



การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเตาเผาแบบ
หมุน

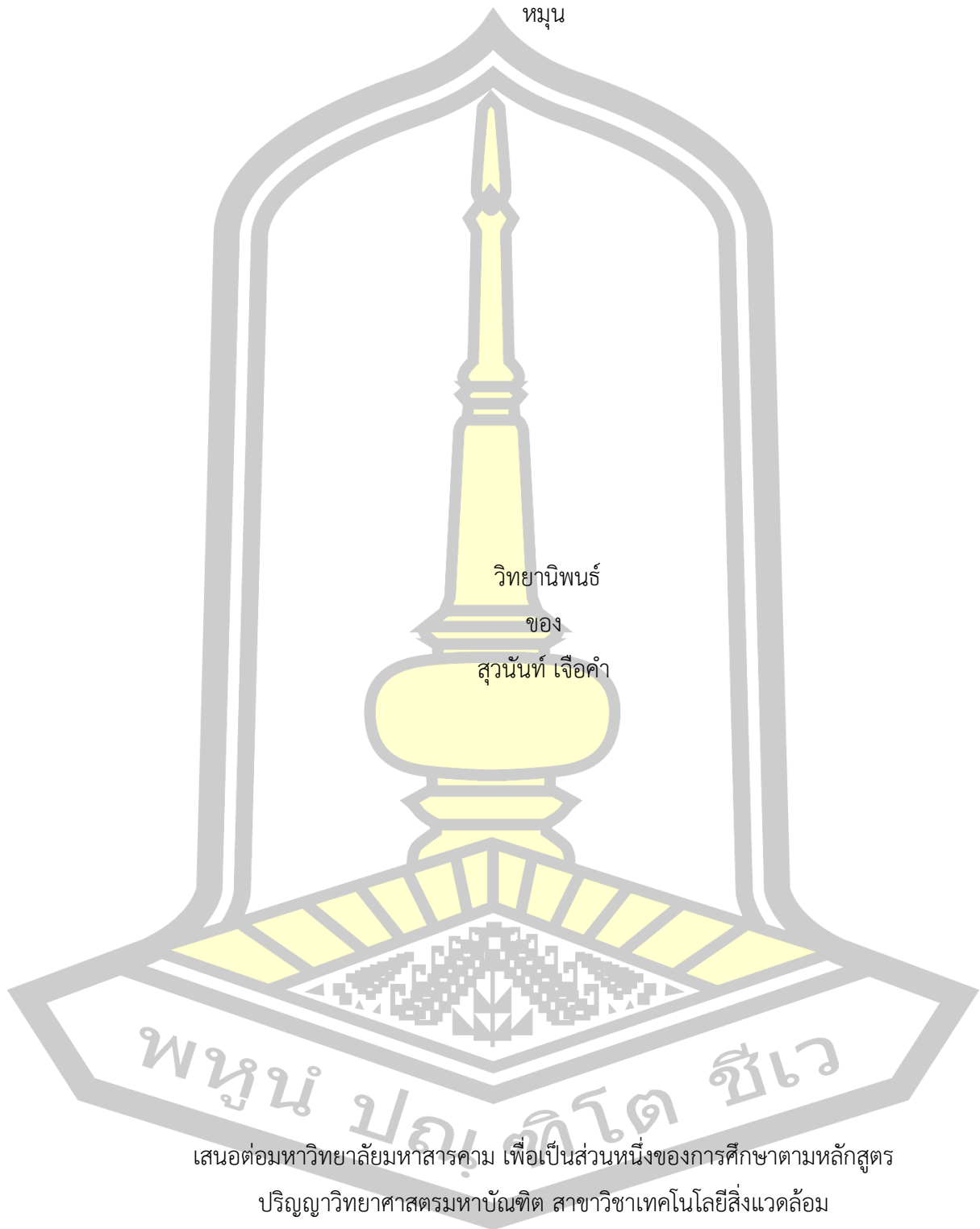
วิทยานิพนธ์
ของ
สุนันท์ เจือคำ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
มกราคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเตาเผาแบบ

หมุน



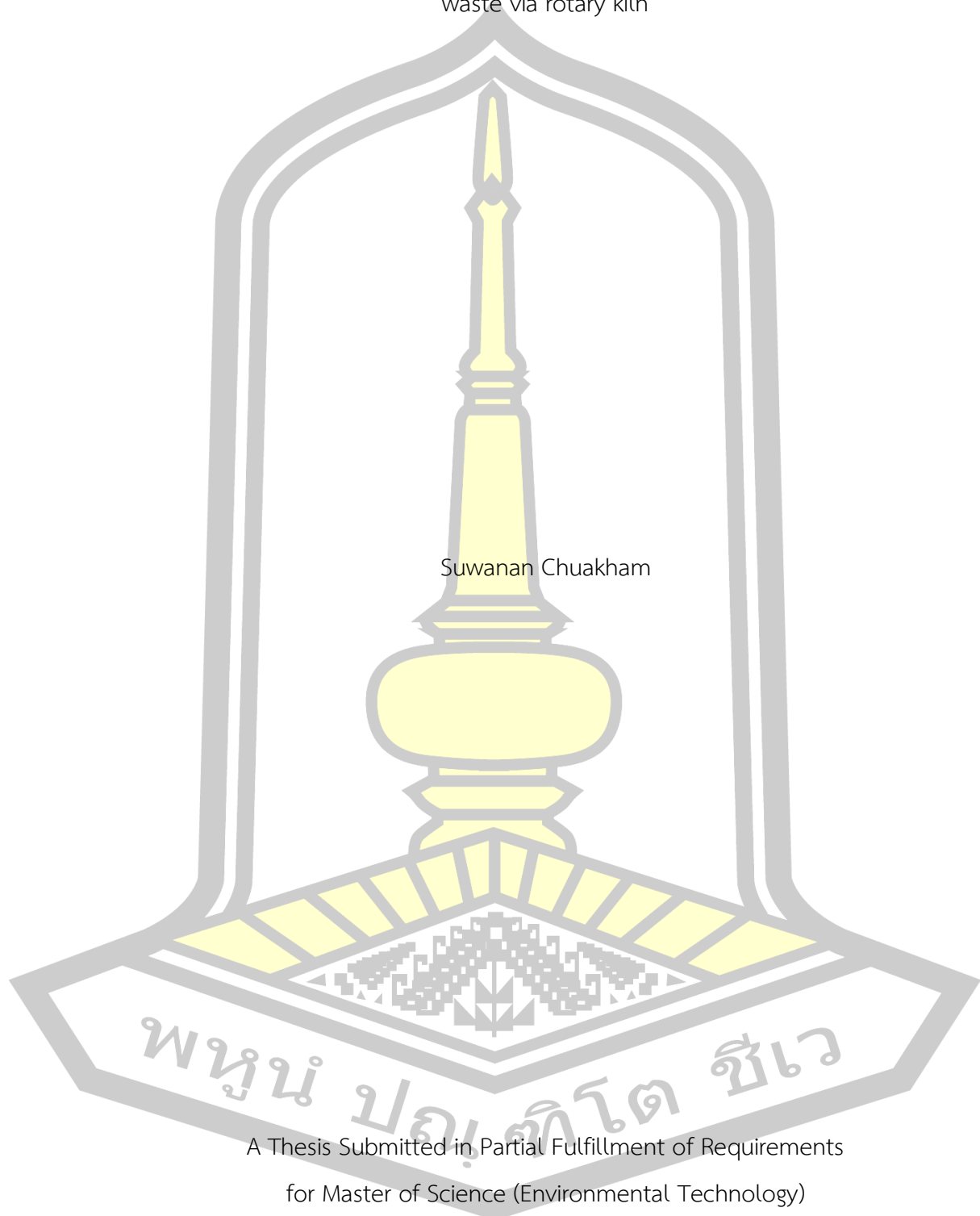
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

มกราคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of a process for production of calcium oxide from Industrial-eggshell
waste via rotary kiln



Suwanan Chuakham

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

January 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวสุนันท์ เจือคำ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. อภิพงษ์ พุฒคำ)

.....กรรมการ

(อ. ดร. ยูวดี ไชยเชษฐ์)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รศ. ดร. ชันวดี ศรีธาวีรัตน์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. อติศักดิ์ สิงห์สีโว)

คณบดีคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

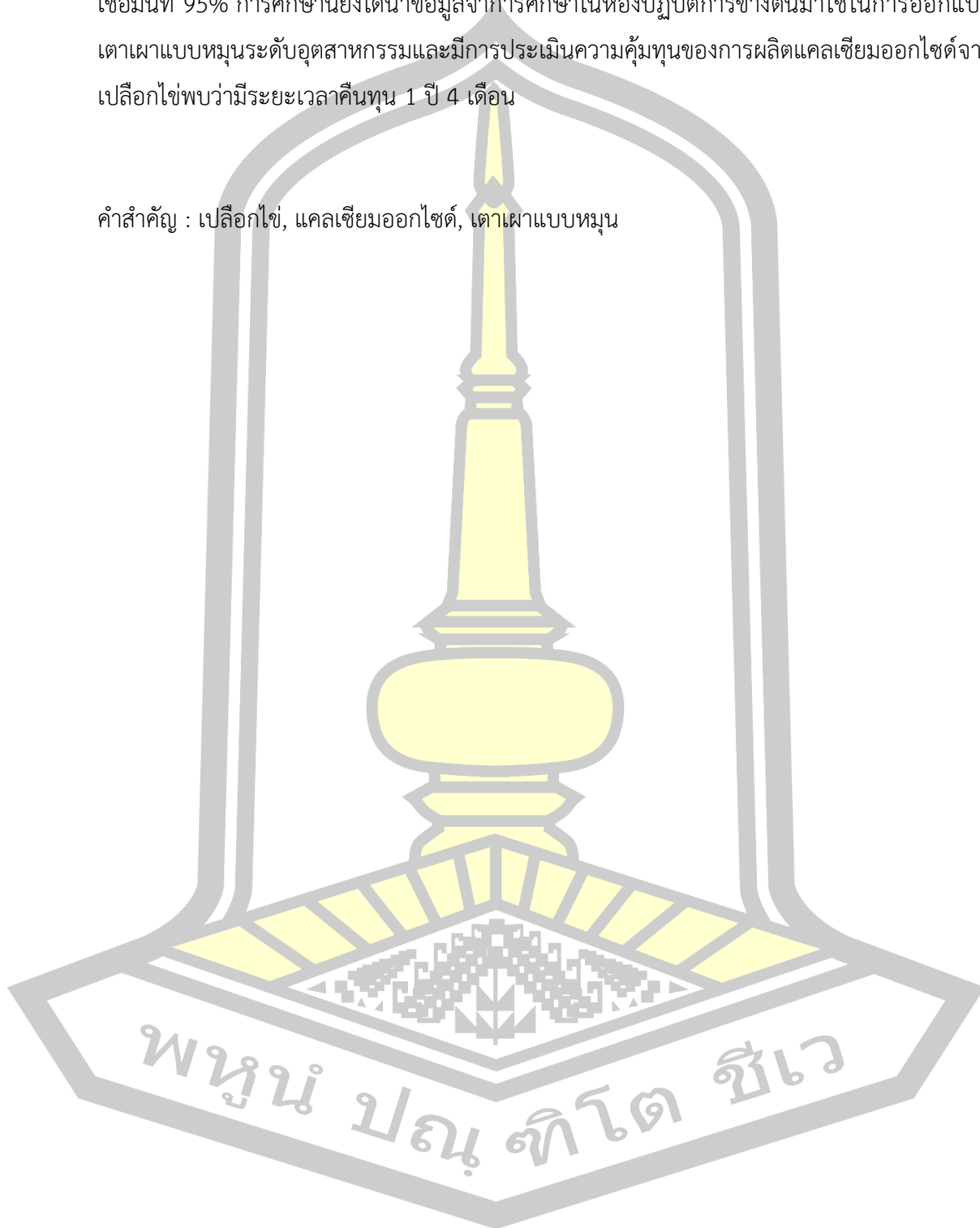
ชื่อเรื่อง	การพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้ง อุตสาหกรรมด้วยเตาเผาแบบหมุน		
ผู้วิจัย	สุนันท์ เจือคำ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิพงษ์ พุฒคำ		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกที่ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เหลือทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเตาเผาแบบหมุน โดยนำเปลือกไข่ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มุมเอียงเตาเผา 5 องศา โดยศึกษาอิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน 6 ขนาด อิทธิพลของความเร็รรอบที่แตกต่างกันในช่วง 0.5-4 RPM และอิทธิพลของอัตราการป้อนที่แตกต่างกันในช่วงร้อยละ 5-15 ของปริมาตรเตาเผา ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่าเปลือกไข่เหลือทิ้งประกอบด้วยเปลือกไข่ร้อยละ 87.1 ± 4.2 และมีเยื่อเปลือกไข่ผสมร้อยละ 12.9 ± 4.2 โดยเปลือกไข่เหลือทิ้งมีขนาดประสิทธิผล (Effective Size) เท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร เมื่อนำเปลือกไข่เหลือทิ้งไปเผาและนำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope :FESEM) พบว่าแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนและผลึกมีรูปร่างระบอบคล้ายแท่งดัมเบลล์ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และ Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่มีการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ อย่างไรก็ตามพบว่ายังมีแคลเซียมคาร์บอเนตบางส่วนที่ไม่สลายตัวปนอยู่ในตัวอย่างหลังการเผา เมื่อนำตัวอย่างวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) พบว่าตัวอย่างที่ไม่บดและมีการแยกเยื่อเปลือกไข่ออกก่อนที่จะนำเปลือกไข่ไปเผากับตัวอย่างที่ไม่บดและไม่มีการแยกเยื่อเปลือกไข่ก่อนนำไปเผาให้ผลผลิตแคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 97.9 และ 94.9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเผาเปลือกไข่ที่ไม่มีการบดและไม่ต้องแยกเยื่อเปลือกไข่สามารถให้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากับปูนขาวร้อนซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 94.4 ขณะที่การเผาเปลือกไข่ที่ไม่มีการบดและแยกเยื่อเปลือกไข่สามารถให้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเปลือกไข่ที่แยกเยื่อแล้วนำมาบดให้มีขนาด 53 250 และ 500 ไมโครเมตรก่อนนำไปเผาพบว่าให้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ไม่แตกต่างกัน ในการศึกษายังพบอีกว่าการปรับความเร็วรอบการหมุนของเตาเผาและการอัตราการป้อนเปลือกไข่ให้

ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% การศึกษานี้ยังได้นำข้อมูลจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการข้างต้นมาใช้ในการออกแบบเตาเผาแบบหมุนระดับอุตสาหกรรมและมีการประเมินความคุ้มค่าของการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่พบว่า มีระยะเวลาคืนทุน 1 ปี 4 เดือน

คำสำคัญ : เปลือกไข่, แคลเซียมออกไซด์, เตาเผาแบบหมุน



TITLE	Development of a process for production of calcium oxide from Industrial-eggshell waste via rotary kiln		
AUTHOR	Suwanan Chuakham		
ADVISORS	Assistant Professor Apipong Putkham , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Environmental Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

This research is the first time to investigate the synthesis of calcium oxide from industrial waste eggshell using a rotary kiln. The eggshell is calcined at a temperature of 800 °C, with a kiln tilt angle of 5 degrees. Various factor effecting on calcined product were investigated e.g. size of the eggshell, the rotational speeds of the kiln in the range of 0.5-4 RPM, and feeding rates of the eggshell in the range of 5-15% of furnace volume. As received eggshell contained of the eggshell and eggshell membrane 87.1% ± 4.2 and 12.9% ± 4.2, respectively. As received eggshell waste has an effective size of 1.25 mm. The Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) found that the surface of synthetic calcium oxide had a dumbbell-like shape. The results of X-Ray Diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) showed that the eggshell decomposed into calcium oxide after calcined at 800 °C. However, some non-degraded calcium carbonate was found in the sample after calcination. The results from X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) indicates that the calcium oxide derived from eggshell without membrane and the eggshell with membrane consisted of calcium oxide with the purity of 97.9% and 94.9%, respectively. This results indicating that the calcination of the eggshell with membrane yielded calcium oxide of equivalent purity with industrial grade lime containing 94.4% calcium oxide, while calcination of the eggshell without membrane was able to yield calcium oxide of the same purity as laboratory-grade calcium oxide. However, when the eggshell was grided to size 53, 250, and 500 micrometers before calcination, the

purity of calcium oxide was not different. In the study, it was found that the adjustment of the kiln rotational speed and the eggshell feeding rate did not differ in the purity of the calcium oxide was no significant difference at the confidence level at 95%, the above laboratory study was used to design industrial rotary furnaces and assessed the cost-effectiveness of eggshell calcium oxide production. Payback period 1 year and 4 months.

Keyword : Eggshell, Calcium oxide, Rotary kiln



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับทุนจากบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ร่วมกับโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโทปีงบประมาณ 2562

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิพงษ์ พุฒคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.ยุวดี ไชยเชษฐ์ อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ และรองศาสตราจารย์ ดร. ธันวดี ศรีธาวิรัตน์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะการดำเนินงานวิจัยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณโรงฟักไข่สูงเนินในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำเปลือกไข่ไก่มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร และคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านต่าง ๆ ตลอดงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุนันท์ เจือคำ



สารบัญ

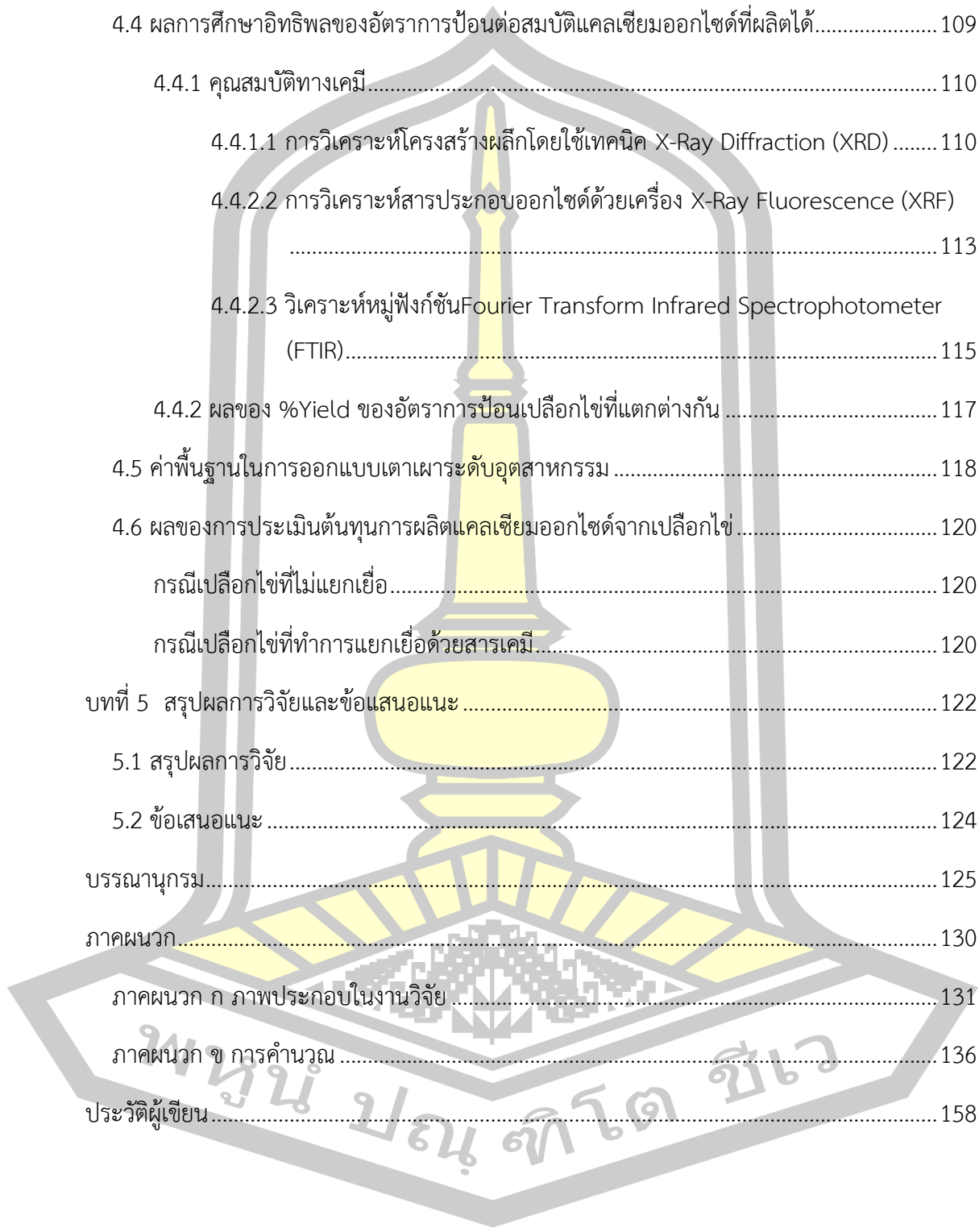
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	๗
สารบัญภาพประกอบ.....	๘
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 นิยามศัพท์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ไข่ (Egg).....	7
2.1.1 องค์ประกอบของไข่และเปลือกไข่.....	8
2.1.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกไข่.....	8
2.1.2 แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่.....	10
2.1.2.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃).....	10
2.1.2.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO).....	10
2.1.2.3 แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl ₂).....	11
2.1.2.4 คอลลาเจน (Collagen).....	11

2.2 การสังเคราะห์และคุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์.....	12
2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป	12
2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต	12
2.2.2.1 วัสดุธรรมชาติ	12
2.2.2.2 สารเคมี	12
2.2.2.3 ของเสีย	15
2.2.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์.....	18
2.2.2.1 กระบวนการทางความร้อน.....	18
2.2.2.2 กระบวนการทางเคมี.....	23
2.3 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃).....	26
2.3.1 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO).....	26
2.3.2 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	29
2.4 เทคโนโลยีเตาเผาที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน	30
2.4.1 ประเภทของเทคโนโลยีและหลักการทำงานของเทคโนโลยี	31
2.4.1.1 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate)	31
2.4.1.2 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)	33
2.4.1.3 เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)	35
2.4.1.4 เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)	36
2.5 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)	37
2.5.1 นิยามของเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln).....	37
2.5.2 องค์ประกอบของเตาเผาแบบหมุน	38
2.5.3 ประเภทของเตาเผาแบบหมุน.....	41
2.5.3.1 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired kilns).....	41
2.5.3.2 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียว (Indirect-fired kilns).....	42

