนาดที่เท่ากันและมีขนาดเล็กเป็นผงละเอียด เพื่อความสะดวกในการใช้งานและเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา มีขั้นตอนการเตรียมเศษเปลือกไข่ให้เป็นผงเปลือกไข่ได้โดยการนำมาล้างทำความสะอาดและแยกเยื่อเปลือกไข่ และสิ่งสกปรกออก จากนั้นตากให้แห้งดังภาพประกอบ 30 (a) ทำการแยกเยื่อเปลือกไข่ที่เหลือออก นำไปอบให้แห้งสนิทที่ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสมโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer, ยี่ห้อ Nissei รุ่น AM-8) ร่อนผ่านตะแกรงกรองเบอร์ 120 ได้ผงเปลือกไข่ขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง ดังภาพประกอบ 30 (b)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเปลือกไข่ไก่ด้วยภาพถ่ายจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ดังภาพประกอบ 31 (a) จะเห็นว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ไก่มีพื้นผิวเรียบและมีรูเปิดขนาดเล็ก (Pore) แทรกอยู่ตามพื้นผิวของเปลือกไข่ไก่ และลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของแคลเซียมคาร์บอเนตจาก

หินปูน ดังภาพประกอบ 31 (b) มีลักษณะเป็นผลึกที่แตกออกจากกัน ไม่มีรูปทรงแน่นอน เกิดจากการบดละเอียด และร่อนตะแกรงคัดขนาด เพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ



ภาพประกอบที่ 29 a) เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด
b) ผงเปลือกไข่ ขนาดไม่เกิน 125 ไมโครเมตร



ภาพประกอบที่ 30 a) ภาพถ่ายเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด (กำลังขยาย 8,000 เท่า) b) ภาพถ่ายแคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบสองกราด (SEM)

4.2 ผลการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ไก่

การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วยขั้นตอนที่ 1 การเตรียมกราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ และขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่

ผลการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ พบว่าการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 3 และ 5 โมลต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อผงเปลือกไข่ 10 กรัม โดยใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 30 นาที ทำให้ได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูงสุดที่ 0.24 ± 0.108 , 0.56 ± 0.153 , 1.50 ± 0.128 , 1.56 ± 0.140 และ 1.58 ± 0.110 โมลต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ จะมีความเข้มข้นต่ำเมื่อใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่ำ และความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสูงขึ้น จนถึงความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ขึ้นไปความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จะทำปฏิกิริยาสมมูลกันพอดีกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปของผงเปลือกไข่ 10 กรัม ส่งผลให้ได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1.50 ± 0.128 ถึง 1.58 ± 0.110 โมลต่อลิตร และยังพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำที่ 0.5 และ 0.1 โมลต่อลิตร ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก มีเศษตะกอนของผงเปลือกไข่เหลืออยู่ และพบว่าปริมาณที่เหลืออยู่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการกวนผสม 6.0 ± 0.9 และ 3.1 ± 0.7 กรัม ตามลำดับที่ ระยะเวลา 30 นาที เนื่องจากปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมในผงเปลือกไข่ ดังแสดงในตารางที่ 8

เมื่อทำการศึกษาเพิ่มระยะเวลาในการกวนผสมระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับผงเปลือกไข่ที่มากขึ้นเป็น 60, 90, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5, 1, 2, 3 และ 5 โมลต่อลิตร ทำให้ได้ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูงสุดเป็น 0.40 ± 0.133 , 0.64 ± 0.154 , 1.72 ± 0.114 , 1.65 ± 0.128 และ 1.72 ± 0.124 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 120 นาที ยกเว้นความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ 2 โมลาร์ ให้ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูงสุด 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตร ที่ระยะเวลา 90 นาที จากตารางประกอบที่ 8 จะเห็นได้ว่าทุกความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเมื่อเพิ่มระยะเวลามากขึ้นความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก็สูงขึ้นด้วยจนถึงระยะเวลาหนึ่งความเข้มข้นจะคงที่หรือมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lechtanski, V. L. (2000) ดังนั้นการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ที่ได้ความเข้มข้นสูงสุดคือ 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อเปลือกไข่ผง 10 กรัม ใช้ระยะเวลาการกวนผสม 90 นาที

ตารางที่ 8 อิทธิพลความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ระยะเวลาต่างๆ

HCl	ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ระยะเวลาต่างๆ	ปริมาณเปลือกไข่ที่
-----	--	--------------------

โมลต่อลิตร)	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	180 นาที	เหลืออยู่
0.5	0.24 ± 0.108	0.26 ± 0.125	0.38 ± 0.112	0.40 ± 0.133	0.36 ± 0.108	เหลือผงเปลือกไข่ 2-6 กรัม
1.0	0.56 ± 0.153	0.58 ± 0.164	0.6 ± 0.128	0.64 ± 0.154	0.60 ± 0.128	เหลือผงเปลือกไข่ 0.2-3 กรัม
2.0	1.50 ± 0.128	1.58 ± 0.114	1.74 ± 0.137	1.72 ± 0.114	1.72 ± 0.124	เหลือผงเปลือกไข่ที่ 30 นาที 0.1 กรัม
3.0	1.56 ± 0.140	1.58 ± 0.128	1.60 ± 0.140	1.65 ± 0.128	1.65 ± 0.140	-
5.0	1.58 ± 0.110	1.62 ± 0.124	1.68 ± 0.108	1.72 ± 0.124	1.71 ± 0.140	-

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และอุณหภูมิใน ขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

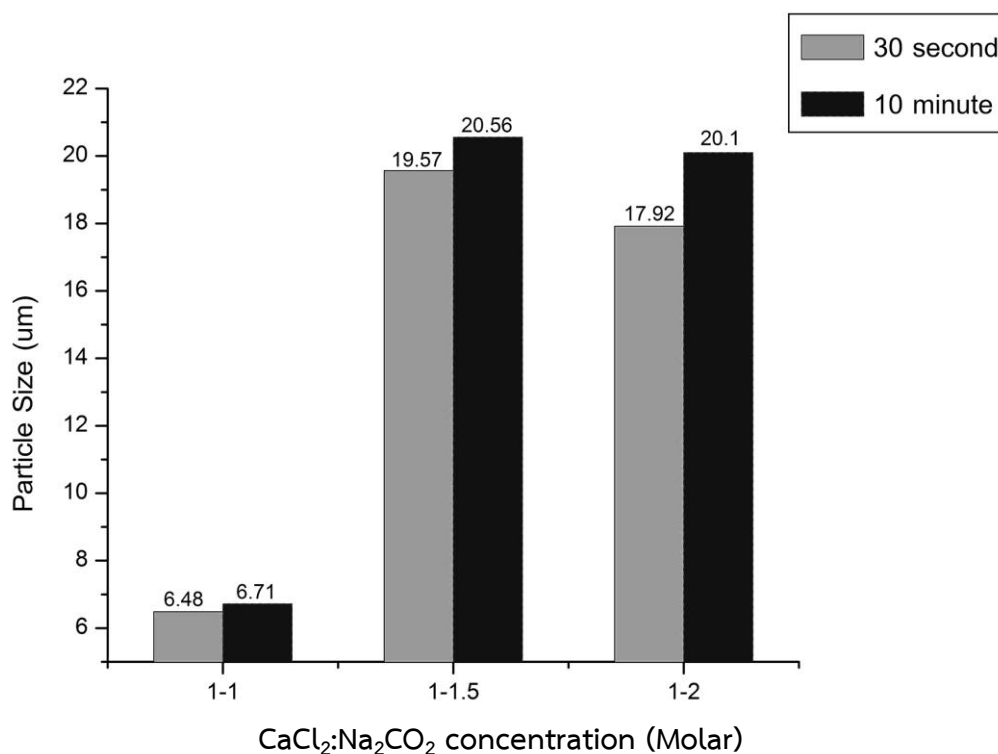
เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิดตกผลึกได้จากการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ ที่ได้ความเข้มข้นสูงสุด 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตรจากหัวข้อที่ 4.2 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย (1) ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ ส่งผลต่อขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกผลึกได้ (2) การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อหาระยะเวลาในการกวนผสมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนต และ (3) การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการกวนผสมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนต โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต โดยเริ่มจากใช้อัตราส่วนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ได้ความเข้มข้นสูงสุด 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตร ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ศึกษาเป็นอัตราส่วน 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2 เท่า ตามลำดับ ($1.74 : 1.74$, $1.74 : 2.61$ และ $1.74 : 3.48$ โดยโมลต่อโมล) พบว่าอัตราส่วนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ 1 : 1 เท่า กวนผสมที่ระยะเวลา 0.5 และ 10 นาที มีค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเล็กที่สุด

6.48±6.84 และ 6.718±5.28 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1 : 1.5 เท่า ส่งผลให้ได้ขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตใหญ่ขึ้น 19.57±11.37 และ 20.56±10.77 ไมโครเมตร ตามลำดับ และลดลงเล็กน้อย 17.92±9.87 และ 20.10±10.94 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่อัตราส่วนเป็น 1 : 2 เท่า จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตส่งผลให้ขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนเป็น 1 : 1 เท่าหรือ 1.74 : 1.74 โดยโมลต่อโมล ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมดุลโมลการทำปฏิกิริยาของสารระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมคาร์บอเนตแบบหนึ่งต่อหนึ่งโมล และแหล่งข้อมูล“Determination of Calcium Carbonate in Eggshells – Background” แสดงผลดังภาพประกอบที่ 31



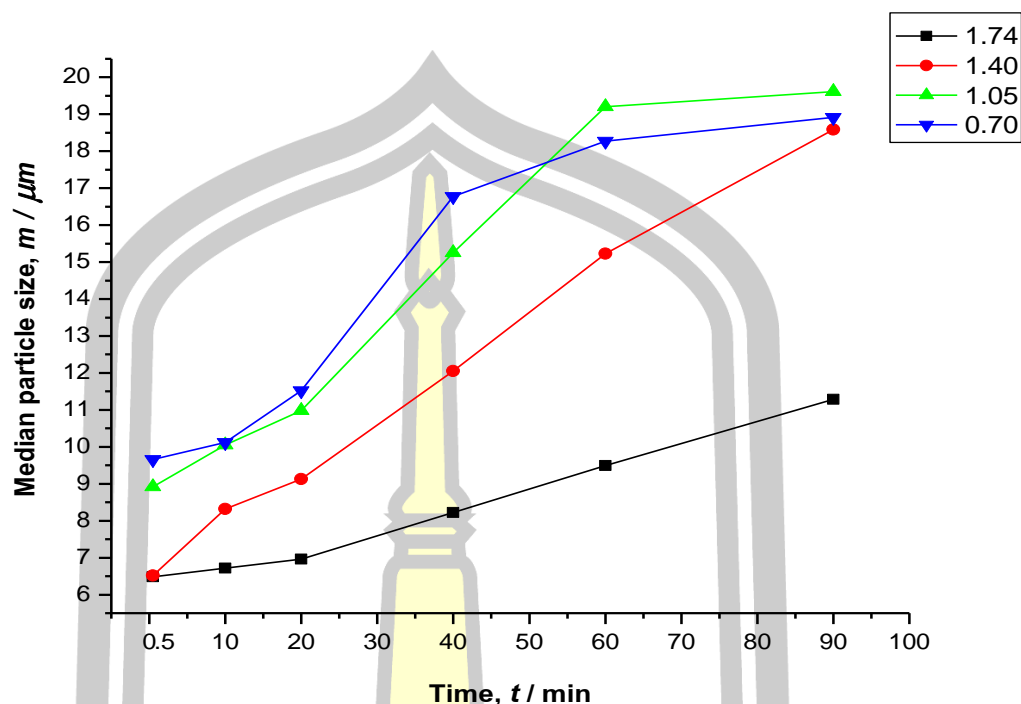
ภาพประกอบที่ 31 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ต่ออัตราส่วนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (โมลต่อลิตร)

ดังนั้นอัตราส่วนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตแบบ 1 : 1 เท่า ดีที่สุด ให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กที่สุด 6.48±6.84 ไมโครเมตร ใน

ขั้นตอนนี้จึงใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สกัดได้จากเปลือกไข่ เริ่มต้นที่ 1.74 โมลต่อลิตร โดยควบคุมระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 0.5 นาที ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง พบว่าค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่อยู่ที่ 6.48 ± 6.84 ไมโครเมตร เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ลง 1.40, 1.05 และ 0.70 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้มีแนวโน้มขนาดที่ใหญ่ขึ้นเป็น 6.516 ± 10.79 , 8.918 ± 9.12 และ 9.66 ± 9.74 ไมโครเมตร ตามลำดับ

เมื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นเป็น 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 6.718 ± 5.28 , 6.961 ± 7.29 , 8.223 ± 9.14 , 9.497 ± 9.51 และ 11.29 ± 7.29 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเริ่มต้นที่ 1.74 โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเฉลี่ยมัธยฐานที่สูงขึ้น และความเข้มข้นที่ 1.40, 1.05 และ 0.70 โมลต่อลิตร ตามลำดับ นั้นมีค่าเฉลี่ยมัธยฐานสูงชันเช่นกัน จะเห็นแนวโน้มได้ชัดเจนจากภาพประกอบที่ 32 เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์นั้นมีความเข้มข้นที่สูง อนุภาคของมวลสารจึงอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น เมื่อมีการทำปฏิกิริยากัน โอกาสที่อนุภาคของมวลสารทั้งสองจะชนกันสูงมากแล้วเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วแต่จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกันเท่านั้น ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนในระยะสั้นๆ ใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่ำส่งผลให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็ก (Boyjoo et al., 2014) และเมื่อลดความเข้มข้นลงหรือเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ทำให้อนุภาคของมวลสารมีความหนาแน่นน้อยลง อนุภาคของมวลสารมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้ทั่วถึงมากขึ้นมีระยะเวลาในการสัมผัสกันเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้คือ 1.74 โมลต่อลิตร โดยใช้ระยะเวลาการผสมในการตกตะกอน 0.5 นาที ส่งผลให้ได้ค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้ขนาดเล็กที่สุดคือ 6.48 ± 6.84 ไมโครเมตร

พูน ปณ ทิโต ชเว



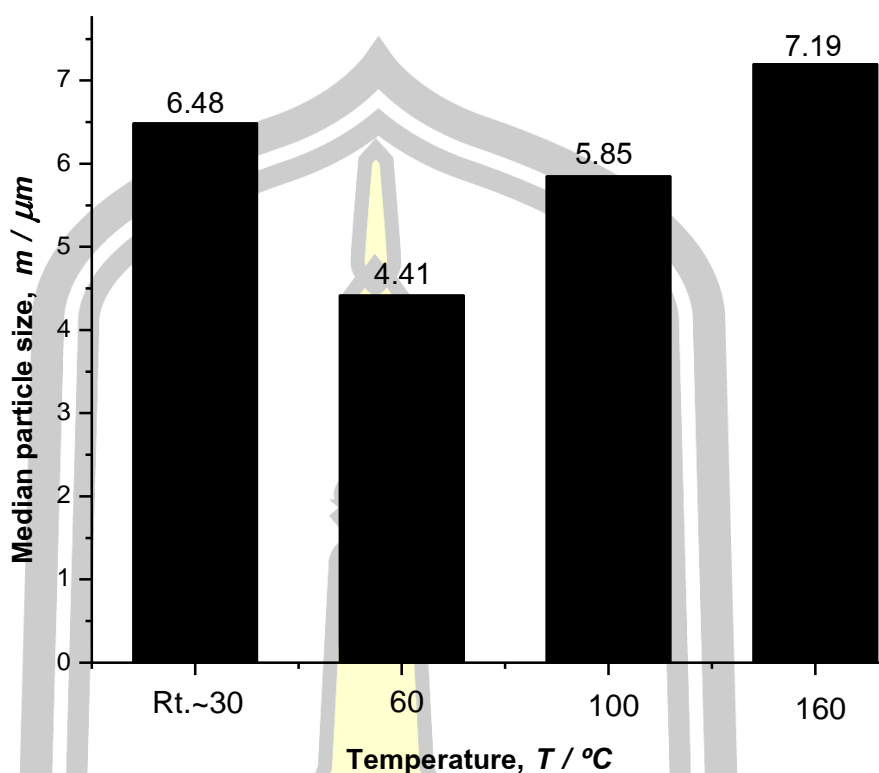
ภาพประกอบที่ 32 แสดงแนวโน้มค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อระยะเวลาในการกวนผสม ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตต่างๆ

ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกต่อระยะเวลาในการตกตะกอน ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตต่างๆ

เวลาที่ใช้ตกตะกอน (นาที)	ขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตต่อความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{CO}_3:\text{CaCl}_2$ (ไมโครเมตร)			
	1.74 โมลต่อลิตร	1.4 โมลต่อลิตร	1.05 โมลต่อลิตร	0.7 โมลต่อลิตร
0.5	6.486±6.844	6.516±10.79	8.918±9.12	9.66±9.74
10	6.718±5.28	8.316±±10.15	10.05±7.35	10.12±10.22
20	6.961±7.29	9.125±8.82	10.98±9.40	11.52±7.46
40	8.223±9.14	12.05±9.31	15.25±8.27	16.78±7.01
60	9.497±9.51	15.23±9.38	19.2±9.14	18.27±8.60
90	11.29±7.29	18.59±7.26	19.61±9.36	18.92±10.41

เมื่อได้สภาวะของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และระยะเวลาในการตกตะกอนที่เหมาะสม นำมาศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60, 100 และ 160 องศาเซลเซียส แล้วบ่มตะกอนต่อเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าการอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กถึงเป็น 4.41 ± 3.25 ไมโครเมตร และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็น 5.85 ± 6.67 และ 7.19 ± 4.95 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 33 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กถึง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมินั้นเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่อนุภาคของสารทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น จึงช่วยเพิ่มโอกาสในการชนกันของอนุภาคมากขึ้น และจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนในระยะสั้นๆ ใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่ำส่งผลให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กถึง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นกลับทำให้ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตใหญ่ขึ้นด้วย อาจเกิดจากการให้พลังงานจลน์ที่สูงมากส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารได้เร็วมากขึ้น เกิดปฏิกิริยาได้ไวขึ้นด้วย ทำให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอนเพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boyjoo et al., (2014) และ Li et al., (2010)

เมื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาค 11.2 ± 8.02 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ที่ 11.8 ± 8.56 ไมโครเมตร พบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยสภาวะอุณหภูมิห้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงการค้า 1.7 เท่า และขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยสภาวะอุณหภูมิสูงมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงการค้า 2.5 เท่า

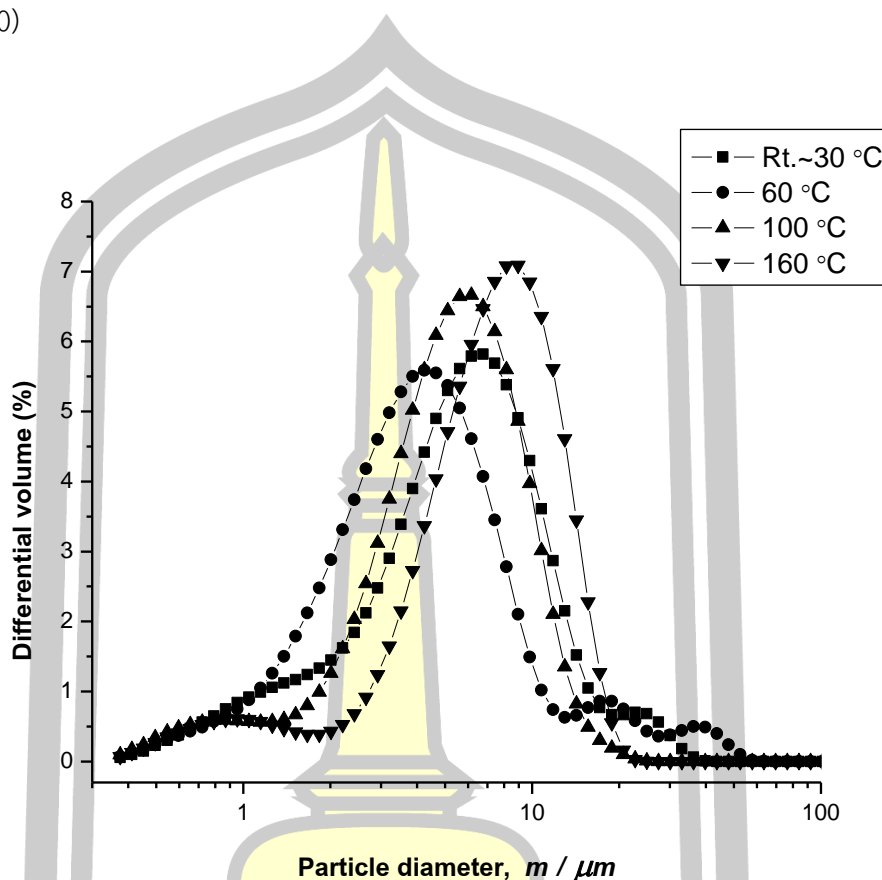


ภาพประกอบที่ 33 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สภาวะอุณหภูมิสูง

4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากภาพประกอบที่ 34 แสดงกราฟการกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กที่สุดที่สังเคราะห์ได้ ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด 6.486 ± 6.84 ไมโครเมตร ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วง 0.02 ถึง 43.67 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ย (Mean) ของขนาดอนุภาค 7.878 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 6.844 ไมโครเมตร การกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 1.784 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 6.486 ไมโครเมตร อยู่ที่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 14.44 ไมโครเมตร อยู่ที่ 90% (d90) และการกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ ที่สภาวะอุณหภูมิสูง 60 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด 4.41 ± 3.25 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วง 0.02 ถึง 57.77 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ย (Mean) ของขนาดอนุภาค 7.878 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 3.259 ไมโครเมตร การกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 1.683 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่

เกิน 4.403 ไมโครเมตร อยู่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 8.846 ไมโครเมตร อยู่ 90% (d90)



ภาพประกอบที่ 34 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สภาวะอุณหภูมิสูง

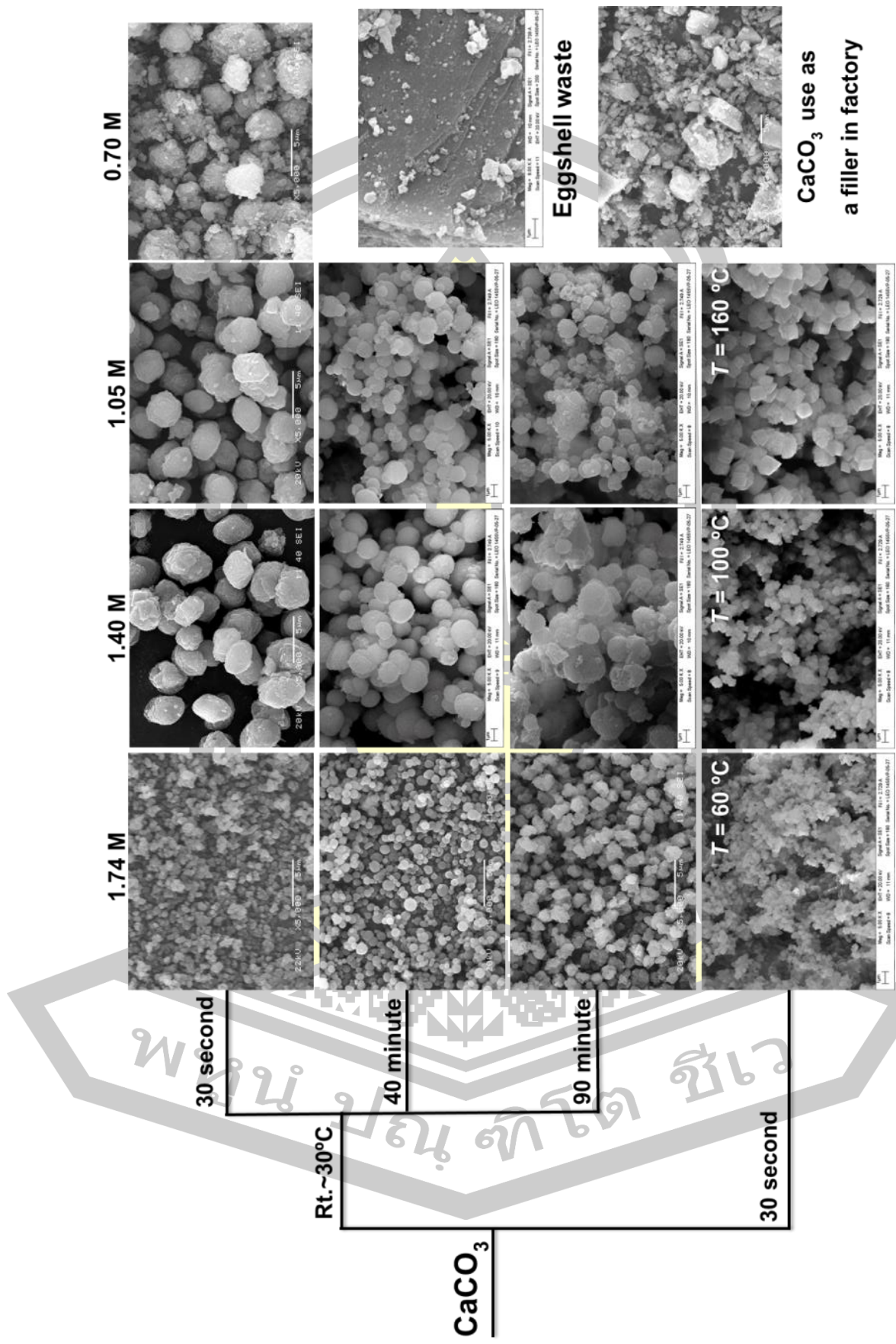
4.3.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการถ่ายภาพแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ดังภาพประกอบที่ 35 พบว่าลักษณะลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยสภาวะอุณหภูมิห้อง ที่ใช้ระยะเวลาจนผสมในการตกตะกอน 30 วินาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเริ่มต้น 1.74 โมลต่อลิตร มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยว ๆ ทรงกลม เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นลงในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะเห็นว่าลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยว ๆ รูปทรงกลม แต่ขนาดจะใหญ่ขึ้น ลักษณะพื้นผิวขรุขระไม่ราบเรียบ จะเห็นได้ชัดที่ความเข้มข้นต่ำ 0.7 โมลต่อลิตร เกิดการฟอร์มตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กเกาะกลุ่มรวมรั้วกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดต่ำลง ความหนาแน่นของอนุภาคมวลสารก็ลดลง ส่งผลให้เกิดการ

เคลื่อนที่สัมผัสกันมากขึ้น ปฏิกริยาเกิดเร็วขึ้นจนถึงจุดสมมูลของสารละลาย และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตกตะกอนขึ้นนานขึ้น ส่งผลให้ตะกอนขนาดเล็กเกิดการฟอร์มตัวและเกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยสภาวะอุณหภูมิสูง 60, 100 และ 160 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเริ่มต้น 1.74 โมลต่อลิตร และระยะเวลาการผสมในการตกตะกอน 30 วินาที มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยวๆ จากทรงกลมแล้วเริ่มเปลี่ยนเป็นรูปทรงลูกบาศก์มากขึ้น และมีรูปร่างจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งจะเห็นรูปทรงได้ชัดเจนมากขึ้น ลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากสภาวะของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกริยาเกิดเร็วขึ้น และมีพลังงานมากพอที่จะทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้น เกิดการฟอร์มตัวกันให้มีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์



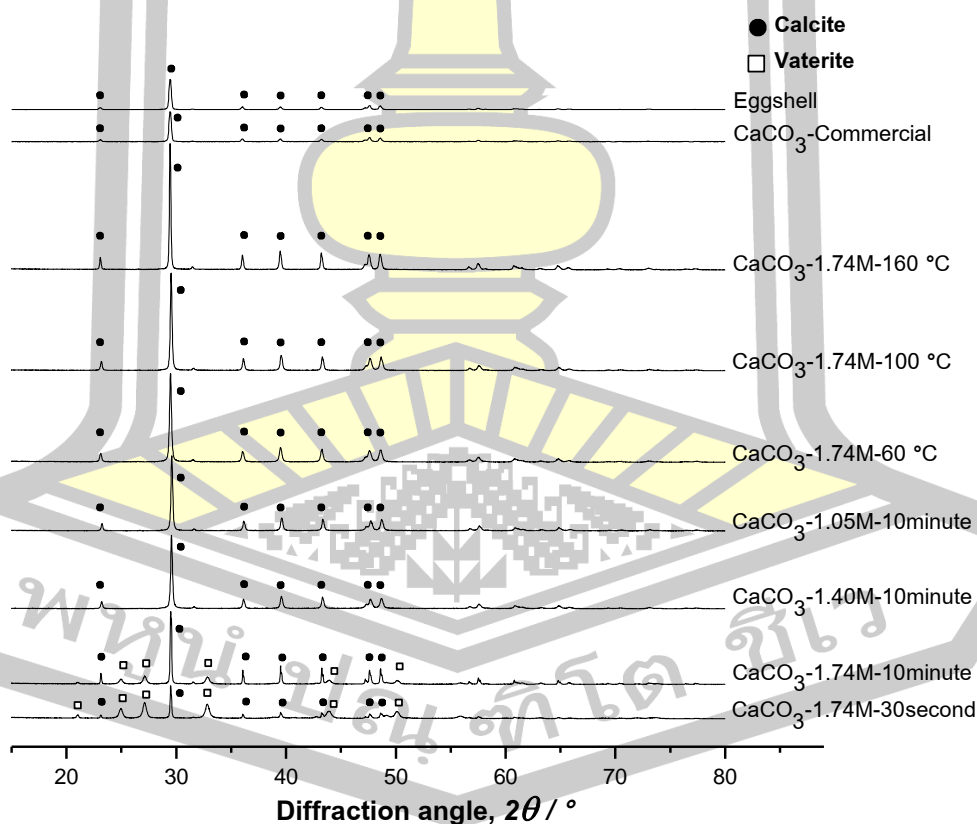


ภาพประกอบที่ 35 ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของแคลเซียม

4.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้วิธีการวัดค่าความเข้มของรังสี ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X ray Diffraction : XRD) จากภาพประกอบที่ 36 จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดเป็นผลึกของของแคลเซียมคาร์บอเนตประเภทผลึกแคลไซต์ (Calcite) แต่จะพบโครงสร้างผลึกที่เป็นประเภทวาเทอร์ไรต์ (Vaterite) อยู่ที่ความเข้มข้นสูง 1.74 โมลต่อลิตร ที่ระยะเวลา 30 วินาที เมื่อเพิ่มระยะเวลาการกวนผสมนานขึ้นผลึกวาเทอร์ไรต์ (Vaterite) จะลดลงและหายไป เนื่องจากผลึกวาเทอร์ไรต์มีความเสถียรไม่สูงมาก จึงสามารถเปลี่ยนรูปผลึกไปเป็นผลึกแคลไซต์ได้ ซึ่งผลึกแคลไซต์จะมีความเสถียรในธรรมชาติที่สูงกว่า พร้อมทั้งนี้การลดความเข้มข้นของสารตั้งต้นลงก็พบเฉพาะผลึกแคลไซต์ รวมไปถึงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนในสภาวะอุณหภูมิสูงด้วยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yash Boyjoo *et al.* (2014)