2.5.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต.....	43
2.5.4.1 ขนาดอนุภาค	43
2.5.4.2 มุมเอียง.....	45
2.5.4.3 เวลา.....	46
2.5.4.4 ความเร็วรอบ	46
2.5.4.5 อัตราการป้อน.....	47
2.5.4.6 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	48
2.5.5 สมการในการออกแบบเบื้องต้น.....	50
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	58
3.1 เปลือกไข่ไก่.....	58
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี	58
3.3 การเตรียมเปลือกไข่ไก่.....	58
3.4 ศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้	60
3.5 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบในการหมุนต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้.....	62
3.6 ศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้	64
3.7 ตรวจสอบสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้	66
3.7.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	66
3.7.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมี	68
3.8 ขั้นตอนสรุปเกณฑ์การออกแบบเตาเผาในระดับอุตสาหกรรม	71
3.9 การประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	72
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	74
4.1 ลักษณะและสมบัติของเปลือกไข่	75
คุณสมบัติของเปลือกไข่.....	75
4.1.1 อัตราส่วนเปลือกไข่ต่อเชื้อเปลือกไข่.....	75

4.1.2	ขนาดของเปลือกไข่	75
4.1.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกไข่ที่ได้จากโรงฟักไข่สูงเนินด้วยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Sieve Shaker	78
4.1.3	การแยกเยื่อเปลือกไข่	81
4.1.3.1	การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	81
4.1.3.2	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ด้วยสารเคมี	81
4.2	ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้	82
4.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ	83
4.2.1.1	การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	83
4.2.2	คุณสมบัติทางเคมี	86
4.2.2.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	86
4.2.2.2	การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	89
4.2.2.3	วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)	91
4.2.3	ผลของ %Yield ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน	93
4.3	ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนต่อสมบัติแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้	94
4.3.1	คุณสมบัติทางเคมี	95
4.3.1.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	95
4.3.1.2	การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	99
4.3.1.3	วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)	104

4.3.2 ผลของ %Yield ของความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกัน.....	108
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนต่อสมบัติแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้.....	109
4.4.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	110
4.4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)	110
4.4.2.2 การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)	113
4.4.2.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันFourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR).....	115
4.4.2 ผลของ %Yield ของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน	117
4.5 ค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาในระดับอุตสาหกรรม	118
4.6 ผลของการประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่.....	120
กรณีเปลือกไข่ที่ไม่แยกเยื่อ.....	120
กรณีเปลือกไข่ที่ทำการแยกเยื่อด้วยสารเคมี.....	120
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	122
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
บรรณานุกรม.....	125
ภาคผนวก.....	130
ภาคผนวก ก ภาพประกอบในงานวิจัย	131
ภาคผนวก ข การคำนวณ	136
ประวัติผู้เขียน.....	158



สารบัญตาราง

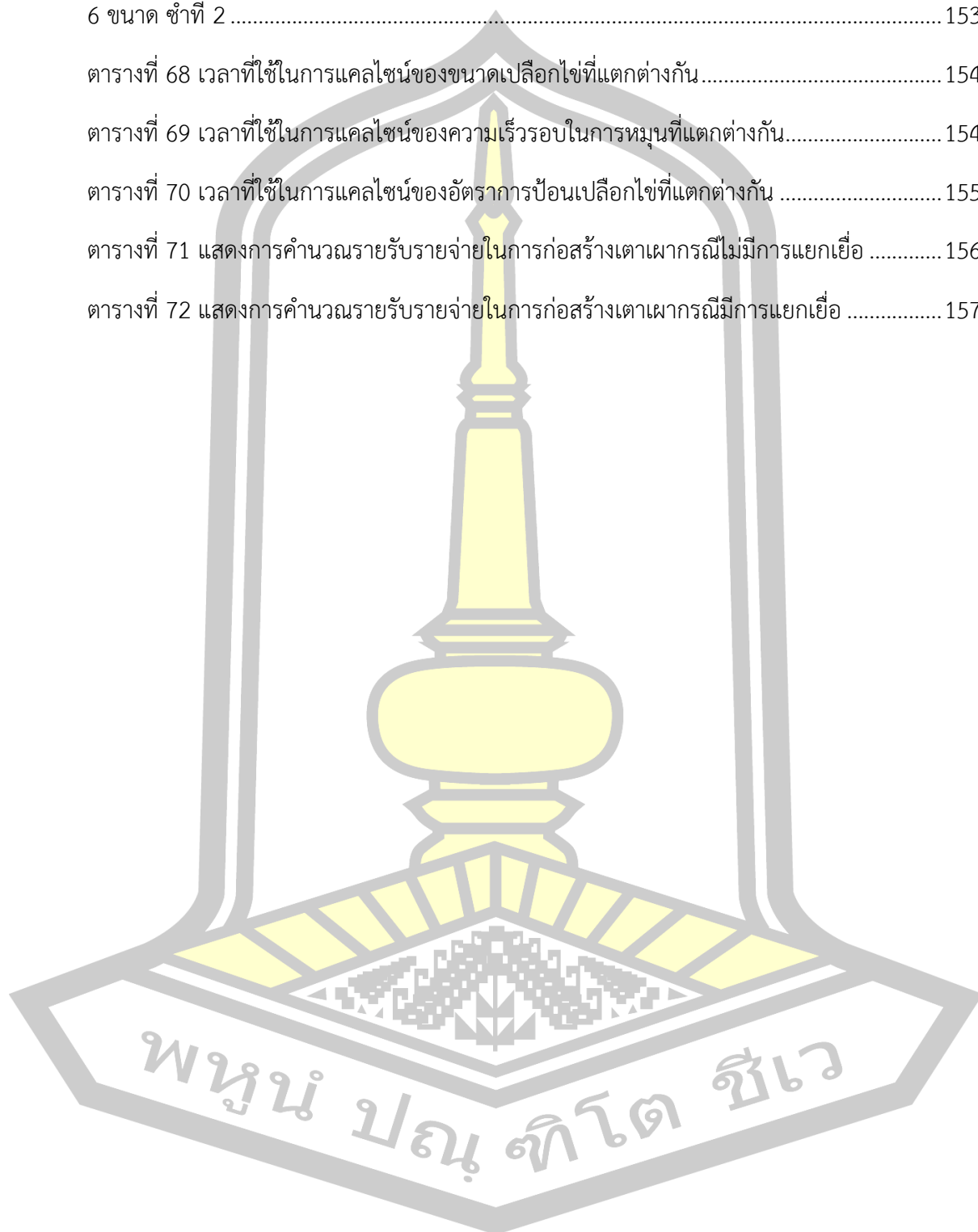
	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่แคลไซน์จากเปลือกไข่	19
ตารางที่ 2 คุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์และวิธีการสังเคราะห์	22
ตารางที่ 3 ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ	26
ตารางที่ 4 ความถี่ในการใช้สารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ	28
ตารางที่ 5 ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ	29
ตารางที่ 6 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่	33
ตารางที่ 7 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบหลักของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด	36
ตารางที่ 8 ขนาด มุมเอียง และอุณหภูมิในการเดินระบบของเตาเผาแบบหมุนในอุตสาหกรรม	53
ตารางที่ 9 ค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์การกระจายและการไหลเวียนของ Jakura Lime	54
ตารางที่ 10 ผลลัพธ์ที่คำนวณได้สำหรับการเผาของ Jakura ในขนาดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการเผาที่ความดันเตาเผาที่ 100 mmH ₂ O	54
ตารางที่ 11 ขนาดของไซนเตาเผา	55
ตารางที่ 12 ผลของการเผาที่เวลาต่าง ๆ	56
ตารางที่ 13 การทำงานของเตาเผาแบบหมุนที่เผาไหม้โดยตรง	57
ตารางที่ 14 การใช้งานของเตาเผาแบบหมุนโดยอ้อม	57
ตารางที่ 15 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	66
ตารางที่ 16 การเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	67
ตารางที่ 17 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางเคมี	68
ตารางที่ 18 การเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี	69
ตารางที่ 19 สรุปเกณฑ์ในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม	71
ตารางที่ 20 อัตราส่วนเปลือกไข่ต่อเยื่อเปลือกไข่วิเคราะห์หลังล้างเปลือกไข่	75

ตารางที่ 21 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง.....	76
ตารางที่ 22 การวิเคราะห์ขนาดเปลือกไข่ด้วยตะแกรงร่อน.....	78
ตารางที่ 23 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง.....	82
ตารางที่ 24 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันด้วยวิธี EDS.	85
ตารางที่ 25 พีคของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction	87
ตารางที่ 26 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	91
ตารางที่ 27 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์.....	93
ตารางที่ 28 %Yield ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน.....	93
ตารางที่ 29 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง.....	94
ตารางที่ 30 พีคของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction.....	95
ตารางที่ 31 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ	101
ตารางที่ 32 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ.....	102
ตารางที่ 33 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ ขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ	103
ตารางที่ 34 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์	106

ตารางที่ 35 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบกับหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์	107
ตารางที่ 36 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบกับหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์	107
ตารางที่ 37 %Yield ของความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกัน.....	108
ตารางที่ 38 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง.....	109
ตารางที่ 39 พีคของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction	111
ตารางที่ 40 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ....	115
ตารางที่ 41 แสดงช่วงที่คลื่น Infrared (IR) ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% เทียบกับหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์.....	117
ตารางที่ 42 % Yield ของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน	117
ตารางที่ 43 ค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาในระดับอุตสาหกรรม.....	118
ตารางที่ 44 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ซ้ำที่ 1	137
ตารางที่ 45 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ซ้ำที่ 2	138
ตารางที่ 46 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ซ้ำที่ 3	140
ตารางที่ 47 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ด้วยวิธี EDS.....	141
ตารางที่ 48 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ด้วยวิธี EDS ...	142
ตารางที่ 49 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS.....	142
ตารางที่ 50 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS.....	142
ตารางที่ 51 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 250 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS.....	143

ตารางที่ 52 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 53 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS.....	143
ตารางที่ 53 พีคของแคลเซียมออกไซด์ขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันโดยเทคนิค X-Ray Diffraction ซ้ำที่ 1	143
ตารางที่ 54 พีคของแคลเซียมออกไซด์ขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันโดยเทคนิค X-Ray Diffraction ซ้ำที่ 2	144
ตารางที่ 55 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ซ้ำที่ 1	144
ตารางที่ 56 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ซ้ำที่ 2	145
ตารางที่ 57 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้งหมด 6 ขนาด ซ้ำที่ 1	146
ตารางที่ 58 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่.....	147
ตารางที่ 59 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที	148
ตารางที่ 60 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที.....	149
ตารางที่ 61 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที.....	150
ตารางที่ 62 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%.....	151
ตารางที่ 63 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด	151
ตารางที่ 64 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที	152
ตารางที่ 65 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%.....	152
ตารางที่ 66 ช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด ซ้ำที่ 1	153

ตารางที่ 67 ช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด ซ้ำที่ 2	153
ตารางที่ 68 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน	154
ตารางที่ 69 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน	154
ตารางที่ 70 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของอัตราการบินเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน	155
ตารางที่ 71 แสดงการคำนวณรายรับรายจ่ายในการก่อสร้างเตาเผากรณีไม่มีการแยกเชื้อ	156
ตารางที่ 72 แสดงการคำนวณรายรับรายจ่ายในการก่อสร้างเตาเผากรณีมีการแยกเชื้อ	157



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างเปลือกไข่ไก่.....	7
ภาพที่ 2 โครงสร้างของไข่.....	8
ภาพที่ 3 ลักษณะสัณฐานวิทยา (a) สารตั้งต้น#1, (b) สารตั้งต้น#2, (c) ผง#1 และ (d) ผง#2.....	14
ภาพที่ 4 TEM และการกระจายขนาดอนุภาคของผง#1 (a, c) และผง#2 (b, d).....	14
ภาพที่ 5 กราฟผลการวิเคราะห์เทคนิคทางความร้อน TG and DTG (a) เปลือกไข่ (b) หอยเชอรี่ และ (c) หอยตลับลาย.....	15
ภาพที่ 6 กราฟ XRD แสดงลักษณะผลึกของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน.....	16
ภาพที่ 7 กระบวนการแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่.....	17
ภาพที่ 8 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อน ช่วงเวลา 2 ชั่วโมง: (a) บดและอบแห้ง, (b) 150 °C, (c) 250 °C, (d) 300 °C, (e) 400 °C, (f) 500 °C, (g) 600 °C, (h) 650 °C, (i) 700 °C, (j) 750 °C และ (k) 800 °C.....	18
ภาพที่ 9 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง.....	19
ภาพที่ 10 SEM ของเปลือกไข่ ใช้กำลังขยาย 8,000x.....	20
ภาพที่ 11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมออกไซด์ใช้กำลังขยาย 8,000x โดยแคลไซน์เปลือกไข่ที่ 800 °C เป็นเวลา 1 ถึง 4 ชั่วโมง, CaO-1 (A), CaO-2 (B), CaO-3 (C) และ CaO-4 (D).....	20
ภาพที่ 12 การสลายตัวทางความร้อน (TGA thermogram) ของเปลือกไข่ไก่.....	21
ภาพที่ 13 ระยะเวลาการกวนและความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมคลอไรด์กับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตลกผลึก.....	24
ภาพที่ 14 อุณหภูมิกับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตลกผลึก.....	25
ภาพที่ 15 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตลกผลึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน. 25	25
ภาพที่ 16 มุมมองแผนผังของกลไกของกิจกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์... 27	27

ภาพที่ 17 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate).....	31
ภาพที่ 18 ภาพถ่ายแสดงให้เห็นตะแกรงที่อยู่ด้านในของเตาเผามูลฝอย	31
ภาพที่ 19 อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่จ่ายเข้าตามส่วนต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้.....	32
ภาพที่ 20 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln).....	34
ภาพที่ 21 เตาเผาแบบหมุนที่ติดตั้งใช้งานจริง.....	34
ภาพที่ 22 ระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด	35
ภาพที่ 23 กระบวนการไพโรไลซิส-ก๊าซซิฟิเคชัน.....	37
ภาพที่ 24 (a) กรวยรับวัตถุดิบ (b) ส่วนป้อนวัตถุดิบ (c) ลื่นปิด-เปิดเตา (d) เตาเผาแบบหมุน (e) ช่องเปิด (f) ตัวป้อนแบบสกรู (g) ไบแกว (h) เปลือกเตา.....	38
ภาพที่ 25 โซนต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุน	40
ภาพที่ 26 ประเภทของลักษณะการไหลในเตาเผาแบบหมุน.....	41
ภาพที่ 27 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired kilns).....	42
ภาพที่ 28 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียว (Indirect-fired kilns)	43
ภาพที่ 29 ผลของอุณหภูมิต่อการเผาที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ.....	44
ภาพที่ 30 อิทธิพลของขนาดวัตถุดิบต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์.....	44
ภาพที่ 31 อิทธิพลของอุณหภูมิการแคลซ์ต์ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์..	45
ภาพที่ 32 เค้าโครงของเตาเผาแบบหมุน.....	45
ภาพที่ 33 รูปแบบการเคลื่อนตัวต่อความเร็วรอบและการเติมวัสดุในเตา	47
ภาพที่ 34 การกระจายตัวของความร้อนในวัตถุดิบเมื่อไม่มีไบแกว (ก) และการกระจายตัวของความร้อนในวัตถุดิบได้รับอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีไบแกวในเตา (ข).....	49
ภาพที่ 35 ลักษณะของไบแกวที่นิยมติดตั้งในเตาเผา.....	50
ภาพที่ 36 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเปลือกไข่.....	59
ภาพที่ 37 แผนผังขั้นตอนการศึกษาขนาดของเปลือกไข่ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้	61

ภาพที่ 38 แผนผังขั้นตอนการศึกษาความเร็วรอบในการหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้	63
ภาพที่ 39 แผนผังขั้นตอนการศึกษาอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้	65
ภาพที่ 40 a) เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด b) เครื่องปั่น	76
ภาพที่ 41 ขนาดเปลือกไข่ที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 6 ขนาด	77
ภาพที่ 42 ขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์สะสมที่ผ่านของเปลือกไข่.....	79
ภาพที่ 43 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า ของ.....	81
ภาพที่ 44 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่กับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า	82
ภาพที่ 45 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของ	84
ภาพที่ 46 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่าของแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน).....	85
ภาพที่ 47 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)	88
ภาพที่ 48 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด	88
ภาพที่ 49 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน).....	92
ภาพที่ 50 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที 97	
ภาพที่ 51 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)97	
ภาพที่ 52 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)	98
ภาพที่ 53 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที .	99

ภาพที่ 54 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)	105
ภาพที่ 55 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)	105
ภาพที่ 56 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน).....	106
ภาพที่ 57 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน).....	112
ภาพที่ 58 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%.....	113
ภาพที่ 59 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน).....	116
ภาพที่ 60 ระบบเตาเผาแบบหมุนขนาดต้นแบบ	119
ภาพที่ 61 ลักษณะตัวอย่างเปลือกไข่หลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน.....	132
ภาพที่ 62 ลักษณะตัวอย่างเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่หลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน	132
ภาพที่ 63 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรหลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน	133
ภาพที่ 64 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ทางเข้า.....	133
ภาพที่ 65 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ทางออก.....	134
ภาพที่ 66 ถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่.....	134
ภาพที่ 67 เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการ	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในกระบวนการผลิตสินค้ามักทำให้เกิดปัญหาเรื่องกากของเสียอุตสาหกรรมขึ้น การแก้ปัญหาของเสียอุตสาหกรรมนั้นมีอยู่หลายวิธีการแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วการบำบัดและกำจัดของเสียมักถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัด ส่งผลให้ต้นทุนของการผลิตสินค้าสูงขึ้นด้วย ในปัจจุบันแนวทางในการลดของเสียจากแหล่งกำเนิด การแปรรูปของเสียเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่น ๆ มักถูกมาใช้แทนหรือควบคู่กับกระบวนการบำบัดและกำจัดของเสียเนื่องจากเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด และบางครั้งยังสามารถใช้ประโยชน์จากการแปรรูปของเสียได้ด้วย ในส่วนของกระบวนการผลิตลูกไก่จะมีเปลือกไข่ที่ถูกลูกไก่เจาะออกมา ในหนึ่งปีจะมีเปลือกไข่เกิดขึ้นประมาณ 3,000 ตัน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดโดยการฝังกลบประมาณ 2,100,000 บาทต่อปี (บริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน), 2561) นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการหาพื้นที่ในการฝังกลบเพิ่มไม่ได้ เนื่องจากเกิดการต่อต้านจากประชาชน อีกทั้งการฝังกลบก่อให้เกิดแก๊สมีเทนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จากไก่มีรอยเท้าคาร์บอนเกิดมากขึ้น ดังนั้นการหาแนวทางใหม่ในการจัดการปัญหาเศษเปลือกไข่ที่เกิดขึ้นจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนและสำคัญ

โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ฟิลิแคลไซน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย เปลือกไข่ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก (96%) (Hincke et al., 2012) และเมื่อนำเปลือกไข่ไปเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $\geq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์เป็นผลผลิต จากการศึกษาการแคลไซน์เปลือกไข่ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) พบว่า การแคลไซน์เปลือกไข่จากซีพีเอฟที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์กว่าร้อยละ 98 (Pornchai, Putkham, & Putkham, 2016) แต่การใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) เป็นเตาเผาแบบกะซึ่งเผาเปลือกไข่ได้ที่ละน้อยและในการเผาแต่ละครั้งต้องทำการเกลี่ยเปลือกไข่ในถัวยระเหยให้บาง ๆ เพื่อที่จะได้รับความร้อนและเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์อย่างสมบูรณ์ ทางบริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จึงมีความต้องการที่จะพัฒนาการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเศษเปลือกไข่ให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อใช้ทดแทนการซื้อใช้ปูนขาวร้อน (แคลเซียมออกไซด์) ในการล้างทำความสะอาดฟาร์มไก่ทั้ง 40 ฟาร์ม ซึ่งปัจจุบันฟาร์มเลี้ยงไก่บริษัทใช้แคลเซียมออกไซด์ในการล้างฟาร์มไม่น้อยกว่า 600 ตันต่อปี ทำให้เกิดต้นทุนในการซื้อปูน

ขาร้อนทางการค้าประมาณ 3,000,000 บาทต่อปี (บริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน), 2561) นอกจากนี้ปูนขาร้อนที่ผลิตได้เองเกินความต้องการ ทางบริษัทยังสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดไก่ได้ และโดยฟาร์มเลี้ยงไก่สามารถนำไปโอดีเซลมาใช้แทนน้ำมันดีเซล เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สำหรับการล้างโรงเรือน ประมาณ 2,500 ลิตร ต่อฟาร์ม ต่อ รุ่น จำนวน 40 ฟาร์ม เท่ากับ 100,000 ลิตรต่อปี ช่วยลดต้นทุนค่าน้ำมันดีเซลได้อีกประมาณ 3,000,000 บาทต่อปี (บริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน), 2561)