ภาพประกอบที่ 36 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 10 เลขที่คลื่นรังสีการสะท้อนโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต

Sample	Compound	2θ							
JCPDS data	CaCO ₃	29.4°	39.4°	43.2°	47.4°	48.5°			
Eggshell	CaCO ₃	23.0°	29.4°	36.0°	39.4°	43.2°	47.6°	48.6°	
commercial	CaCO ₃	23.0°	29.4	36.0°	39.4°	43.2°	47.6°	48.6°	
1.74M-30sec	CaCO ₃	21.0°	23.1°	24.9°	27.0°	29.4°	32.8°	36.0°	39.4°
		43.2°	47.6°	48.6°	50.1°				
1.74M-10min	CaCO ₃	21.0°	23.1°	24.9°	27.1°	29.4°	32.8°	36.0°	39.5°
		43.2°	47.6°	48.6°	50.1°				
1.40M-10min	CaCO ₃	23.2°	29.5°	36.1°	39.5°	43.3°	47.6°	48.6°	
1.05M-10min	CaCO ₃	23.2°	29.6°	36.1°	39.6°	43.3°	47.7°	48.6°	
1.74M-30sec-60°C	CaCO ₃	23.1°	29.4°	36.0°	39.4°	43.2°	47.5°	48.5°	
1.74M-30sec-100°C	CaCO ₃	23.1°	29.5°	36.1°	39.5°	43.3°	47.6°	48.6°	
1.74M-30sec-160°C	CaCO ₃	23.0°	29.4°	36.0°	39.4°	43.2°	47.5°	48.5°	

4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลการศึกษารังสีเอกซ์ของสารประกอบออกไซด์ของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry : XRF) พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 96.5 และเมื่อเพิ่มสภาวะของอุณหภูมิสูง 60 องศาเซลเซียส ของกระบวนการตกตะกอนมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 97 ซึ่งสามารถกำจัดสารที่เป็นอินทรีย์สารออกได้หมด ละยังมีใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำไปใช้งานเป็นสารแต่งเติมดังตารางที่ 11 ส่วนปริมาณโซเดียมออกไซด์ที่เหลือมากในตัวอย่างเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำไปใช้งานเป็นสารแต่งเติม เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นแหล่งที่ให้คาร์บอเนตแก่แคลเซียม จึงมักจะหลงเหลืออยู่ในตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ การใช้สารตั้งต้นชนิดอื่นก็จะสามารถลดปริมาณสารโซเดียมออกไซด์ที่เหลืออยู่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carter GW et al. (1982) และ อุบลลักษณ์และปริญญา (2552)

ตารางที่ 11 องค์ประกอบออกไซด์ของแคลเซียมคาร์บอเนต

Example	CaCO ₃ -Eggshell	CaCO ₃ (1.74M-30sec)	CaCO ₃ (1.74M-30sec-60°C)	CaCO ₃ -filler
CaO	68.2	96.5	97	98.7
MgO	0.459	0.897	0.883	0.665
P ₂ O ₅	0.396	0.216	0.15	0.0189
Na ₂ O	0.103	2.02	1.68	-
SO ₃	0.105	0.0333	0.0359	0.016
K ₂ O	0.0622	0.0127	-	0.0162
SrO	0.0339	0.0496	0.048	0.0626
SiO ₂	0.0382	0.116	0.0495	0.239
Fe ₂ O ₃	0.057	0.0235	0.0279	0.0908
CuO	0.00667	0.00952	0.0114	0.0119
ZrO ₂	-	0.00244	0.00189	0.00367
ZnO	-	0.0125	0.00894	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.102
MnO	-	-	-	0.0176
Compton	0.59	-	-	0.68

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

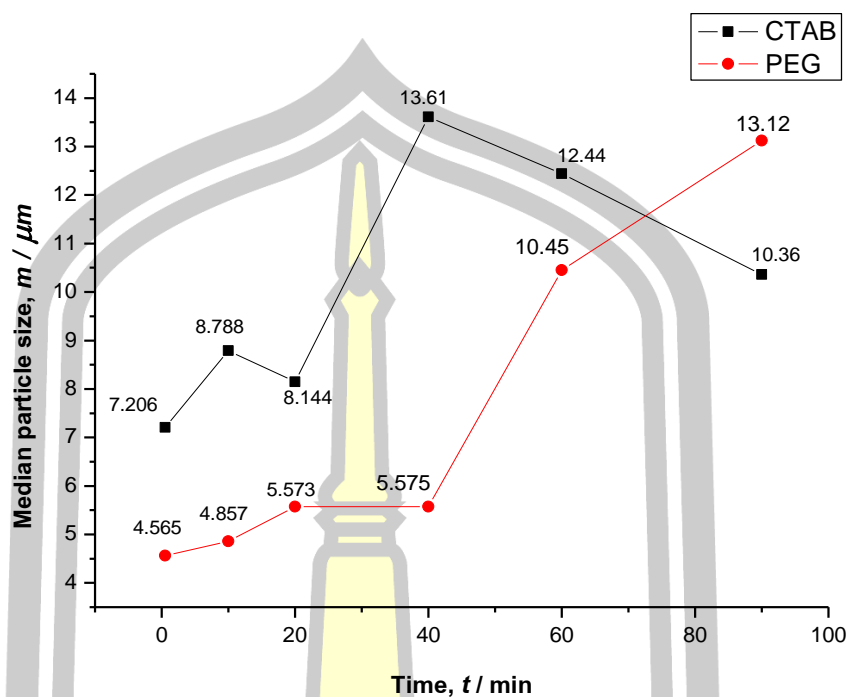
4.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.4.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการใช้ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) เป็นสารลดแรงตึงผิว ประเภทแคตไอออนิก (Cationic surfactant) เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารตัวอื่นๆ ในประเภทเดียวกัน และต้นทุนในการสังเคราะห์ จึงเลือกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งรวมในกระบวนการตกตะกอน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนตามระยะเวลาในการกวนผสมที่ 0.5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิห้องมีขนาดอนุภาค 7.206 ± 44.17 , 8.788 ± 5.98 , 8.144 ± 7.997 , 13.61 ± 58.640 , 12.44 ± 10.07 และ 10.36 ± 8.315

ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 37 จะเห็นได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดคือ 7.206 ± 44.17 ไมโครเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการกวนผสมสั้นที่สุด 0.5 นาที หรือ 30 วินาที เมื่อใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นมีแนวโน้มว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่ขึ้น 13.61 ± 58.640 ไมโครเมตร ที่ระยะเวลา 40 นาที และเมื่อเพิ่มระยะเวลานานขึ้นอีกขนาดอนุภาคกลับมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากระยะเวลาการกวนผสมที่นานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นตะกอนเกิดการรวมตัวกันได้มากขึ้น ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดอนุภาคกลับมาเล็กลงอีกในนาทีที่ 60 และที่ 90 นาที ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการกวนผสมที่นานและยังเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องภายในระบบจนถึงจุดสมดุลของปฏิกิริยา สารลดแรงตึงผิวกลับเข้ามาทำปฏิกิริยาอีกครั้งทำให้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการแยกตัวกันก็ได้ ทั้งนี้การใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB ที่เป็นประเภของแคทไอออนิกเข้ามาช่วยในกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตกลับทำให้ขนาดอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าการไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB จาก 6.486 ± 6.844 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 7.206 ± 44.17 ไมโครเมตร

ในทำนองเดียวกันเปลี่ยนสารลดแรงตึงผิวเป็นประเภทไม่มีประจุ (Nonionic surfaction) โดยใช้ PEG (Polyethyleneglycol) เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารตัวอื่นๆในประเภทเดียวกัน และต้นทุนในการสังเคราะห์ พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนตามระยะเวลาในการกวนผสมที่ 0.5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิห้องมีขนาดอนุภาค 4.565 ± 3.188 , 4.857 ± 3.364 , 5.673 ± 5.727 , 5.575 ± 5.634 , 10.45 ± 7.514 และ 13.12 ± 7.656 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดคือ $4.565 \pm$ ไมโครเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการกวนผสมสั้นที่สุด 30 วินาที และเมื่อใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นมีแนวโน้มว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน แต่จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้สาร PEG มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้สาร CTAB เนื่องจาก PEG เป็นสารประเภทที่ไม่มีประจุการอาจเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าสาร CTAB ที่เป็นสารประเภที่มีประจุเป็นบวก และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้สารลดแรงตึงผิว PEG มาช่วยในกระบวนการตกตะกอนยังทำให้ขนาดอนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กกว่าการไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว จาก 6.486 ± 6.844 ไมโครเมตร ให้เหลือขนาดแค่ 4.565 ± 3.188 ไมโครเมตร

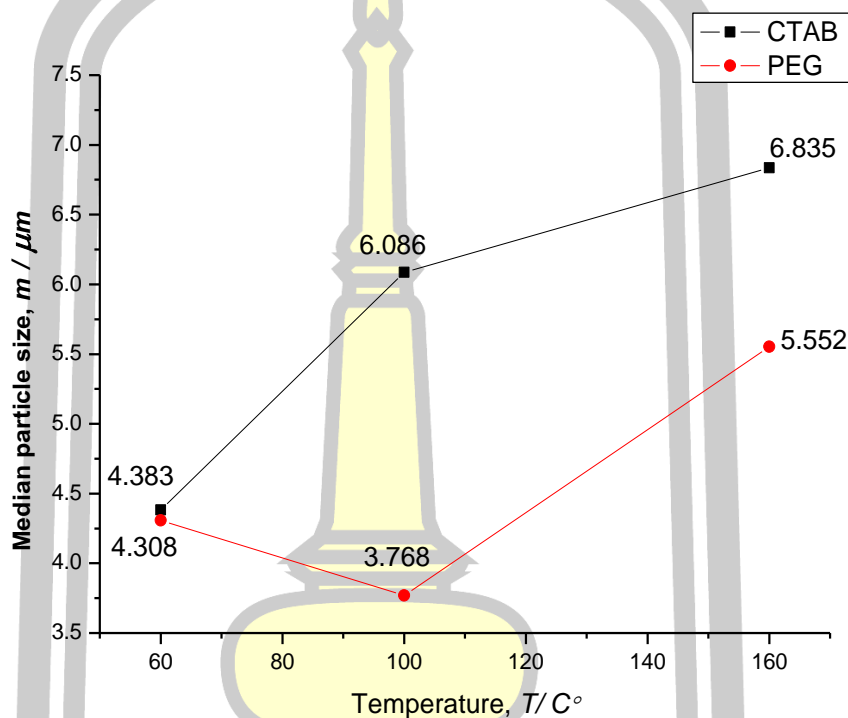


ภาพประกอบที่ 37 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง

เมื่อทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น 60, 100 และ 160 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 30 วินาที และบ่มต่อเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังภาพประกอบที่ 38 การใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB พบว่าขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้เป็น 4.383 ± 4.261 , 6.086 ± 5.977 และ 6.835 ± 6.75 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด และมีขนาดเล็กกว่าการทำปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง แล้วขนาดก็ใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากสภาวะของอุณหภูมินั้นมีผลต่อการทำปฏิกิริยาเคมีการเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นส่งผลให้ขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็ก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 100 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กลับทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น อาจเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเคมีมีพลังงานจลน์ในระบบมากขึ้นเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคเดี่ยวมารวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Akarat Akgsornpeak *et al.* (2014) และ Yash Boyjoo *et al.* (2014)

ในทำนองเดียวกันเปลี่ยนสารลดแรงตึงผิว PEG พบว่าขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้เป็น 4.308 ± 5.971 , 3.768 ± 5.720 และ 5.552 ± 7.403 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กที่สุดคือที่ใช้สภาวะอุณหภูมิ 60 องศา

เซลเซียส มีขนาดเล็กที่สุดที่ 3.768 ± 5.720 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มขึ้น เป็น 5.552 ± 7.403 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากเป็นสภาวะของ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่จะส่งผลให้ได้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดเล็กที่สุด สำหรับการใส่สาร PEG เป็นตัวช่วย

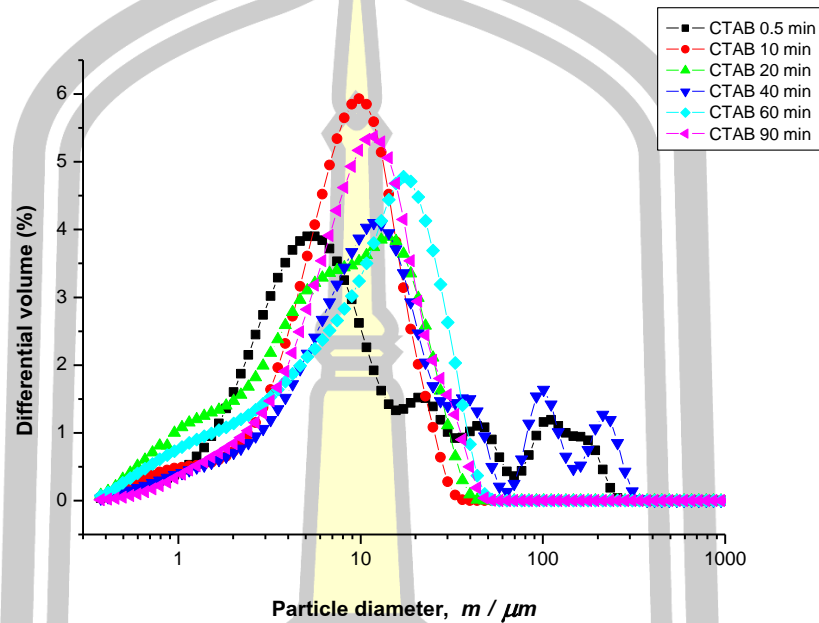


ภาพประกอบที่ 38 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่งต่อสภาวะ อุณหภูมิสูง

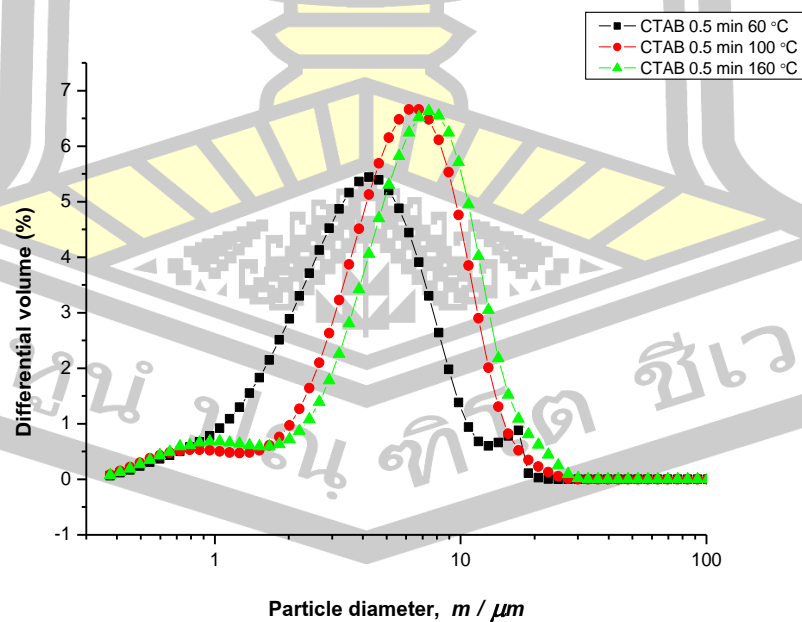
4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

การกระจายตัวของอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการตกตะกอนโดยมี CTAB เป็นสารเติมแต่ง พบว่าขนาดเล็กที่สุดใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 วินาที มีค่าเฉลี่ย มัธยฐานของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เฉลี่ย 7.206 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 44.17 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาด อนุภาคที่ไม่เกิน 2.235 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 7.206 ไมโครเมตร อยู่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 89.473 ไมโครเมตร อยู่ 90% (d90) และเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิขนาดเล็กที่สุดใช้อุณหภูมิต่ำที่ 60 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคส่วน ใหญ่เฉลี่ย 4.417 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 3.259 ไมโครเมตร มี

การกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 1.683 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 4.417 ไมโครเมตร อยู่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 8.846 ไมโครเมตร อยู่ 90% (d90) ดังภาพประกอบที่ 39 และ 40

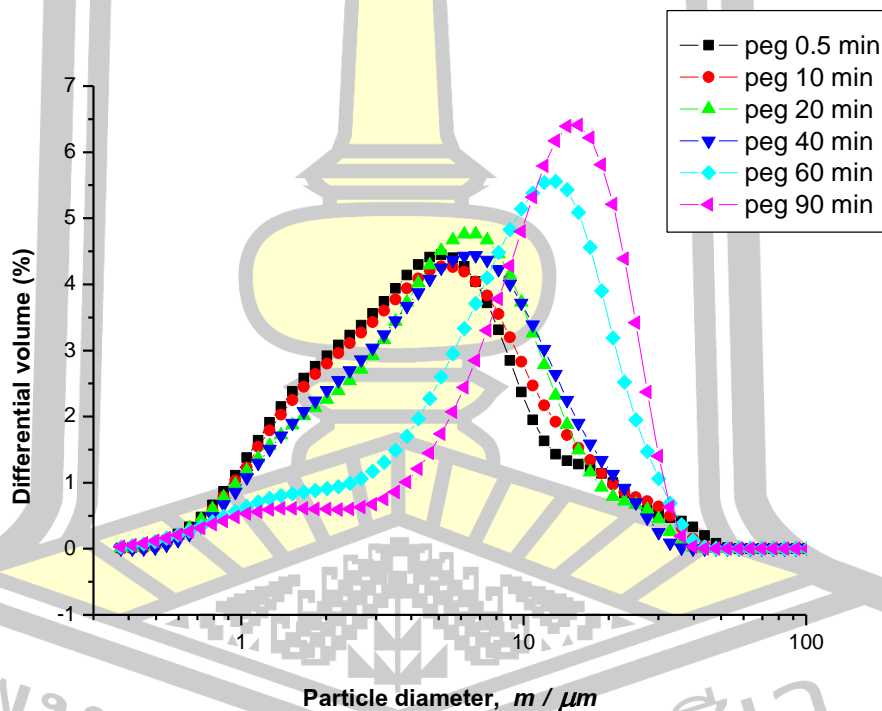


ภาพประกอบที่ 39 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง

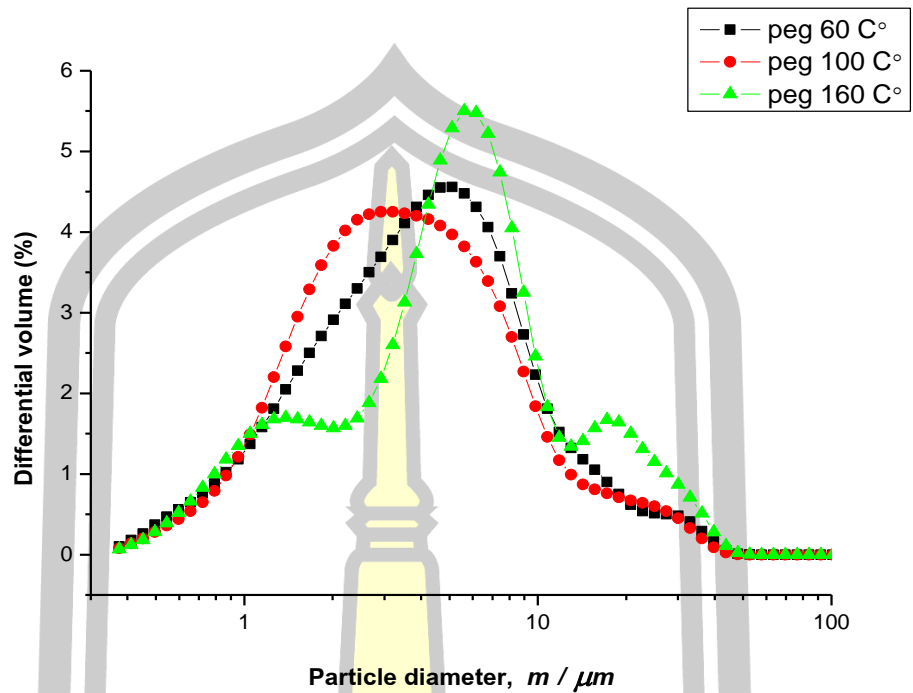


ภาพประกอบที่ 40 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อ

การกระจายตัวของอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการตกตะกอนโดยมี PEG เป็นสารเติมแต่ง พบว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 วินาที มีค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เฉลี่ย 4.565 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 1.455 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 2.235 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 4.565 ไมโครเมตร อยู่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 14.380 ไมโครเมตร อยู่ 90% (d90) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขนาดที่เล็กที่สุดใช้อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยมัธยฐานของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เฉลี่ย 3.768 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุภาค (S.D.) เท่ากับ 5.720 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของอนุภาคแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 5.720 ไมโครเมตร อยู่ที่ 10% (d10) กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 3.768 ไมโครเมตร อยู่ 50% (d50) และกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 11.010 ไมโครเมตร อยู่ 90% (d90) ดังภาพประกอบที่ 41 และ 42



ภาพประกอบที่ 41 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งที่ระยะเวลาต่างๆ

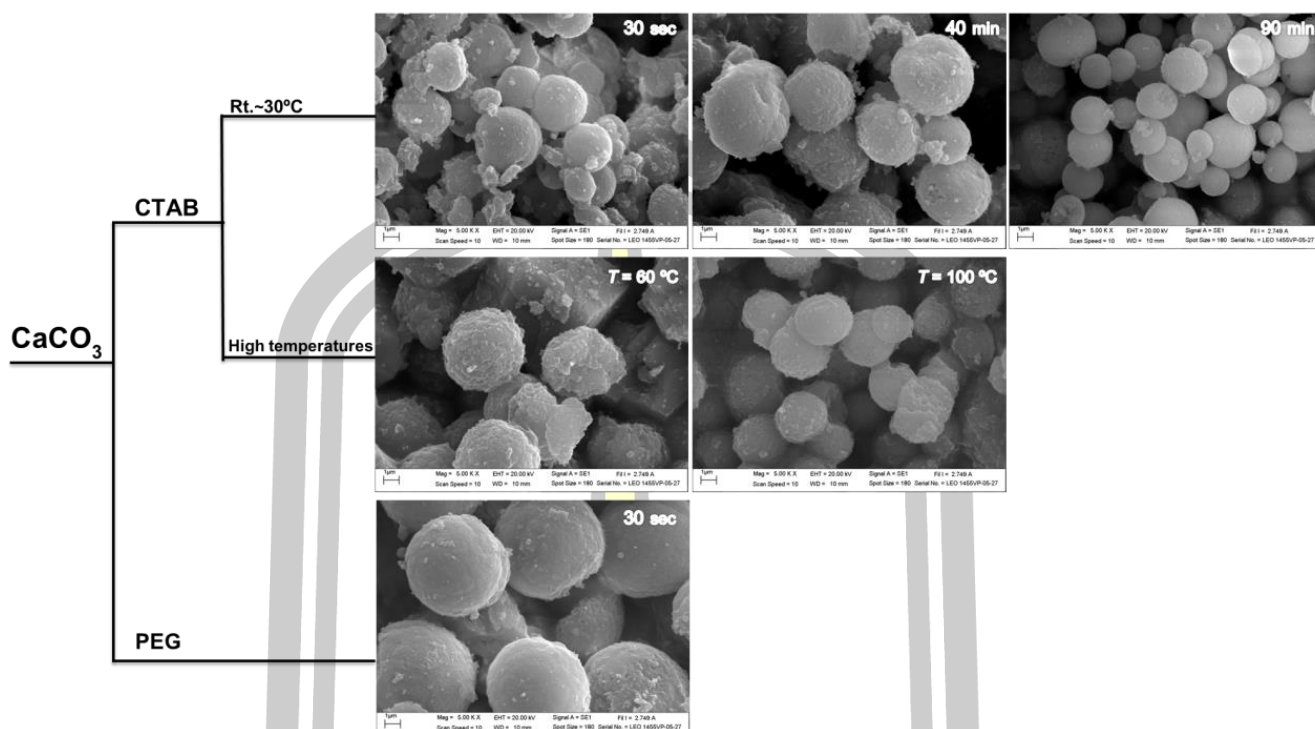


ภาพประกอบที่ 42 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดทกผลึกที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งที่อุณหภูมิสูง

4.4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ทั้ง CTAB และ PEG มีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังภาพประกอบที่ 43 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นลักษณะสัณฐานวิทยายังมีรูปร่างเป็นทรงกลม แต่มีลักษณะของผิวที่ขรุขระมากขึ้น คล้ายการซ้อนทับกันของผลึกขนาดเล็กแล้วก่อตัวกันเป็นก้อนทรงกลม

พหุบัน ปณฺ ทิโต ชิว



ภาพประกอบที่ 43 ลักษณะสัณฐานของโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตจากอิทธิพลของสารเติมแต่ง

4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์

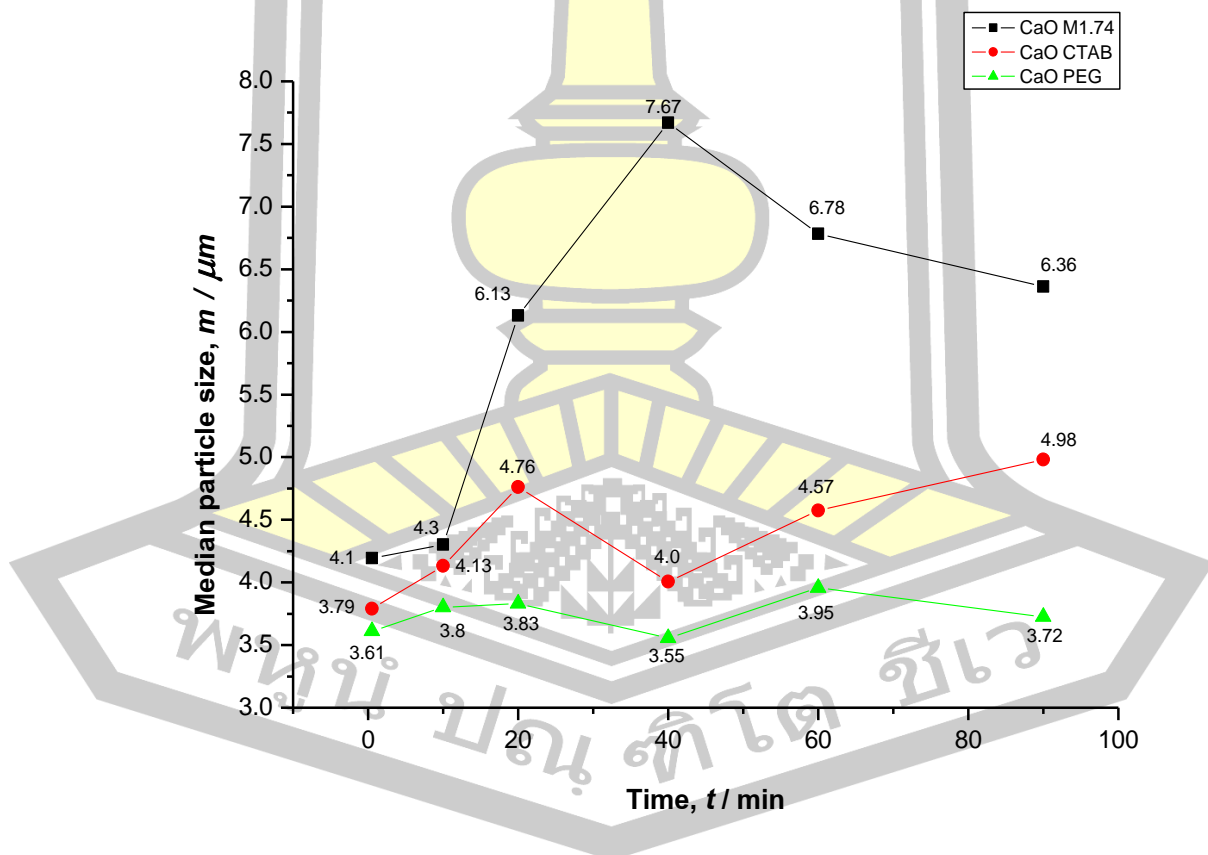
4.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์

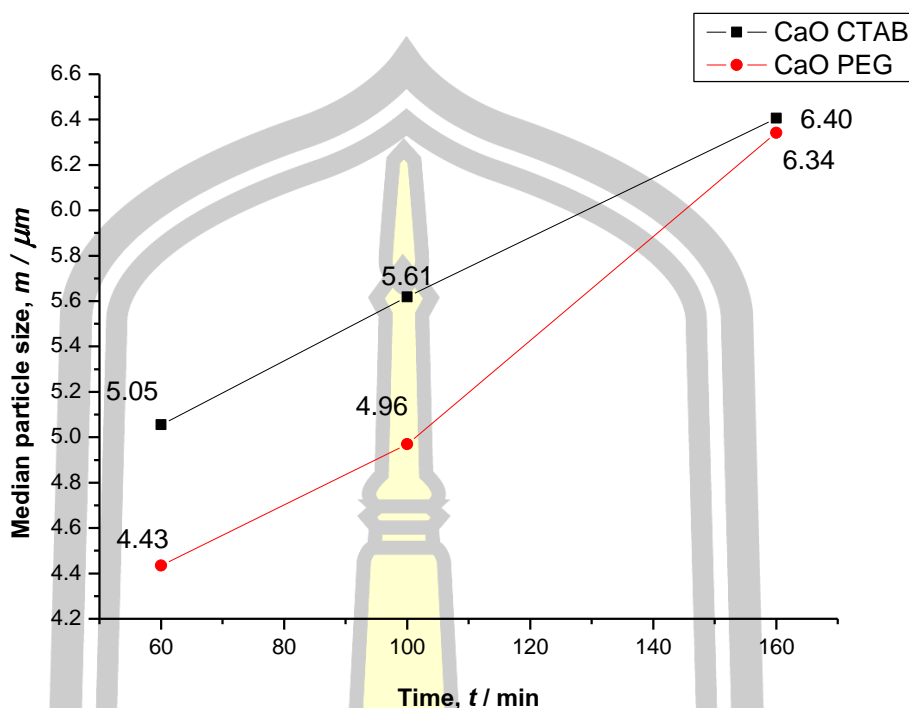
แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ทั้งที่ไม่มีสารเติมแต่งและมีสารเติมแต่งเป็นตัวช่วยในการตกตะกอนเป็น CTAB และ PEG นำไปเผาที่อุณหภูมิสูง 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงผลิตภัณฑ์จะเป็นแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งนำมาวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคจากภาพประกอบที่ 15 พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่ได้นั้นมีขนาดเล็กลง ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ระยะเวลาในการกวนผสม 0.5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ให้ขนาดแคลเซียมออกไซด์ 4.1 ± 7.17 , 4.3 ± 6.98 , 6.13 ± 8.41 , 7.67 ± 8.75 , 6.78 ± 7.61 และ 6.36 ± 7.76 ไมโครเมตร จะเห็นว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้เวลาในการกวนผสมน้อยที่สุด และมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ 40 นาทีแล้วขนาดเริ่มเล็กลง ส่วนการใช้สารเติมแต่ง CTAB พบว่าขนาดแคลเซียมออกไซด์ 3.79 ± 3.24 , 4.13 ± 4.87 , 4.76 ± 8.14 , 4.0 ± 5.57 , 4.57 ± 3.64 และ 4.98 ± 4.05 ไมโครเมตร จะเห็นว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้เวลาในการกวนผสมน้อยที่สุด และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและลดลงที่ระยะเวลา 40 นาทีแล้วเริ่มเพิ่มขึ้นของขนาดอีกครั้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Akarat Aksompeak et al. (2014) รวมถึงการใช้สารเติมแต่ง PEG ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากพบว่าขนาดแคลเซียมออกไซด์