กระบวนการดั้งเดิมของบริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ใช้กระบวนการทางความร้อนในการแปรรูปเปลือกไข่ให้เป็นแคลเซียมออกไซด์ บริษัทได้ทำการทดลองนำเปลือกไข่ไปกองเผาในเตาแบบห้องเดี่ยว (Single Chamber) ที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งเป็นเตาขนาดอุตสาหกรรมในฟาร์มที่มีอยู่ ซึ่งเป็นเตาเผาแบบกะ พบว่ามีเฉพาะเปลือกไข่ที่อยู่ด้านบนของกองเท่านั้นที่เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ ส่วนเปลือกไข่ที่อยู่ด้านล่างลงไปเปลี่ยนรูปไม่หมดและยังคงเป็นเปลือกไข่อยู่ ดังนั้นการแปรรูปเปลือกไข่ให้เป็นแคลเซียมออกไซด์โดยใช้เตาเผาแบบเดิมนี้อาจไม่เป็นที่ต้องการ จึงต้องการกระบวนการที่พัฒนาการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ให้ผลิตได้ทีละมาก ๆ และสามารถเผาได้อย่างต่อเนื่อง

บริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จึงมีความต้องการปรับเปลี่ยนเตาเผาเป็นแบบหมุน (Rotary kiln) ซึ่งเป็นเตาเผาแบบต่อเนื่องและทำให้เปลือกไข่ได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงระหว่างเคลื่อนตัวไปตามแนวยาวของเตาเผาแบบหมุน การจะนำเตาเผาแบบหมุนมาใช้จำเป็นต้องมีข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและเดินระบบ อย่างไรก็ตามการพัฒนากระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเศษเปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุนระดับอุตสาหกรรมนั้นจำเป็นต้องใช้มีข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบระบบเตาเผา ดังนั้นการวิจัยนี้จึงถือเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เกิดการพัฒนาให้เป็นระบบการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

- 2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบเตาเผาต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 2.4 เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสรุปเป็นเกณฑ์การออกแบบ (Criteria design) เตาเผา ระดับอุตสาหกรรม
- 2.5 เพื่อประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษามีขอบเขตดังนี้

1.3.1 เปลือกไข่เหลือทิ้งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้นำมาจากโรงฟักไข่สูงเนินในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตำบลมะเกลือเก่า อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา

1.3.2 เต้าเผาที่ใช้ในการศึกษาเป็นเต้าเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการ

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลองย่อย ได้แก่

1.3.2.1 ขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน คือ เปลือกไข่, เปลือกไข่ที่มีเยื่อ, ผงเปลือกไข่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ขนาด 250 ไมโครเมตร และผงเปลือกไข่ขนาด 53 ไมโครเมตร

1.3.2.2 ความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

1.3.2.3 อัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกันโดยคิดจากร้อยละของปริมาตรเต้าเผา คือ 5% (10.3 กรัม), 10% (20.6 กรัม) และ 15% (30.9 กรัม)

โดยทุกชุดการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิในการแคลไซน์ที่ 800 องศาเซลเซียส และ มุมเอียงของเต้าเผา 5 องศา

1.3.3 วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี ดังนี้

1.3.3.1 คุณลักษณะทางกายภาพ

1) วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Sieve Shaker

2) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

1.3.3.2 คุณลักษณะทางเคมี

1) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD)

2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence spectrophotometer; XRF)

3) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FTIR

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบขนาดเปลือกไข่ที่เหมาะสมต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 1.4.2 ทราบความเร็วรอบของเตาเผาที่เหมาะสมต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 1.4.3 ทราบอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่เหมาะสมต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้
- 1.4.4 สามารถสรุปเป็นเกณฑ์การออกแบบ (Criteria design) เตาเผาระดับอุตสาหกรรมได้
- 1.4.5 ได้ทราบถึงต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

1.5 นิยามศัพท์

1.5.1 ตัวอย่างของเปลือกไข่

- 1.5.1.1 Eggshell; ES หมายถึง เปลือกไข่
- 1.5.1.2 Eggshell + Eggshell Membrane; ESM หมายถึง เปลือกไข่ที่มีเยื่อ
- 1.5.1.3 Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron; ESMP-500 หมายถึง ผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร
- 1.5.1.4 Eggshell Powder 500 Micron; ESP-500 หมายถึง ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร
- 1.5.1.5 Eggshell Powder 250 Micron; ESP-250 หมายถึง ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร
- 1.5.1.6 Eggshell Powder 53 Micron; ESP-53 หมายถึง ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร

1.5.2 ตัวอย่างของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่

- 1.5.2.1 Calcium Oxide from Eggshell; CaO[ES] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่
- 1.5.2.2 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane; CaO[ESM] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อ
- 1.5.2.3 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron; CaO[ESMP-500] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร
- 1.5.2.4 Calcium Oxide from Eggshell Powder 500 Micron; CaO[ESP-500] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร

1.5.2.5 Calcium Oxide from Eggshell Powder 250 Micron; CaO[ESP-250] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร

1.5.2.6 Calcium Oxide from Eggshell Powder 53 Micron; CaO[ESP-53] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร

1.5.3 ตัวอย่างของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5 1 2 และ 4 รอบต่อนาที

1.5.3.1 Calcium Oxide from Eggshell Speed 0.5 RPM; CaO[ES-0.5] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที

1.5.3.2 Calcium Oxide from Eggshell Speed 1 RPM; CaO[ES-1] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

1.5.3.3 Calcium Oxide from Eggshell Speed 2 RPM; CaO[ES-2] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

1.5.3.4 Calcium Oxide from Eggshell Speed 4 RPM; CaO[ES-4] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที

1.5.3.5 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Speed 0.5 RPM; CaO[ESM-0.5] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที

1.5.3.6 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Speed 1 RPM; CaO[ESM-1] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

1.5.3.7 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Speed 2 RPM; CaO[ESM-2] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

1.5.3.8 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Speed 4 RPM; CaO[ESM-4] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที

1.5.3.9 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron Speed 0.5 RPM; CaO[ESMP-0.5] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที

1.5.3.10 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron Speed 1 RPM; CaO[ESMP-1] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที

1.5.3.11 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron Speed 2 RPM; CaO[ESMP-2] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 2 รอบต่อนาที

1.5.3.12 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron Speed 4 RPM; CaO[ESMP-4] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 4 รอบต่อนาที

1.5.4 ตัวอย่างของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5% 10% และ 15% คัดจากร้อยละของปริมาตรเตาเผา

1.5.4.1 Calcium Oxide from Eggshell Feed 5%; CaO[ES-5%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5%

1.5.4.2 Calcium Oxide from Eggshell Feed 10%; CaO[ES-10%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 10%

1.5.4.3 Calcium Oxide from Eggshell Feed 15%; CaO[ES-15%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 15%

1.5.4.4 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Feed 5%; CaO[ESM-5%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5%

1.5.4.5 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Feed 10%; CaO[ESM-10%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 10%

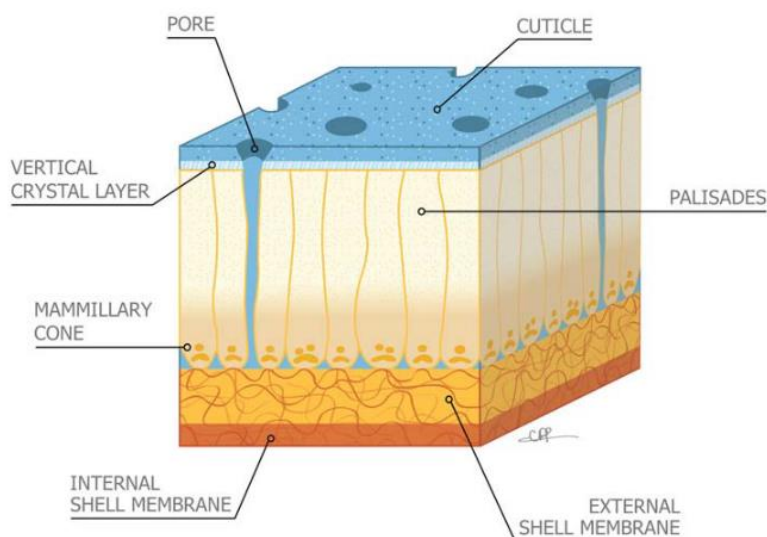
1.5.4.6 Calcium Oxide from Eggshell + Eggshell Membrane Feed 15%; CaO[ESM-15%] หมายถึง แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อนเปลือกไข่ 15%

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไข่ (Egg)

ไข่เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิตอาหารทั้งในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากไข่มีราคาถูกกว่าเนื้อสัตว์และอุดมไปด้วยสารอาหาร ได้แก่ โปรตีน 16.68% ไขมัน 13.26% เกลือแร่ 1.09% วิตามินบี 0.58% รวมทั้งวิตามินอีเอและดี (วิชัย ดำรงโกภรณ์, 2555) ซึ่งองค์ประกอบของเปลือกไข่ประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต 96% สารอินทรีย์ 2% แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และธาตุอื่น ๆ อีก 2% ของน้ำหนักเปลือกไข่แห้ง (Hincke et al., 2012)

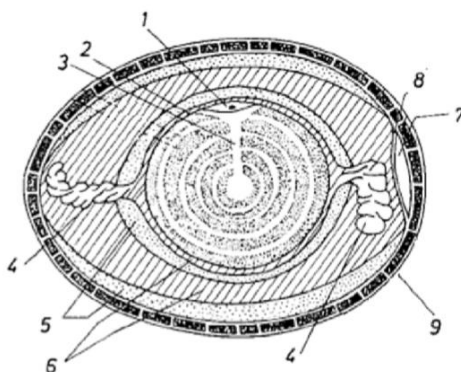


ภาพที่ 1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างเปลือกไข่ไก่

ที่มา: (Hincke et al., 2012)

พจนานุกรมศัพท์โตชีวะ

2.1.1 องค์ประกอบของไข่และเปลือกไข่



(1) จุดเจริญ (germinal disc), (2) เยื่อหุ้มไข่แดง (yolk membrane), (3) ไข่แดง (egg yolk), (4) ขั้วไข่ (chalaza), (5) ไข่ขาวชั้นนอกและชั้นใน (albumen thin gel), (6) ไข่ขาว (albumen thick gel), (7) ช่องอากาศ (air cell), (8) เยื่อเปลือกไข่ (shell membrane), (9) เปลือกไข่ (egg shell)

ภาพที่ 2 โครงสร้างของไข่

ที่มา: (วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์, 2555)

2.1.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเปลือกไข่

เปลือกไข่มีลักษณะโค้งติดกับเยื่อหุ้มไข่และโค้งลดหลั่นกันเป็นรัศมี (radial) จากศูนย์กลางด้วยการเรียงตัวของผลึกซึ่งแบ่งเป็น 2 พวก พวกหนึ่งเป็นอินทรียสารทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเซลล์ (organic matrix) เป็นโปรตีนแบบเดียวกับพังผืดกระดูก (collagen-like) ที่ประสานโครงยึดกัน มีประมาณ 1/5 ของโครงสร้างเปลือกไข่ พวกสองเป็นส่วนประกอบของอินทรียสารต่าง ๆ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตมีอยู่มากที่ด้านนอกเคลือบคลุมเป็นเนื้อพื้น (matrix) ของเปลือก

ส่วนประกอบของเปลือกไข่สามารถแบ่งเป็นชั้นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (นราธิป วิทยากร, 2557)

2.1.1.1.1 เคลือบผิวไข่ (cuticle)

ประกอบด้วยโปรตีนเป็นหลักเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของเปลือกไข่ทั้งหมด มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน มีหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความชื้น การผ่านเข้าไปในไข่ของเชื้อจุลินทรีย์และมีคุณสมบัติให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ เคลือบผิวไข่ สามารถหลุดออกได้ง่ายโดยการล้างน้ำหรือแช่ในสารละลายกรด

2.1.1.1.2 รูปลอกไข่ (pore)

เป็นรูเปิดบริเวณผิวเปลือกไข่มีลักษณะเป็นรูปร่างต่าง ๆ เชื่อมโยงจากภายนอกผิวไข่เข้าไปต่อเชื่อมกับช่องอากาศที่เปลือกชั้นใน (mammillary layer) ขนาดของรูปลอกไข่มีตั้งแต่ 10-30 ไมครอน โดยธรรมชาติที่เปลือกไข่จะมีอยู่ประมาณ 7,500-10,000 รูต่อเปลือกไข่หนึ่งฟอง ซึ่งในแต่ละพื้นที่ของเปลือกไข่จะมีจำนวนรูไม่เท่ากัน

2.1.1.1.3 เปลือกชั้นนอก (spongy layer)

เปลือกไข่ชั้นนอกมีความหนา 2 ใน 3 ของเปลือกไข่ทั้งหมดอยู่ติดกับเปลือกชั้นใน ประกอบด้วยผลึกแคลไซต์ (Calcite) เล็ก ๆ ผนึกกันแน่นเป็นหลักและจะมีผลึกแคลเซียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบรองลงมา เปลือกไข่ชั้นนอกนี้จะให้ความเป็นรูพรุนและความแข็งแรงแก่เปลือกไข่ โดยความแน่นและแข็งแรงจะมีมากที่ผิวด้านนอกเพราะมีลักษณะเป็นผลึกอยู่แน่น นอกจากนี้มีรูเล็ก ๆ จำนวนมากเชื่อมโยงจากเปลือกไข่ชั้นในมาเปิดที่ชั้นนี้เป็นรูพรุนแบบฟองน้ำแต่แข็งแรงมากอยู่ด้วย

2.1.1.1.4 เปลือกไข่ชั้นใน (mammillary layer)

เป็นชั้นที่บางของเปลือกคือ 1/3 ของความหนาของเปลือกไข่อยู่ติดกับเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอก ประกอบด้วยปุ่มพื้นหยาบ ๆ จำนวนมาก (mammillae) ปุ่มเหล่านี้ผนึกเป็นชั้นเดียวอยู่ติดกับเยื่อหุ้มไข่ปลายปุ่มผายออกไปเปิดที่เยื่อหุ้มไข่ชั้นในเป็นทางผ่านของอากาศให้กระจายไปทั่วเปลือกชั้นนี้ ปุ่มพื้นเปลือกประกอบด้วยเกลือแร่ที่ไม่เป็นผลึกกระจายอยู่รอบผิวพื้นโปรตีนของเปลือก (granular matrix material)

2.1.1.1.5 เยื่อหุ้มไข่ (membrane)

เยื่อหุ้มไข่ประกอบด้วยเส้นใยทอประสานกันเป็นตาข่ายจำนวนมากแบ่งเป็น 2 ชั้น ได้แก่ เยื่อชั้นในล้อมรอบไข่ขาวส่วนนอกและเยื่อชั้นนอกอยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือกที่ด้านข้างของเปลือกไข่เนื้อเยื่อทั้งสองแยกออกจากกันเป็นช่องอากาศของไข่ ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มไข่ทั้งหมดประมาณ 0.07-0.11 mm

2.1.1.1.5.1 เยื่อชั้นใน (Inner membrane)

เป็นชั้นบางเรียบหนาประมาณ 2.7 ไมครอนทำหน้าที่ล้อมรอบไข่ขาว โดยทั่วไปเยื่อชั้นในและชั้นนอกจะเชื่อมติดกัน ยกเว้นเมื่อไข่มีอายุมากขึ้นส่วนที่ด้านข้างของเปลือกไข่จะเกิดเป็นช่องอากาศของไข่หรือโพรงอากาศ (Air cell) เมื่อไข่ออกมาใหม่ๆ อุณหภูมิของไข่ยังสูงจึงไม่มี

ช่องว่าง เมื่อไข่เย็นลงของเหลวภายในไข่จะหดตัวทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้นและถ้าหากมีน้ำระเหยออกไปมากจะทำให้โพรงอากาศใหญ่ขึ้น

2.1.1.1.5.2 เยื่อชั้นนอก (Out membrane)

เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือก เยื่อชั้นนี้จะติดแน่นกับเปลือกชั้นในและขนานไปกับเปลือกไข่ เยื่อชั้นนอกนี้แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นประสานกันด้วยร่างแหโปรตีน ชั้นนอกสุดเป็นเส้นใยโปรตีนประเภทเคราตินมีลักษณะเป็นเส้นแบนขนาด 2-15 ไมครอน เส้นใยชั้นกลางส่วนใหญ่เป็นประเภทมิวซินประสานขนานกับเปลือกไข่ขนาด 8 ไมครอนมีลักษณะเป็น 2 ชั้นย่อยที่ติดกันแนบสนิทจนเกือบเป็นเนื้อเดียวกันและแยกออกจากกันได้ยาก ส่วนชั้นในจะเป็นกิ่งก้านสาขาของเส้นเคราตินเล็ก ๆ ประสานกันเป็นร่างแหซึ่งมีทั้งขนานและตั้งฉากกับผิวไข่ทำให้ชั้นนี้เหนียวขึ้นและมีความหนาประมาณ 14.8 ไมครอน

2.1.2 แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่

เทคโนโลยีที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเปลือกไข่เหลือทิ้งให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปเปลือกไข่ ดังนี้

2.1.2.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่แล้วในเปลือกไข่ การนำไปใช้ประโยชน์อาศัยเทคโนโลยีชาวบ้านคือการตากแห้งแล้วนำเปลือกไข่ไปบด เปลือกไข่บดสามารถใช้ทำปุ๋ยหรือใช้ไล่มดได้เนื่องจากมีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เปลือกไข่บดสามารถใช้ปรับสภาพดินหรือน้ำที่เป็นกรดให้เป็นกลางมากขึ้นได้ นอกจากนี้มีรายงานการใช้เปลือกไข่บดเป็นตัวดูดซับโลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เป็นต้น (วิชัย ดำรงโภคภักดิ์, 2555)

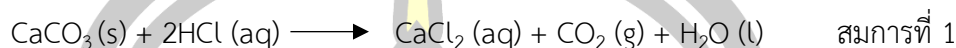
2.1.2.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

แคลเซียมออกไซด์ได้จากการใช้เทคโนโลยีการเผาเปลือกไข่ที่อุณหภูมิสูงในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนเรียกว่าระบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่ากระบวนการแคลเซเนชัน (Calcination)

แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่จะมีคุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือที่รู้จักกันในชื่อปูนขาว (Lime) ที่มีจำหน่ายทั่วไปจึงสามารถนำไปใช้ปรับสภาพของดินและน้ำที่เป็นกรด ใช้ในการผลิตโซดาไฟ สารฟอกขาว เป็นส่วนผสมของปูนฉาบ และนอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารดูดความชื้นและสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้อีกด้วย (วิชัย ดำรงโภคภักดิ์, 2555)

2.1.2.3 แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)

การผลิตแคลเซียมคลอไรด์จากเปลือกไข่ต้องอาศัยเทคโนโลยีการสกัดด้วยกรดโดยแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่จะทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ (HCl) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคลอไรด์โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 1



แคลเซียมคลอไรด์สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง โดยใช้เป็นสารเพิ่มความแน่นเนื้อในผลไม้ เช่น แคนตาลูป ฝรั่ง และผสมในไอศกรีมเพื่อทำให้เนื้อสัมผัสดีขึ้น นอกจากนี้ในด้านสิ่งแวดล้อมแคลเซียมคลอไรด์สามารถจับกับโลหะหนักได้ดีอีกด้วย ตัวอย่างเช่นการชะล้างแคลเซียมที่ปนเปื้อนในดิน (วิชัย ดำรงโกคภรณ์, 2555)

2.1.2.4 คอลลาเจน (Collagen)

คอลลาเจนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่พบมากในร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม (ประมาณร้อยละ 25 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมดในร่างกาย) คอลลาเจนทำหน้าที่เป็นเส้นใยเชื่อมโยงและพยุงเนื้อเยื่อต่าง ๆ เช่น ผิวหนัง เส้นเอ็น กล้ามเนื้อ กระดูก และฟัน เนื่องด้วยประโยชน์ที่มากมายส่งผลให้คอลลาเจนเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง โดยเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข่มีคอลลาเจนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 10 จึงเป็นแหล่งวัตถุดิบที่น่าสนใจในการผลิตคอลลาเจนราคาถูก การผลิตคอลลาเจนจากเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข่อาศัยเทคโนโลยีการสกัดโดยการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ (Acid-pepsin Digestion) จากนั้นจึงทำการแยกคอลลาเจนออกมาโดยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือ (วิชัย ดำรงโกคภรณ์, 2555)

พหุ ประ โท ชี เว

2.2 การสังเคราะห์และคุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์

2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป

แคลเซียมออกไซด์ (CaO) สามารถสังเคราะห์ได้โดยการสลายตัวทางความร้อนของ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) โดยสามารถทำได้โดยการเผา (Calcination) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของ คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้โดยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จะรวมตัวกับแคลเซียมออกไซด์แล้วกลับไปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เนื่องจากความดันที่ได้จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสมดุลระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งความดันแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความดันจึงเพิ่ม สูงขึ้นด้วย (ธนภรณ์ ปวงแก้ว, 2555)

2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

ปัจจุบันในกระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์นิยมใช้วัตถุดิบจากแหล่งใหญ่ๆ ก็คือ แหล่งธรรมชาติจำพวกหินปูน รongลงมาก็คือสารเคมีและของเสียจำพวกเปลือกไข่ไก่ เปลือกหอย โดย จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.2.1 วัสดุธรรมชาติ

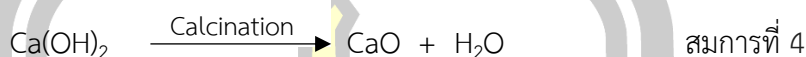
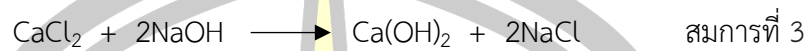
การนำวัสดุธรรมชาติที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบมาเผาที่อุณหภูมิสูง โดยวัสดุ ธรรมชาติที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ได้แก่ หินปูนแคลไซต์ โดโลไมต์ ซึ่งการสังเคราะห์ทำโดยนำหินปูน แคลไซต์ โดโลไมต์มาบดละเอียดและนำไปเผาให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 650 °C จะทำ ให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2 (อัจฉรา อิ่มคำ พุฒคำ และ อภิพงษ์ พุฒคำ, 2557)