3.61±2.74, 3.8±3.48, 3.83±4.66, 3.55±6.55, 3.95±5.36 และ 3.72±5.14 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้เวลาในการกวนผสมน้อยที่สุด และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและลดลงที่ระยะเวลา 40 นาที แล้วเริ่มเพิ่มขึ้นของขนาดอีกครั้งเหมือนกับ CTAB แต่ขนาดของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้มีขนาดเล็กกว่า

เมื่อนำไปศึกษาสถานะของอนุภาคนิวเคลียสที่อุณหภูมิสูงขึ้น 60 100 และ 160 องศาเซลเซียสพบว่าการใช้สารเติมแต่ง CTAB มีขนาดแคลเซียมออกไซด์ 5.05±3.71, 5.61±4.73 และ 6.40±4.84 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้เวลาในการกวนผสมน้อยแต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าสถานะอนุภาคนิวเคลียส และการใช้สารเติมแต่ง PEG มีขนาดแคลเซียมออกไซด์ 4.43±4.76, 4.96±3.98 และ 6.34±5.66 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าขนาดที่เล็กที่สุดใช้เวลาในการกวนผสมน้อยเช่นกัน Akarat Akgornpeak et al. (2014) เนื่องจากเกิดการสลายตัวของโครงสร้างแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ การแคลไซน์แคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิสูงจึงมีผลต่ออนุภาคขนาดของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ดังภาพประกอบที่ 44



ภาพประกอบที่ 44 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์จากอิทธิพลของสารเติมแต่งที่ระยะเวลาต่างๆ

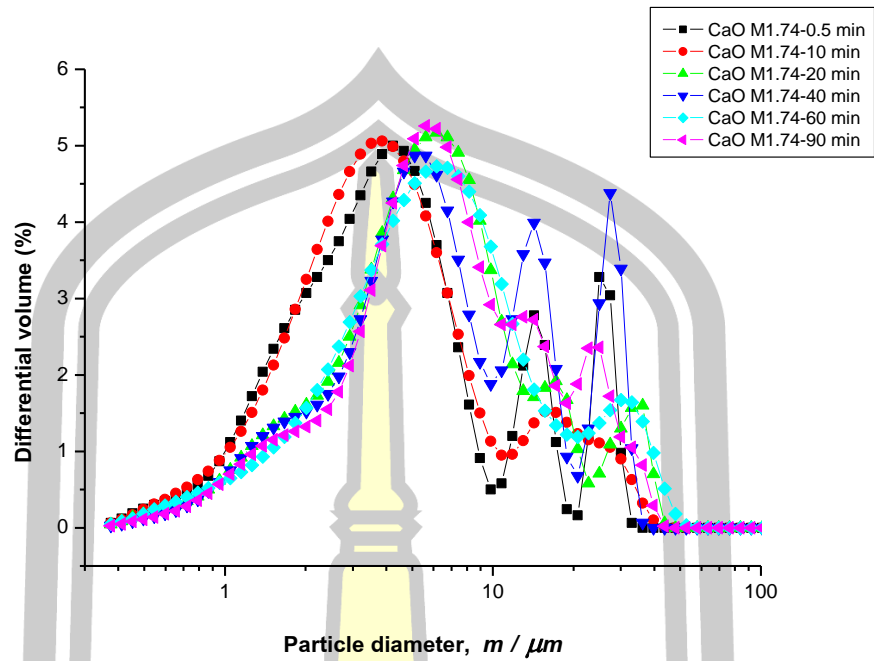


ภาพประกอบที่ 45 ขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์ต่อสภาวะอุณหภูมิสูง

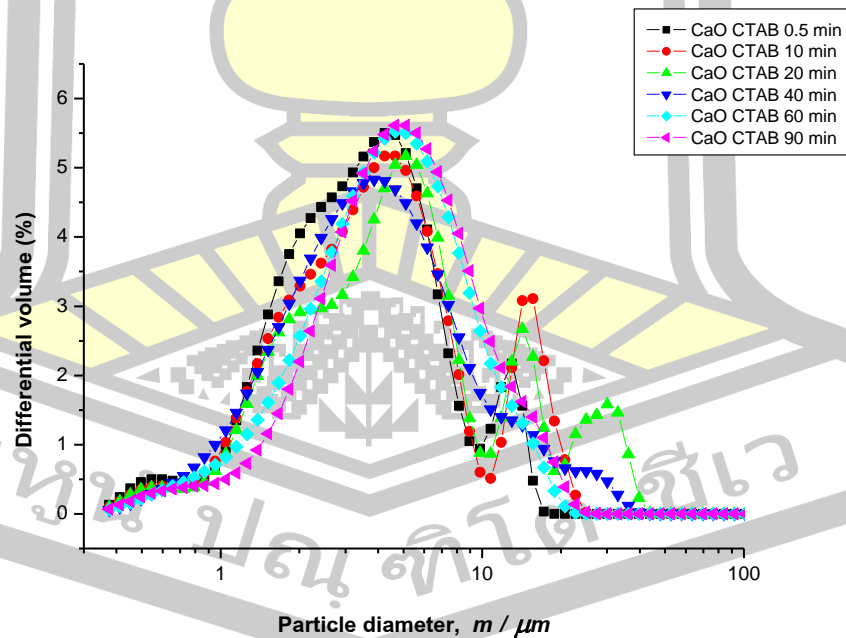
4.5.1.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมออกไซด์

การกระจายตัวของอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการตกตะกอนโดยไม่มีสารเติมแต่ง พบว่ามีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.02-40 ไมโครเมตร จากภาพประกอบที่ 46 จะเห็นว่าการใช้ระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลให้ขนาดมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ แต่ขนาดที่ใหญ่ที่สุดก็ไม่เกิน 40 ไมโครเมตร และกรณีที่ใช้สารเติมแต่งทั้ง CTAB และ PEG พบว่ามีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.02-40 ไมโครเมตร และ 0.02-30 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากภาพประกอบที่ 47 และ 48 จะเห็นว่า การใช้ CTAB และ PEG ส่งผลให้ขนาดมีการกระจายตัวของอนุภาคไม่หลายช่วงการกระจาย ทำให้ขนาดที่ได้มีขนาดเล็ก แต่ขนาดที่ใหญ่ที่สุดก็ไม่เกิน 40 ไมโครเมตร

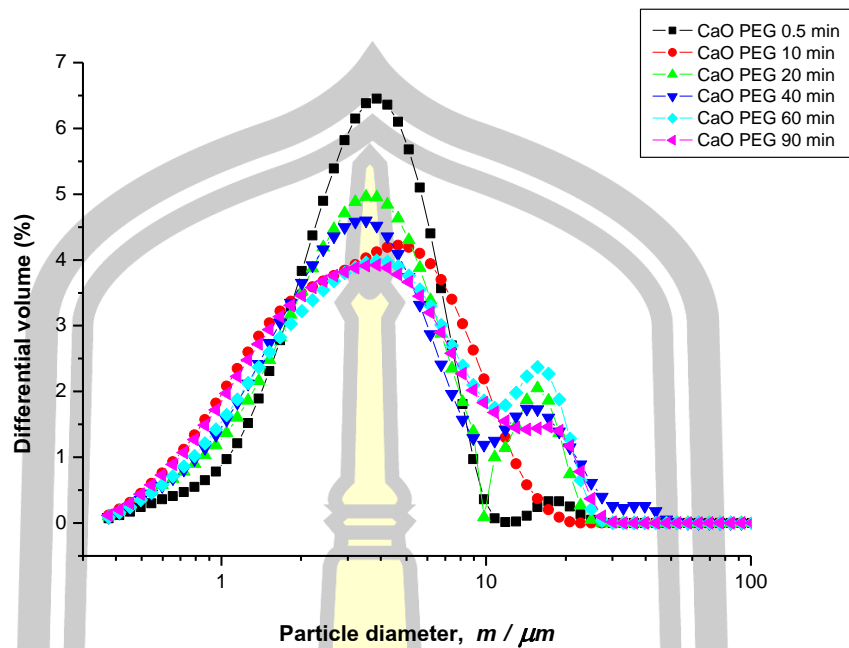
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขนาดที่เล็กที่สุดใช้อุณหภูมิสูง กรณีที่ใช้สารเติมแต่งทั้ง CTAB และ PEG พบว่ามีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.02-20 ไมโครเมตร จากภาพประกอบที่ 49 และ 50 จะเห็นว่า การใช้ CTAB และ PEG ส่งผลให้ขนาดมีการกระจายตัวของอนุภาคอยู่ในช่วงเดียว เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลให้ขนาดอนุภาคมีขนาดที่สม่ำเสมอ



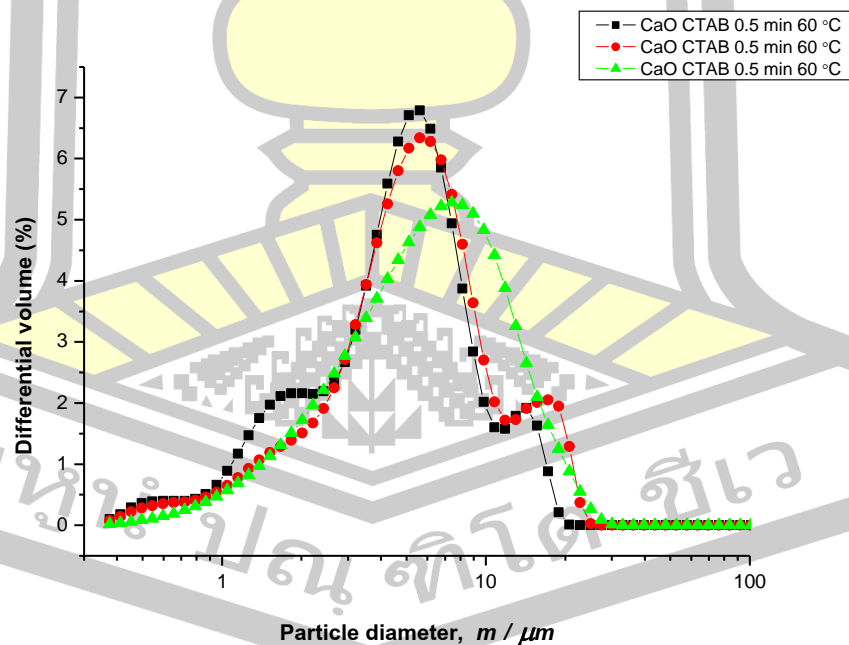
ภาพประกอบที่ 46 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ต่อระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง



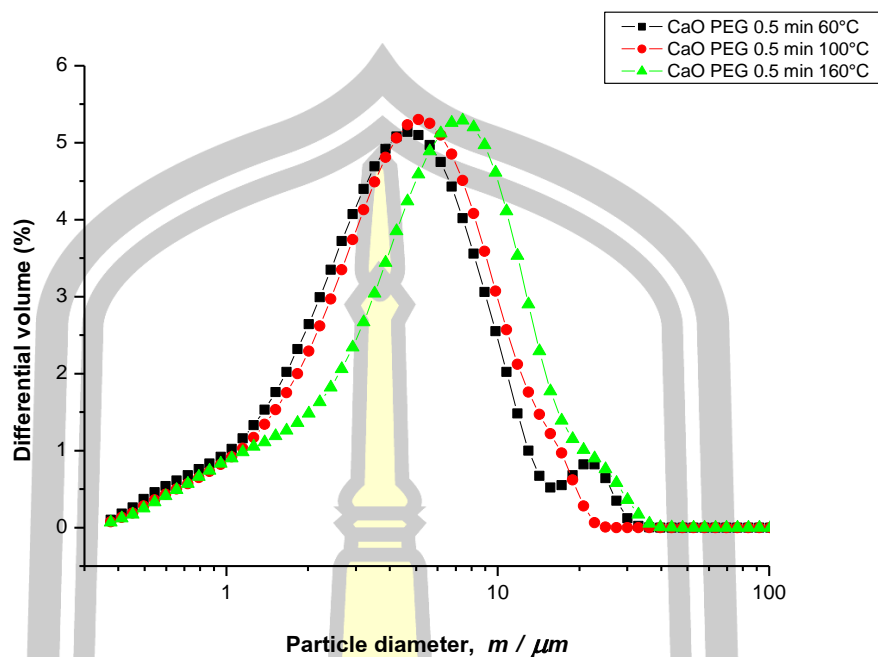
ภาพประกอบที่ 47 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อ ระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบที่ 48 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งต่อ
ระยะเวลาในการกวนผสม ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบที่ 49 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ CTAB เป็นสารเติมแต่งต่อ
สภาวะอุณหภูมิสูง



ภาพประกอบที่ 50 การกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ PEG เป็นสารเติมแต่งต่อ
สภาวะอุณหภูมิสูง

บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่อุตสาหกรรมเหลือทิ้ง โรงฟักบริษัท ซีพีเอฟ โชนชัย จำกัด ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางธรรมชาติที่มีสารอื่นเจือปนได้ ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความร้อนและอุณหภูมิสูง รวมถึงไม่มีน้ำมันเจือปนในน้ำเสียซึ่งยากต่อการบำบัด โดยการนำเปลือกไข่มาผ่านกระบวนการทำความสะอาดและการเตรียมเปลือกไข่ให้เป็นเปลือกไข่ผง เปลือกไข่ผงที่ได้ทำให้อยู่ในรูปของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โดยการทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วทำการหาความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จากนั้นนำไปศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนต จะได้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ชนิดตกผลึก และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่อุตสาหกรรม จะได้อัตราส่วนความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนต และระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วนำมาศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่อุตสาหกรรม และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากการแคลไซน์ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกไปการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่

การศึกษานี้เพื่อวัดความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อปริมาณความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ได้ การใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อผงเปลือกไข่ 10 กรัม โดยใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 90 นาที ทำให้ได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูงสุดที่ 1.74 ± 0.13 โมลต่อลิตร

5.1.2 การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เวลา และ อุณหภูมิในขบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต

การศึกษานี้เพื่อวัดผลของความเข้มข้นโซเดียมคาร์บอเนตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้คือ 1.74 โมลต่อลิตรต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูงสุด 1.74 ± 0.137 โมลต่อลิตรที่ได้จากการสกัดจากเปลือกไข่ ใช้ระยะเวลาการกวนผสมในการตกตะกอน 30 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง ได้ค่าเฉลี่ยมาตรฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาดเล็กที่สุดคือ 6.48 ± 6.84 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.02 – 43.67 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้ค่าเฉลี่ยมาตรฐานของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาดเล็กที่สุดคือ 4.41 ± 3.25 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.02 – 57.77 ไมโครเมตร มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยว ๆ ทรงกลม ที่อุณหภูมิห้อง แต่ลักษณะสัณฐานวิทยาจะเป็นเปลี่ยนเป็นก้อนอนุภาคเดี่ยว ๆ ทรงลูกบาศก์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น โครงสร้างผลึกเป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตประเภทแคลไซต์ (Calcite) และ วาเทอร์ไรต์ (Vaterite) แต่ผลึกวาเทอร์ไรต์จะหายไปเมื่อใช้อุณหภูมิสูงและความเข้มข้นต่ำ และมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารเติมแต่ง (filler)