2.2.2.2 สารเคมี

จากการศึกษาของ Mirghiasi และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาอนุภาคนาโนของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยการเผาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)₂ ซึ่งถูกสังเคราะห์โดยการเพิ่ม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 1 และ 2 M ตามลำดับ ในสารละลาย CaCl₂ · 2H₂O โดย

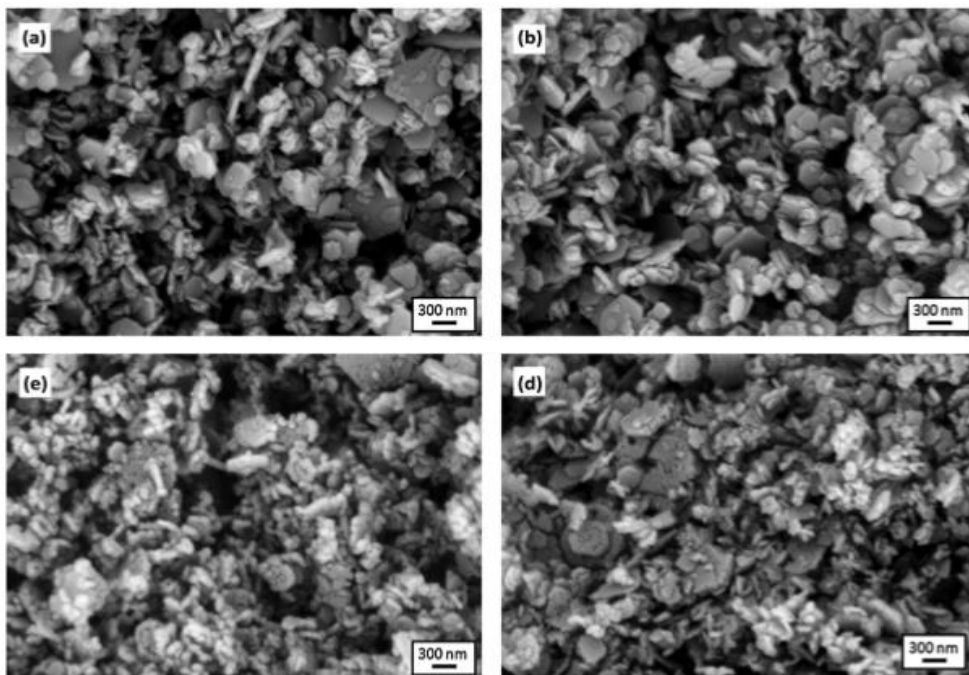
ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวสารอินทรีย์และเครื่องมือที่ซับซ้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแสดงสมการที่ 3 และ 4 (Mirghiasi, Bakhtiari, & Darezereshki, 2014)



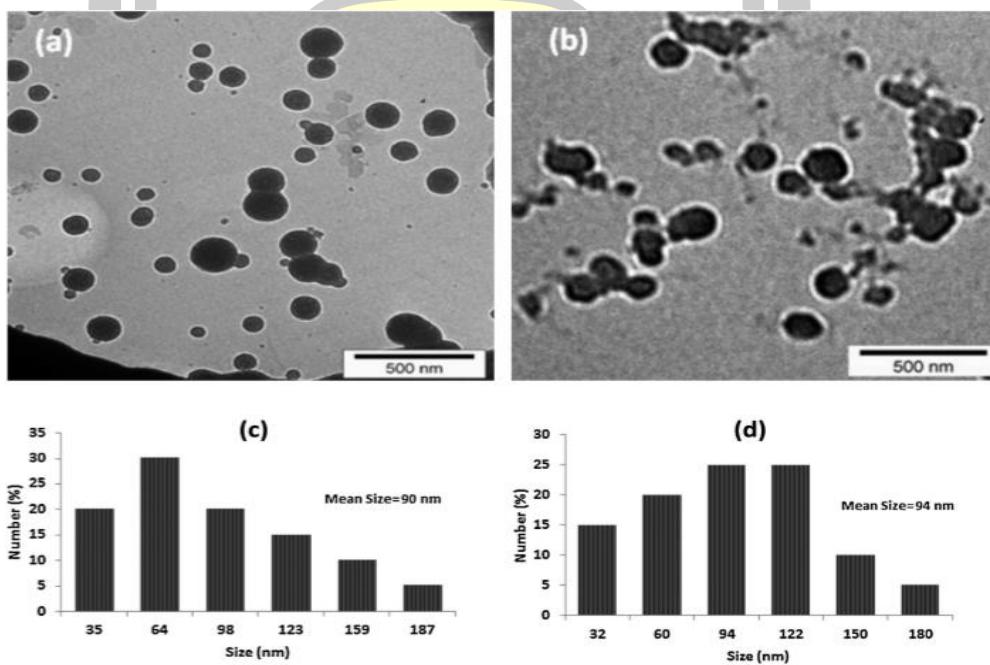
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์พบว่า ภาพที่ 3a และ 3b ลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นรูปร่างหกเหลี่ยม ส่วนแคลเซียมออกไซด์ในภาพที่ 3c และ 3d หลังจากการเผารูปทรงหกเหลี่ยมเปลี่ยนเป็นทรงกลม และจากภาพที่ 4 วิเคราะห์ TEM และการกระจายขนาดอนุภาคของผงแคลเซียมออกไซด์ # 1 (a, c) และผง # 2 (b, d) พบว่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีรูปร่างทรงกลม และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 90 และ 94 นาโนเมตร สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1 และ 2 M ตามลำดับ ซึ่งการศึกษารั้วนี้สามารถผลิตอนุภาคนาโนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ได้โดยใช้กระบวนการทางความร้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 เป็นสารตั้งต้นที่ 650°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอนุภาคสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและก๊าซตัวดูดซับได้

คำอธิบายของภาพที่ 3 :

- สารตั้งต้น#1 คือ แคลเซียมคลอไรด์ CaCl_2 0.5 M + โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 1 M ได้เป็น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2
- สารตั้งต้น#2 คือ แคลเซียมคลอไรด์ CaCl_2 0.5 M + โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 2 M ได้เป็น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2
- ผง#1 คือ Ca(OH)_2 ที่ได้จากสารตั้งต้น#1 นำไปเผาที่ 600°C เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ได้เป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO)
- ผง#2 คือ Ca(OH)_2 ที่ได้จากสารตั้งต้น#2 นำไปเผาที่ 600°C เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ได้เป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO)



ภาพที่ 3 ลักษณะสัณฐานวิทยา (a) สารตั้งต้น#1, (b) สารตั้งต้น#2, (c) ผง#1 และ (d) ผง#2
ที่มา: (Mirghiasi et al., 2014)

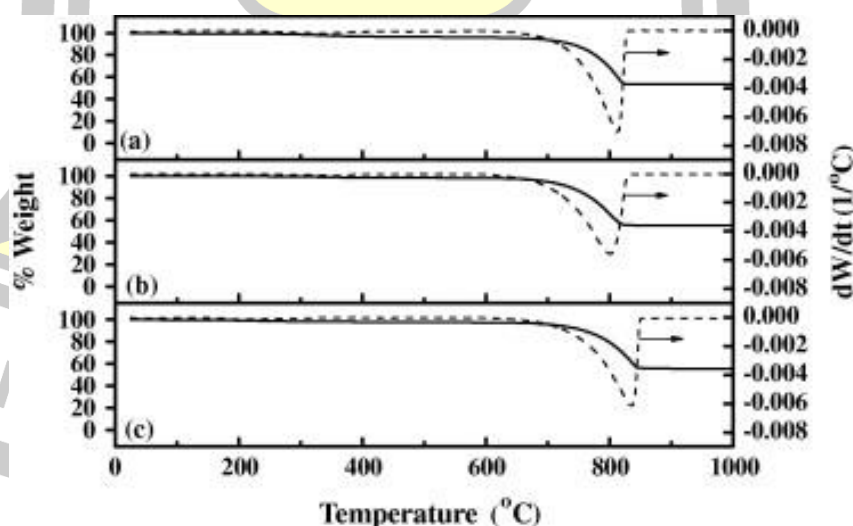


ภาพที่ 4 TEM และการกระจายขนาดอนุภาคของผง#1 (a, c) และผง#2 (b, d)
ที่มา: (Mirghiasi et al., 2014)

2.2.2.3 ของเสีย

ของเสียที่นำมาใช้ในการผลิตแคลเซียมออกไซด์ต้องมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น เปลือกหอย เปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่เป็ด ในส่วนของเปลือกหอย เปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่เป็ดพบว่าประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่า 98 % โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ,ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) โดยที่เปลือกจะต้องล้างด้วยน้ำเปล่าเพื่อล้างดินและชำระสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ แล้วจึงทำให้แห้ง และนำเปลือกมาบดให้มีขนาดในช่วง 100 - 325 Mesh (0.044 - 0.149 มิลลิเมตร) จากนั้นจึงนำไปเผาให้ความร้อนที่ความร้อนต่างกัน แล้วนำเปลือกที่ผ่านการเผาไปวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของวัสดุด้วยเทคนิคทางความร้อนคือ Differential Scanning Calorimetry (DSC) Thermogravimetric Analysis (TGA) แสดงในภาพที่ 5 และวิเคราะห์ด้วย Powder X-ray Diffraction (PXRD) เพื่อศึกษาลักษณะผลึกของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาดังแสดงในภาพที่ 6

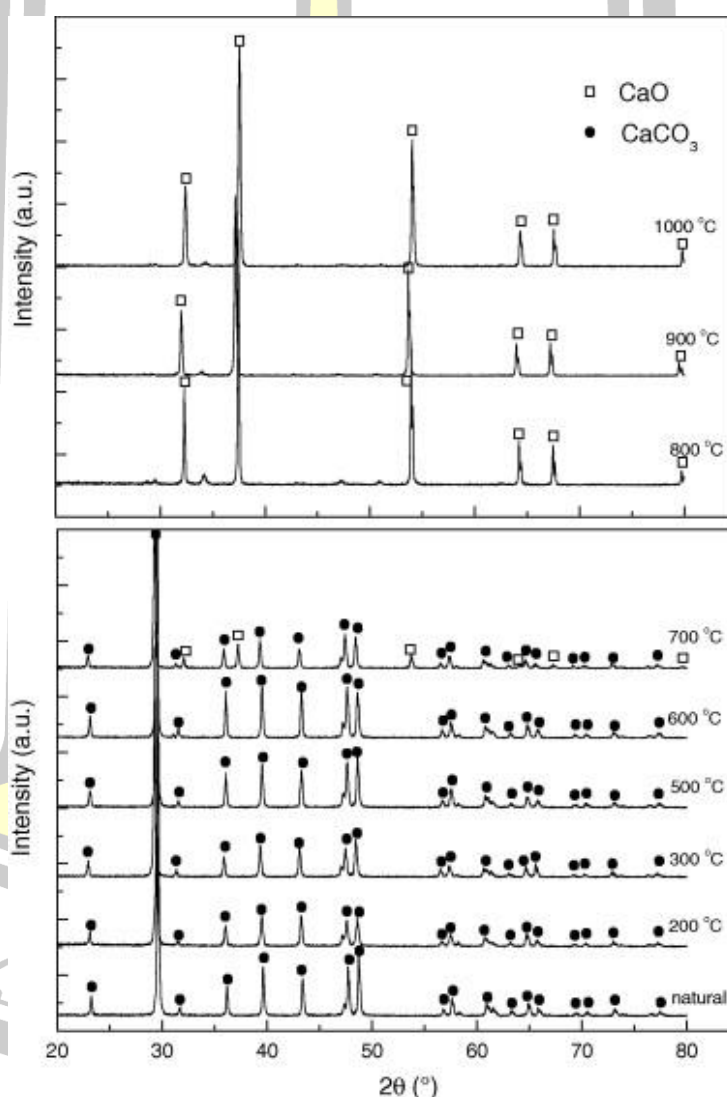
จากการศึกษาของ Viriya-empikul และคณะ (2010) ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของวัสดุด้วยเทคนิคทางความร้อน คือ Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่า เปลือกไข่ หอยเชอร์รี่ และหอยตลับลาย มีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 700 - 850 °C อยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนัก สามารถบอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักเริ่มต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแคลเซียมออกไซด์จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในภาพที่ 5