5.1.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของสารเติมแต่ง ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

การศึกษานี้การใช้ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) และ Polyethyleneglycol (PEG) นำมาใช้เป็นสารเติมแต่งรวมในกระบวนการตกตะกอน ซึ่งสาร CTAB เป็นสารประเภทของแคทไอออนิกเข้ามาช่วยในกระบวนการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตกลับทำให้ขนาดอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า (7.20 ± 44.17 ไมโครเมตร) การที่ไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว ($6.48 \pm$

6.84 ไมโครเมตร) และในทำนองเดียวกันสารลดแรงตึงผิวเป็นประเภทไม่มีประจุ (Nonionic surfaction) โดยใช้ PEG (Polyethyleneglycol) แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ขนาดอนุภาคที่เล็ก (4.56 ± 3.18 ไมโครเมตร) ลักษณะสัญญาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ทั้ง CTAB และ PEG มีรูปทรงเป็นทรงกลม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นลักษณะสัญญาณยังมีรูปร่างเป็นทรงกลม แต่มีลักษณะของผิวที่ขรุขระมากขึ้นคล้ายการซ้อนทับกันของผลึกขนาดเล็กแล้วก่อตัวกันเป็นก้อนทรงกลม และมีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตเชิงการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารเติมแต่ง (filler)

5.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้ทั้งที่ไม่มีสารเติมแต่งและมีสารเติมแต่งเป็นตัวช่วยในการตกตะกอนเป็น CTAB และ PEG นำไปเผาที่อุณหภูมิสูง 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดที่เล็กที่สุดเป็น PEG (3.61 ± 2.74 ไมโครเมตร) แล้วใช้สารเติมแต่ง CTAB ขนาดจะใหญ่ขึ้น (3.79 ± 3.24 ไมโครเมตร) แล้วถ้าไม่สารลดแรงตึงผิวก็จะได้อายุที่มากกว่าทั้งสองประเภท ($4.14.1 \pm 7.17$ ไมโครเมตร) กรณีที่ใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นอีกก็จะส่งผลให้ขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน

ทั้งนี้แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่เหลือทิ้ง มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ได้หลากหลายประเภทมากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมสี พลาสติก และพีวีซี ยาง ใส่น้ำมัน wall paper กระสอบปุ๋ย และถุงพลาสติก เป็นต้น และจำเป็นมีการพัฒนากระบวนการผลิตจึงจะสามารถช่วยลดต้นทุนได้ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยลดของเหลือทิ้งในภาคอุตสาหกรรมและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือทิ้ง ลดภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- แคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้มีโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ในปริมาณสูง เนื่องจากใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารตั้งต้นที่ มักจะเหลือตกค้างอยู่ในผลผลิตที่สังเคราะห์ได้ หากมีการเปลี่ยนสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งให้คาร์บอเนตชนิดอื่น ๆ ปริมาณโซเดียมออกไซด์ก็จะลดลง
- สามารถเพิ่มรอบในการล้างมากขึ้น เพราะงานวิจัยนี้ทำการล้างน้ำปราศจากไอออน 2 รอบแบบไหลผ่านการกรองรอบละ 40 มิลลิลิตร เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากขึ้น
- สามารถศึกษาชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารเติมแต่งประเภทอื่นๆ เพื่อช่วยลดขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้ และสามารถช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ได้

บรรณานุกรม

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. แคลเซียมคาร์บอเนต. ประชาชน จำกัด. 2547, 16 p.
- นิชธิมา รุ่งปน, สรพงษ์ภวสุปรีย์, ภัทรพรรณ ประศาสนสารกิจม ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ. วิถีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. 15 - 17 ธันวาคม 2553 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ปัตตะ ฮาแว, พนิดา สุมานะตระกูลม, ชัยรัตน์ ศิริพัธนะและนิติธร ชูศรี. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยเทคนิคการขยายตัวอย่างรวดเร็วของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือสภาวะวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2558
- มันสิน ตันตุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท แชน.อี 68 แล็บ จำกัด, 2540
- สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. ไข่และเนื้อไก่. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บุรพาสาน, 2529
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญาจินดาประเสริฐ. ulla แกลบในงานคอนกรีต. Science & Engineering Publishing. 2552, 130 p.
- อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และ อภิพงษ์ พุฒคำ. 2014. การสังเคราะห์และคุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล (Synthesis and characteristics of Calcium oxide as a catalyst in biodiesel production) วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(3): 29-46 p.
- Akarat Akgsornpeak, Thongthai Witoon, Thumrongrut Mungcharoen, Jumras Limtrakul. Development of synthetic CaO sorbents via CTAB-assisted sol-gel method for CO₂ capture at high temperature. Chemical Engineering Journal. 2014. 237: 189-198 p.
- Schaafsma A., Pakan I., Hofstede G.J.H., Muskiet F.A.J., Van Der Veer E., and De Vries P.J.F.. PROCESSING AND PRODUCTS; Mineral, Amino Acid, and Hormonal Composition of Chicken Eggshell Powder and the Evaluation of its Use in Human Nutrition. Poultry Science. 2000. 79: 1833-1838 p.

- Bai, H.-x.; Shen, X.-z.; Liu, X.-h.; Liu, S.-y., Synthesis of porous CaO microsphere and its application in catalyzing transesterification reaction for biodiesel. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2009, 19: 674-677 p.
- Boyjoo, Y.; Merigot, K.; Lamonier, J.-F.; Pareek, V. K.; Tade, M. O.; Liu, J., Synthesis of $\text{CaCO}_3@C$ yolk-shell particles for CO_2 adsorption. RSC Advances. 2015, 5 (32): 24872-24876 p.
- Choi, B.-S., Transformation of CaCO_3 to single crystalline micro/nanowires. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014, 20 (1): 96-99 p.
- Carter GW., Connor MA., mansell DS., Properties of bricks incorporating unground rice husks, Building and Environment. 1982, 17: 285-291 p.
- Kim, J.H., S. M. Song, et al. CaCO_3 crystallization with feeding of aspartic acid. Korean Journal of Chemical Engineering. 2010, 27(5): 1532-1537 p.
- Maxwell T Hincke.; Yves Nys.; Joel Gautron.; Alejandro B Rodriguez-Navarro., The eggshell: structure, composition and mineralization. Frontiers in Bioscience 17, January 2012, 1266-1280 p.
- M. N. Freire.; J. N. F. Holanda., Characterization of avian eggshell waste aiming its use in a ceramic wall tile paste. Ceramica 2006. 52: 240-244 p.
- Lechtanski, V. L. Inquiry-Based Experiments in Chemistry; Oxford: New York, 2000. 159-165 p.
- Li, S.; Yu, L.; Geng, F.; Shi, L.; Zheng, L.; Yuan, S., Facile preparation of diversified patterns of calcium carbonate in the presence of DTAB. Journal of Crystal Growth. 2010, 312 (10): 1766-1773 p.
- Oladoja, N. A., I. A. Ololade, et al.. Synthesis of Nano Calcium Oxide from a Gastropod Shell and the Performance Evaluation for Cr (VI) Removal from Aqua System. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2012, 51(2): 639-648 p.

Peter A. Ciullo, *Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary*, William Andrew, 1996. 647 p.

Prah, J.; Maček, J.; Dražič, G., Precipitation of calcium carbonate from a calcium acetate and ammonium carbamate batch system. *Journal of Crystal Growth*. 2011, *324*(1): 229-234 p.

Q. Ashton Acton, *Calcium Compounds—Advances in Research and Application: Scholarly Editions 2012*, 161 p.

S. Alim Husain Naqvi. Aboutaleb Ghadami Jadval Ghadam; Mohammad Idrees; Synthesis and modification of calcium carbonate nano-particles via reverse micro-emulsion method. *International Journal of Nano and Biomaterials*, 2014 Vol.5, No.1: 14–26 p.

Shuxia Li, Li Yu n, Fei Geng, Lijuan Shi, Liqiang Zheng, Shiling Yuan. Facile preparation of diversified patterns of calcium carbonate in the presence of DTAB., *Journal of Crystal Growth* 312 (2010) 1766–1773 p.

Teepakorn PORNCHAI, Ajchara Imkum PUTKHAM, Apipong PUTKHAM.. Effect of calcination time on physical and chemical properties of CaO- catalyst derived from industrial-eggshell wastes. The 7th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VII), 2015, 231-236 p.

University of Waikato. All rights reserved. www.sciencelearn.org.nz, (2559)

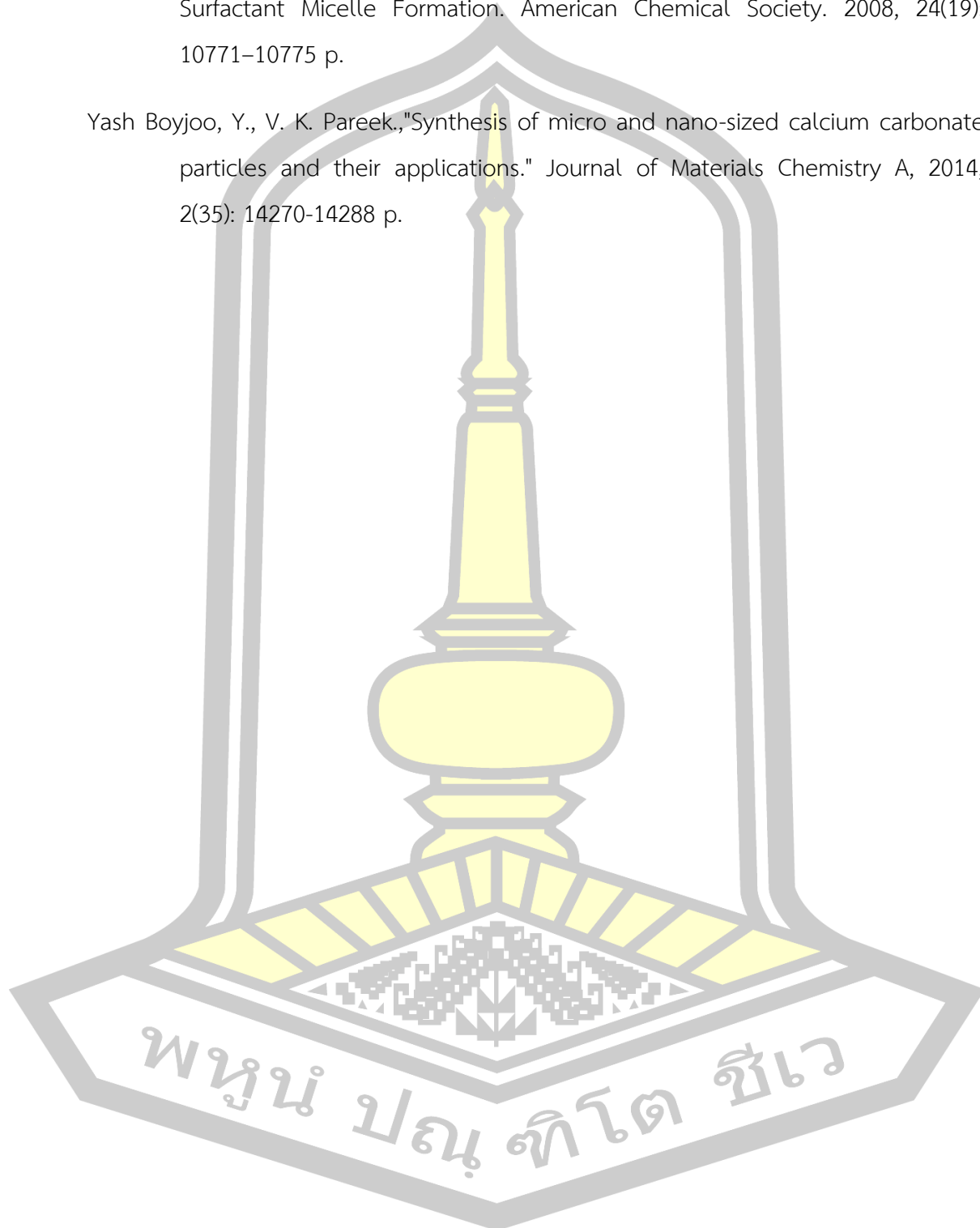
Valeria Daniele, Giuliana Taglieri. Synthesis of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nanoparticles with the addition of Triton X-100. Protective treatments on natural stones: Preliminary results., *Journal of Cultural Heritage* 13(2012). 40-46 p.

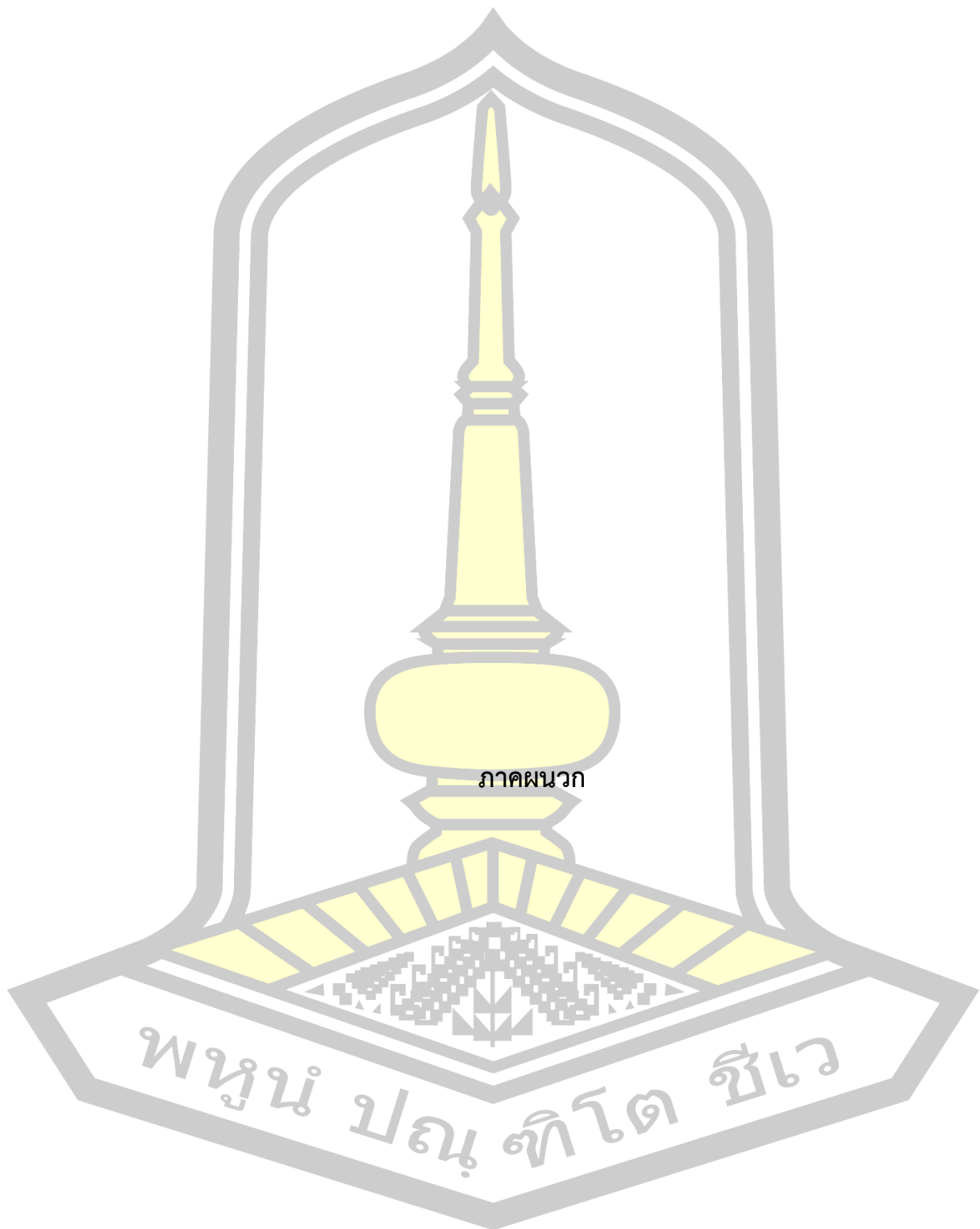
Volodkin, D. V., A. I. Petrov, et al.. "Matrix Polyelectrolyte Microcapsules: New System for Macromolecule Encapsulation." *Langmuir*. 2004, 20(8): 3398-3406 p.

MicelleFormation. www.mpikg.mpg.de/886719/MicelleFormation.pdf, (2559)

Xiaohong Cui, Shizhen Mao, Maili Liu, Hanzhen Yuan and Youru Du. Mechanism of Surfactant Micelle Formation. American Chemical Society. 2008, 24(19): 10771–10775 p.

Yash Boyjoo, Y., V. K. Pareek, "Synthesis of micro and nano-sized calcium carbonate particles and their applications." Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(35): 14270-14288 p.







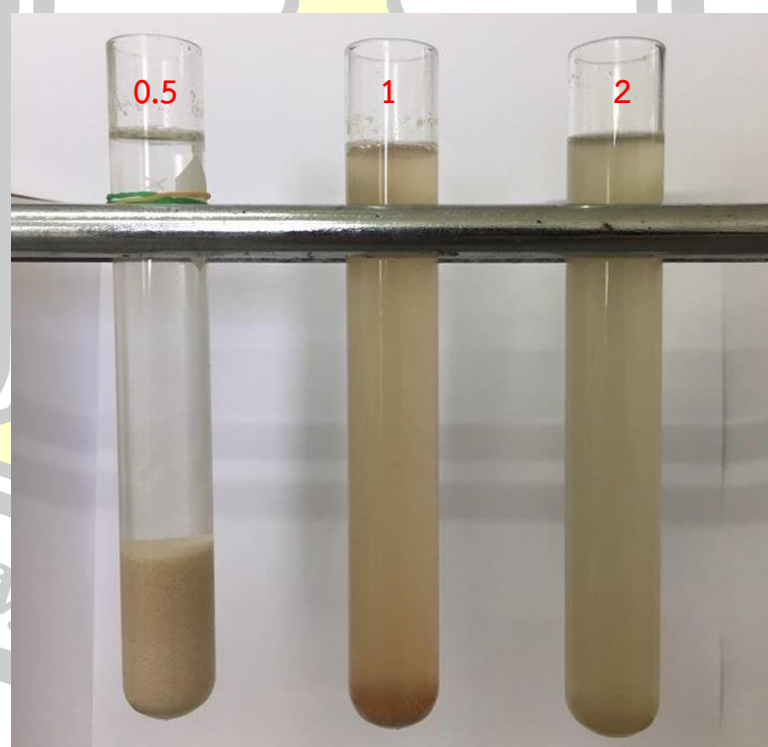
ภาพภาคผนวกที่ 1 การตากเศษเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการทำความสะอาด



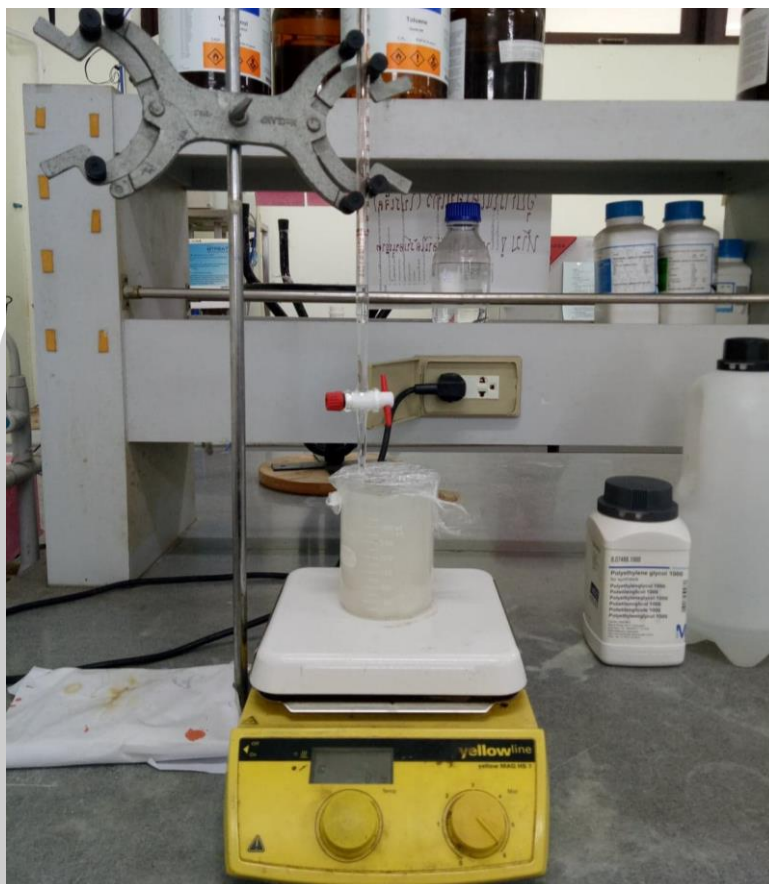
ภาพภาคผนวกที่ 2 เศษเยื่อเปลือกไข่ที่แยกได้จากกระบวนการล้างทำความสะอาด



ภาพภาคผนวกที่ 3 เครื่องปั่นความเร็วรอบสูงใช้ในการหอร์โมนีเจียสเปลือกไข่ให้ละเอียด



ภาพภาคผนวกที่ 4 ลักษณะสีและตะกอนเปลือกไข่ที่เหลือจากกระบวนการสกัดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากเศษเปลือกไข่ ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5, 1 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพภาคผนวกที่ 5 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์(Beaker) กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Burette)



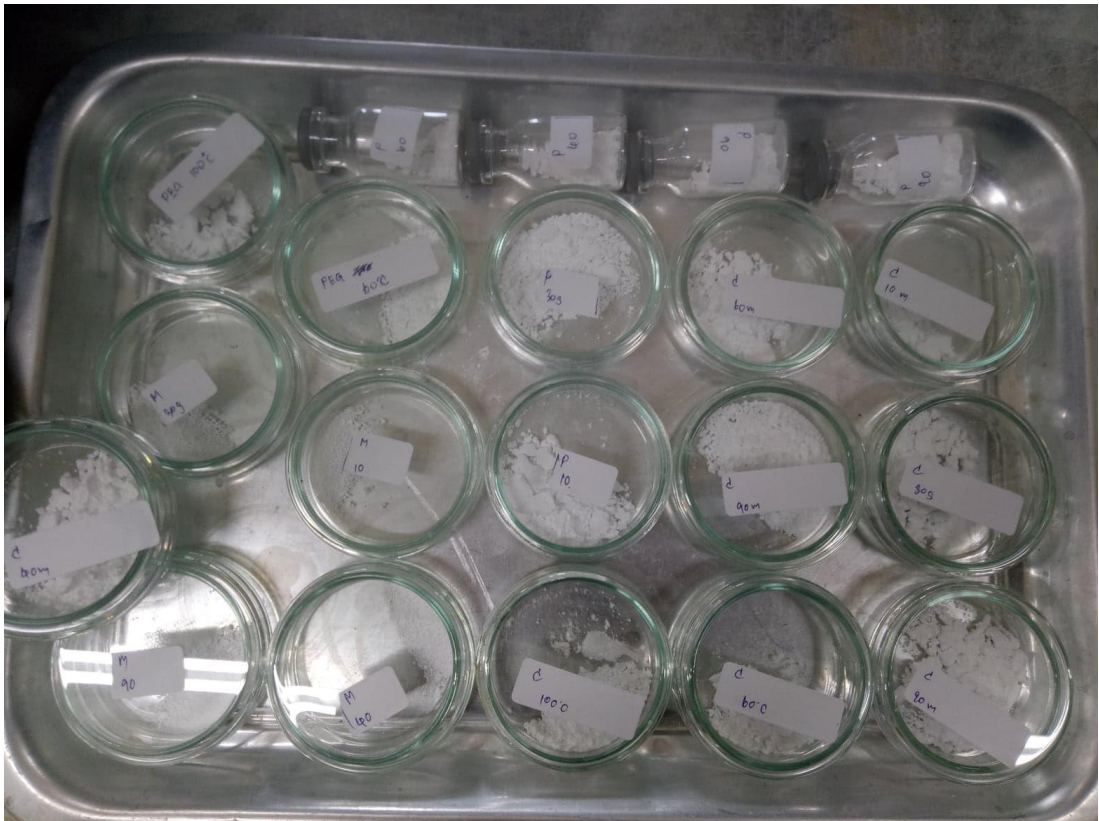
ภาพภาคผนวกที่ 6 หลังจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต จะได้ตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตแขวนลอยอยู่ในสารละลาย มีลักษณะสีขาวขุ่น



ภาพภาคผนวกที่ 7 การตักตะกอนที่สภาพอะนุหภูมิสูง โดยใช้เวลาในการกวนผสม 30 วินาที และให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง



ภาพภาคผนวกที่ 8 ลักษณะการล้างทำความสะอาดผ่านการกรองผ่านด้วยระบบสุญญากาศ



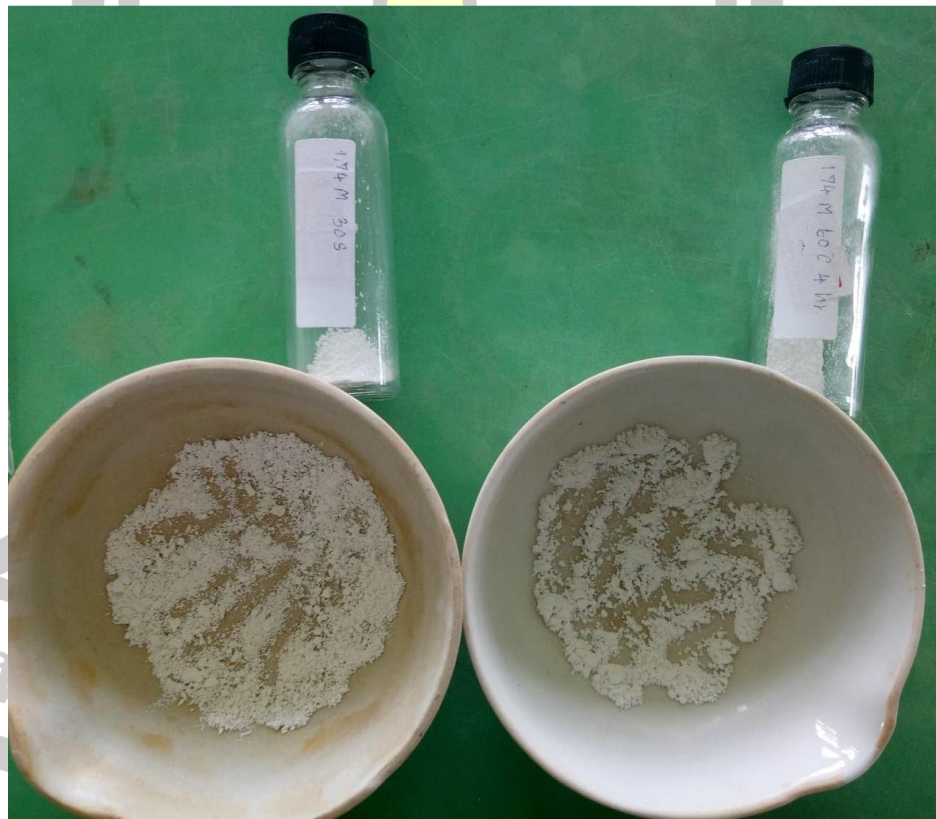
ภาพภาคผนวกที่ 9 แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้นำไปออกแห้งไล่ความชื้น 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (เปิดฝากระຈกก่อนนำเข้าไปอบแห้ง)



ภาพภาคผนวกที่ 10 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับอบตัวอย่างไล่ความชื้น



ภาพภาคผนวกที่ 11 แคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนได้นำไปการเก็บรักษาโดยบรรจุในถุงซิปลงและเก็บในโถดูดความชื้น



ภาพภาคผนวกที่ 12 ลักษณะแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ และภาพขณะในการเก็บ



ภาพภาคผนวกที่ 13 เตาเผาที่ใช้สำหรับเผาเปลือกไข่ และแคลเซียมคาร์บอเนตให้ได้เป็นแคลเซียมออกไซด์



ภาพภาคผนวกที่ 14 ลักษณะการใส่ตัวอย่างในเตาเผา



ภาพภาคผนวกที่ 15 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM)



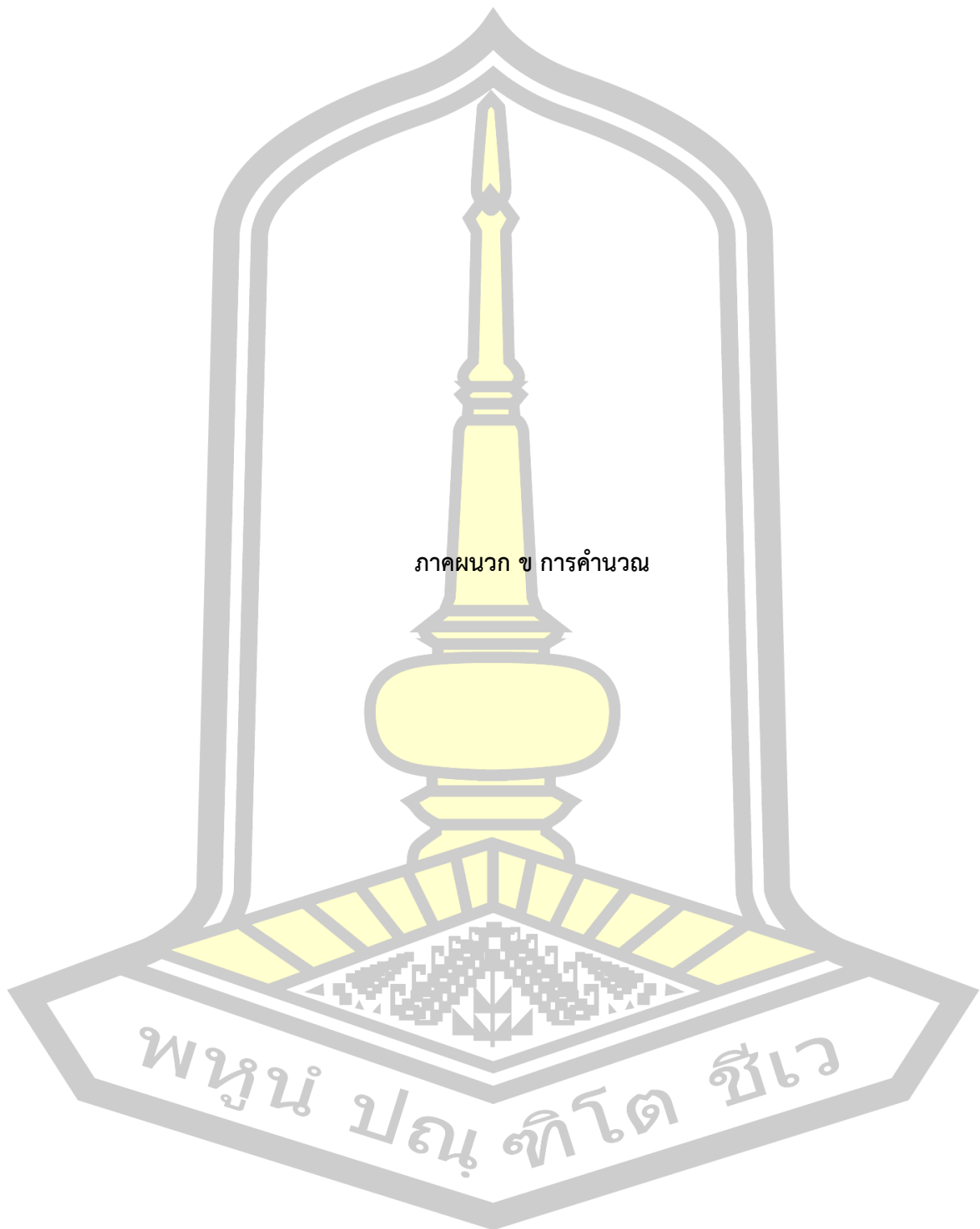
ภาพภาคผนวกที่ 16 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค



ภาพภาคผนวกที่ 17 เครื่องวิเคราะห์ X-ray Diffractometer (XRD)



ภาพภาคผนวกที่ 18 ภาพแสดงสีการไทเทรตจากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์



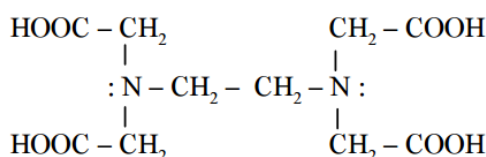
การหารปริมาณผลผลิตของแคลเซียมคาร์บอเนตที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่

	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณสารตั้งต้น 1.74M/1.74M	CaCO ₃ -yied (กรัม)	CaCO ₃ -เมื่อใช้เปลือก ไข่ 10 กรัม (กรัม)
สารตั้งต้น (CaCl ₂ :NaCO ₃)	CaCo3-30s	10:10ml	1.0855	10.855
	CaCo3-10m	10:10ml	1.0252	10.252
	CaCo3-20m	10:10ml	1.1840	11.840
	CaCo3-40m	10:10ml	1.3013	13.013
	CaCo3-60m	10:10ml	1.2515	12.515
	CaCo3-90m	10:10ml	1.0102	10.102
	สารตั้งต้น+ CTAB	CaCo3_30s_0.33M	40:40ml	2.6124
CaCo3_10m_0.33M		40:40ml	2.6576	26.576
CaCo3_20m_0.33M		40:40ml	2.8000	28.000
CaCo3_40m_0.33M		40:40ml	2.5992	25.992
CaCo3_60m_0.33M		40:40ml	2.6704	26.704
CaCo3_90m_0.33M		40:40ml	2.7692	27.692
สารตั้งต้น+ PEG		CaCo3_30s_30C_0.33M	40:40ml	2.7500
	CaCo3_10m_30C_0.33M	40:40ml	2.7392	27.392
	CaCo3_20m_30C_0.33M	40:40ml	2.7392	27.392
	CaCo3_40m_30C_0.33M	40:40ml	2.7380	27.380
	CaCo3_60m_30C_0.33M	40:40ml	2.5208	25.208
	CaCo3_90m_30C_0.33M	40:40ml	2.5104	25.104

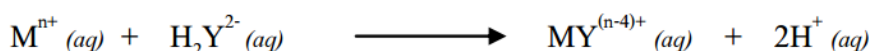
พูน ปณ ทิโต ชีเว

การไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน (Complexometric Titration)

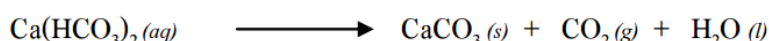
การไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อให้ทราบวิธีในการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้ EDTA เป็นไทเทรนต์ในการวิเคราะห์ ความกระด้างของน้ำ การไทเทรตไอออนของโลหะ (Metal ions) ด้วยสารละลาย Complexing agent แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ของโลหะกับ Complexing agent นั้นไทเทรนต์ (Titrant) ที่ใช้กันมาก คือ Ethylenediamine tetraacetic acid ซึ่งนิยม เขียนแทนด้วย EDTA หรือ H₄Y มีสมบัติเป็น Aminopolycarboxylic acid มีโครงสร้างดังนี้



EDTA หรือ Sodium dihydrogen ethylenediamine tetraacetate dihydrate (Na₂H₂Y₂ · 2H₂O) สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรมากกับไอออนของโลหะในอัตราส่วน 1 : 1 ดังสมการ



ในการไทเทรตระหว่าง EDTA กับไอออนของโลหะ นิยมใช้ Eriochrom Black T หรือ Merexide เป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติจะเห็นสีของอินดิเคเตอร์เปลี่ยนไปได้ชัดเจนเมื่อสารละลายมี pH เหมาะสม ถ้าใช้ Eriochrom Black T เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายควรมี pH 7 – 12 หรือถ้าใช้ Merexide เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายควรมี pH 9 – 11 ดังนั้น ในการทดลองต้องเติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไปด้วยทุกครั้ง น้ำกระด้างจะมี Calcium ion (Ca²⁺) และ Magnesium ion (Mg²⁺) ซึ่งอยู่ในรูปของเกลือ Calcium hydrogencarbonate (Ca(HCO₃)₂), Calcium chloride (CaCl₂), Calcium sulfate (CaSO₄) และ Magnesium hydrogen carbonate (Mg(HCO₃)₂), Magnesium chloride (MgCl₂), Magnesium sulfate (MgSO₄) เกลือเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับ EDTA ผลการวิเคราะห์จะเป็นการวัดความกระด้างทั้งหมดของน้ำอันเนื่องมาจากเกลือไบคาร์บอเนต คลอไรด์และเกลือซัลเฟต ถ้าเอาน้ำ กระด้างที่มีเกลือไบคาร์บอเนต เกลือคลอไรด์ และเกลือซัลเฟต ไปต้มจนเดือดจะเกิดปฏิกิริยา ตกตะกอนของ เกลือไบคาร์บอเนต ดังสมการนี้



น้ำกระด้างนี้จะคงเหลือเกลือของคลอไรด์และเกลือซัลเฟต (CaCl₂, MgCl₂, CaSO₄, MgSO₄) เท่านั้น ซึ่งเป็นน้ำกระด้างถาวร ถ้าเอาน้ำ กระด้างไปตกตะกอนด้วย Ammonium oxalate

จะได้ตะกอนของแคลเซียมออกซาเลต (CaC_2O_4) $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + (\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq}) \rightarrow \text{CaC}_2\text{O}_4(\text{s}) + 2\text{NH}_4^+(\text{aq})$ น้ำกระด้างนี้จึงเหลือเกลือของ Mg เท่านั้น



วิธีการทดลองเบื้องต้นเพื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคลอไรด์

การทดลองที่ 1 Standardize สารละลาย EDTA ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต

1.1 ชั่ง CaCO_3 บริสุทธิ์ที่อบแห้งแล้ว 0.0250 กรัม (บันทึกทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำ ประมาณ 20 – 30 มิลลิลิตร

1.2 เติม 1.0 M HCl ที่ละลาย และเขย่า แรง ๆ จน CaCO_3 ละลายหมด

1.3 เติม Methyl red 2 - 3 หยด และเติม 1.0 M NaOH ที่ละลายจนสารละลายเป็นด่างเล็กน้อยโดยสีของสารละลายจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง

1.4 เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไปจำนวน 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Eriochrom Black T ประมาณ 5 หยด

1.5 นำ ไปไทเทรตกับสารละลาย 0.01 M EDTA เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีม่วงไปเป็นสีฟ้า หรือ สีฟ้าอมเขียว จากปริมาตรของ EDTA และน้ำหนักของ CaCO_3 นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของ สารละลาย EDTA ได้

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์หาความกระด้างทั้งหมดของน้ำ (Ca^{2+} และ Mg^{2+})

2.1 ปิเปิดน้ำตัวอย่าง 25.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไป 1 มิลลิลิตร เติม Eriochrom Black T ประมาณ 5 หยด

2.2 ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนกระทั่งการละลายเปลี่ยนจาก สีม่วงแดงไปเป็นสีฟ้า

2.3 ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้ง นำผลที่ได้นำไปคำนวณหาความกระด้างทั้งหมดของน้ำ

การทดลองที่ 3 การวิเคราะห์หาความกระด้างถาวร (CaCl_2 และ MgCl_2)

3.1 ปิเปิดน้ำตัวอย่าง 25.00 มิลลิลิตร ลงในปิเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 10 –15 นาทีตั้งทิ้งไว้ให้เย็น กรองใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2 เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 ลงไป 1 มิลลิลิตร เติม Eriochrom Black T ประมาณ 5 หยด

3.3 ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนกระทั่ง สารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงแดงไปเป็นสีฟ้า

3.4 ทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้งและนำผลที่ได้นำไปคำนวณหาความกระด้างถาวรของ

การทดลองที่ 6.4 การวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมและแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง

4.1 ปีบน้ำตัวอย่าง 25.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 1.0 M HCl 2 มิลลิลิตร เติม methyl red 2-3 หยด และเติม Ammonium oxalate อิ่มตัว 5 มิลลิลิตร

4.2 อุ่นสารละลายจนเกือบเดือด แล้วค่อย ๆ หยด Ammonium hydroxide ลงไปในขณะที่สารละลายยัง ร้อนๆ เพื่อตกตะกอนแคลเซียมให้อยู่ในรูปของ Calcium oxalate จนสมบูรณ์ที่ pH ประมาณ 6 ซึ่งสังเกตจากจำนวนตะกอนเท่าเดิม ไม่เพิ่มขึ้น

4.3 ถ้าสารละลายเป็นสีเหลือง แสดงว่าค่า pH สารละลายมากกว่า 6 ให้ปรับ pH สารละลายให้อยู่ในช่วง 5 – 6 ด้วย 0.01 M HCl ที่ละลายจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองแก

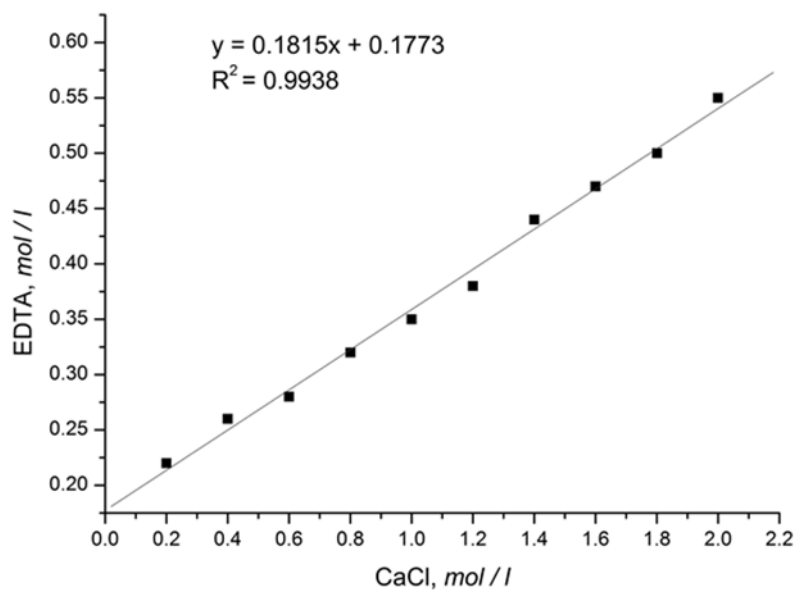
4.4 ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นกรองตะกอนออก และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจำนวนน้อยๆ หลายๆ ครั้ง

4.5 นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาเติม 1.0 M NaOH 2 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายบัพเฟอร์ pH 10 จำนวน 1 มิลลิลิตร และ Eriochrom Black T ประมาณ 5 หยด

4.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงแดงไปเป็นสีฟ้าอมเขียว

4.7 ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้งและนำผลการทดลองไปคำนวณหาปริมาณของแคลเซียม

การไทเทรตหาปริมาณแคลเซียมในสารละลายตัวอย่าง โดยใช้ EDTA เป็นสารโคจรแทน												
การเตรียม EDTA	g	ml	Molarity(M)									
	1.8505	102	0.048738		3.7224	1000	0.01					
การเตรียม CaCl ₂	(g)	น้ำหนักสาร (ml)	Molarity(M)									
					ใช้ CaCl ₂ 2ml		Molarity(M)					
					EDTA (ml)	EDTA 2 เท่า (ml)	ใช้ CaCl ₂ 2ml (mol)	ใช้ CaCl ₂ 2ml 2ml (mmol)	EDTA Molarity(M)	EDTA Molarity(mmol)	EDTA 2 เท่า Molarity(mmol)	เฉลี่ย EDTA ที่ใช้จริง
0.1	0.1110											
0.2	0.2220	0.2221	10	0.2001	0.22	0.44	0.0004	0.4003	0.0487	0.0107	0.0214	1.0667
0.3	0.3330											
0.4	0.4440	0.444	10	0.4001	0.26	0.52	0.0008	0.8001	0.0487	0.0127	0.0253	1.2667
0.5	0.5550											
0.6	0.6659	0.666	10	0.6001	0.28	0.56	0.0012	1.2002	0.0487	0.0136	0.0273	1.3667
0.7	0.7769											
0.8	0.8879	0.8885	10	0.8006	0.32	0.64	0.0016	1.6012	0.0487	0.0156	0.0312	1.5500
0.9	0.9989											
1.0	1.1099	1.11	10	1.0002	0.35	0.7	0.0020	2.0004	0.0487	0.0171	0.0341	1.7167
1.1	1.2209											
1.2	0.3319	1.3315	10	1.1998	0.38	0.76	0.0024	2.3995	0.0487	0.0185	0.0370	1.8500
1.3	1.4429											
1.4	1.5539	1.5542	10	1.4004	0.44	0.88	0.0028	2.8009	0.0487	0.0214	0.0429	2.1333
1.5	1.6649											
1.6	1.7758	1.7759	10	1.6002	0.47	0.94	0.0032	3.2004	0.0487	0.0229	0.0458	2.3667
1.7	1.8868											
1.8	1.9978	1.9985	10	1.8008	0.5	1	0.0036	3.6015	0.0487	0.0244	0.0487	2.4333
1.9	2.1068											
2.0	2.2198	2.219	10	1.9995	0.55	1.1	0.0040	3.9989	0.0487	0.0268	0.0536	2.6667



ภาพภาคผนวกที่ 19 กราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย สมชาย ลาดหาร
วันเกิด	วันที่ 20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	อำเภอเนินสง่า จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 59/1 หมู่ 9 บ้านหนองไชน้ำ ตำบลกระษัต อำเภอนีนสง่า จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านค่ายวิทยา จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2551 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล จังหวัด ชัยภูมิ พ.ศ. 2557 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชา เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม
ทุนวิจัย	ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ทุนโครงการทุนอุดหนุนการวิจัยระดับ บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	Somchai Ladhan, Ajchara I. Putkham, Apipong Putkham. (2018). Factors Affecting on Particle Size of Bio-Calcium Carbonate Synthesized from Industrial Eggshell Waste. Materials transactions, 59(8), 1220-1224. Somchai Ladhan, Ajchara I. Putkham, Yuwadee Chaiyachet, Kanokwan Sukaranandana, Apipong Putkham. (2017). Synthesis of High Surface Area of CaO from Industrial Eggshell Waste via Chemical Processes. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ISSN 1686-9664 ฉบับพิเศษ, 206-213. Somchai Ladhan, Apipong Putkham, Yuwadee Chaiyachet.

(2018). Synthesis of Micro-Sized Calcium Carbonate from Eggshell Waste via Hierarchical Process. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ISSN 1686 – 9664 ฉบับพิเศษ, 147-153.