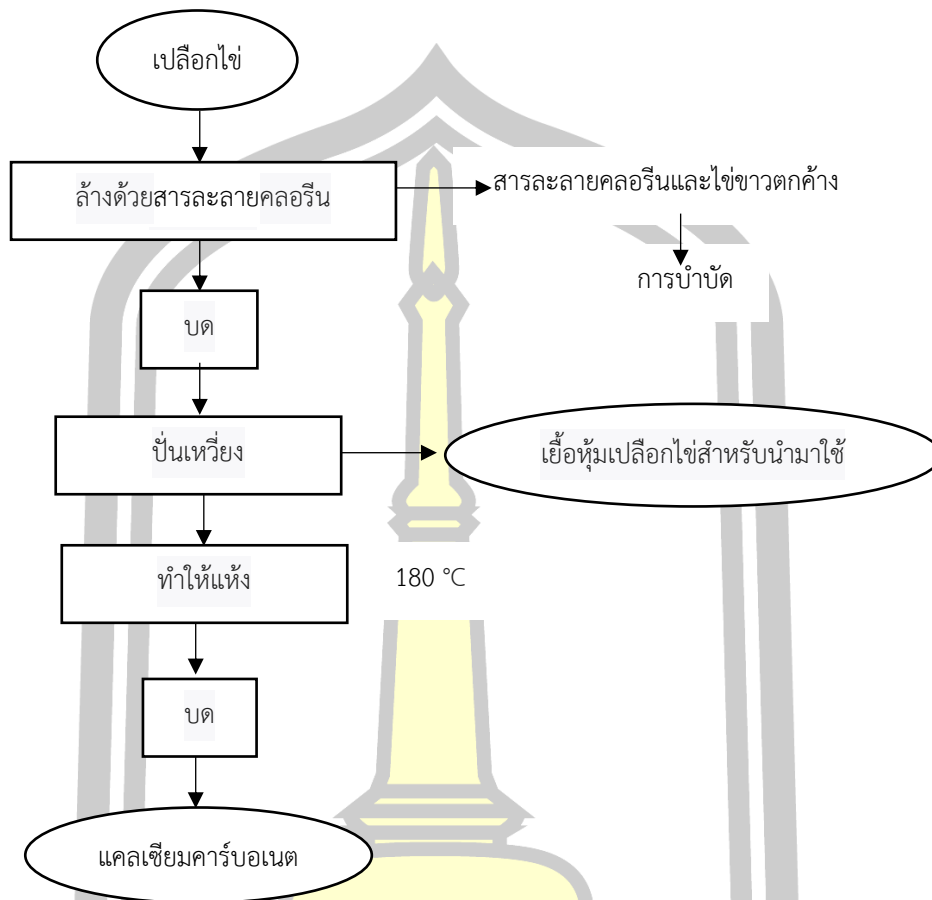
ภาพที่ 5 กราฟผลการวิเคราะห์เทคนิคทางความร้อน TG and DTG (a) เปลือกไข่ (b) หอยเชอร์รี่ และ (c) หอยตลับลาย

ที่มา: (Viriya-empikul et al., 2010)

จากการศึกษาของ Wei และคณะ (2009) ได้ทำการวิเคราะห์ด้วย Powder X-ray Diffraction (PXRD) เพื่อศึกษาลักษณะผลึกของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผา พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ของเปลือกหอยและเปลือกไข่เป็ดจะเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ ขึ้นไป ส่วนเปลือกไข่ไก่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อุณหภูมิ 800°C ขึ้นไป นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมคือตั้งแต่ 2 ชั่วโมงขึ้นไป ส่วนการให้ความร้อนกับเปลือกไข่ที่ 800°C ในสภาพอากาศปกติกับการให้ความร้อนในสภาวะที่ใช้แก๊สไนโตรเจน พบว่าให้ผลในการเปลี่ยนรูปจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟ XRD แสดงลักษณะผลึกของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน
ที่มา: (Wei, Xu, & Li, 2009)



ภาพที่ 7 กระบวนการแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่
ที่มา: (Oliveira, Benelli, & Amante, 2013)

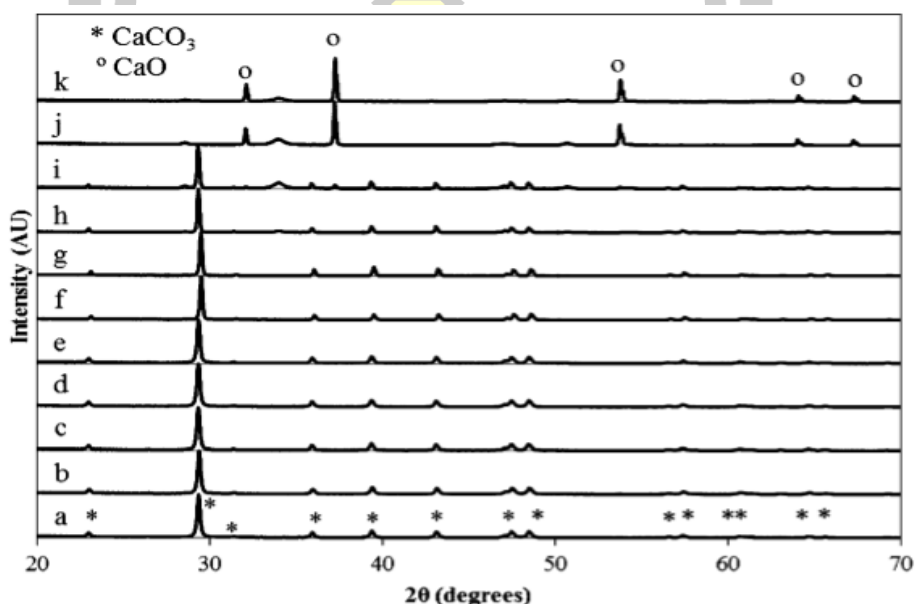
โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่มีส่วนประกอบที่สำคัญก็คือ ผลึกแคลไซต์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate Calcite) และสารอินทรีย์ปนอยู่เล็กน้อย และในเปลือกไข่นั้นประกอบด้วยชั้นเมมเบรน (Shell Membrane) ซึ่งเป็นไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ติดมาด้วย หากทำการแยกเยื่อออกจากเปลือกก็สามารถนำไปปรับสภาพและใช้ในงานอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้ การแยกเยื่อเปลือกไข่สามารถทำได้โดยแช่เปลือกไข่ในสารละลายคลอรีนหรือในสารละลายกรดให้เยื่อเปลือกไข่หลุดออกจากเปลือก จากนั้นทำการแยกเยื่อเปลือกไข่ไปใช้งาน ดังภาพที่ 7 หากไม่ต้องการเยื่อเปลือกไข่ไปใช้งาน การเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C ทำให้เยื่อเปลือกไข่สลายตัวไม่ส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ต้องการผลิต

2.2.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์

2.2.2.1 กระบวนการทางความร้อน

2.2.2.1.1 การใช้อุณหภูมิต่ำจะได้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการศึกษาของ Cree and Rutter (2015) โดยการวิเคราะห์ค่า XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนช่วงเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 150 ถึง 650 °C เกิดผลึกแร่ธาตุของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนอุณหภูมิที่ 650 °C แคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิที่ 700 °C เริ่มเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ และอุณหภูมิที่ 750 และ 800 °C เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ ดังภาพที่ 8



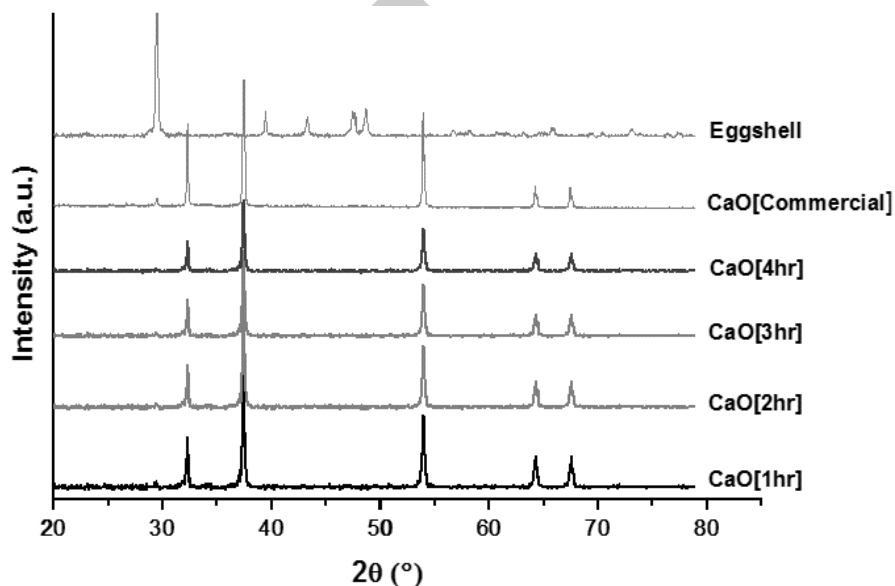
ภาพที่ 8 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนช่วงเวลา 2 ชั่วโมง: (a) บดและอบแห้ง, (b) 150 °C, (c) 250 °C, (d) 300 °C, (e) 400 °C, (f) 500 °C, (g) 600 °C, (h) 650 °C, (i) 700 °C, (j) 750 °C และ (k) 800 °C

ที่มา: (Cree & Rutter, 2015)

2.2.2.1.2 การใช้อุณหภูมิสูงจะได้เป็นแคลเซียมออกไซด์

จากการศึกษาของ Pornchai และคณะ (2016) ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) เศษเปลือกไข่ที่ผ่านการกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 9 พบว่า

การแคลไซน์ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมงสามารถสังเคราะห์ได้ผลึกแคลเซียมออกไซด์และผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตจากเปลือกไข่นั้นมีความบริสุทธิ์เทียบได้กับผลึกแคลเซียมออกไซด์ทางการค้า



ภาพที่ 9 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง
ที่มา: (Pornchai et al., 2016)

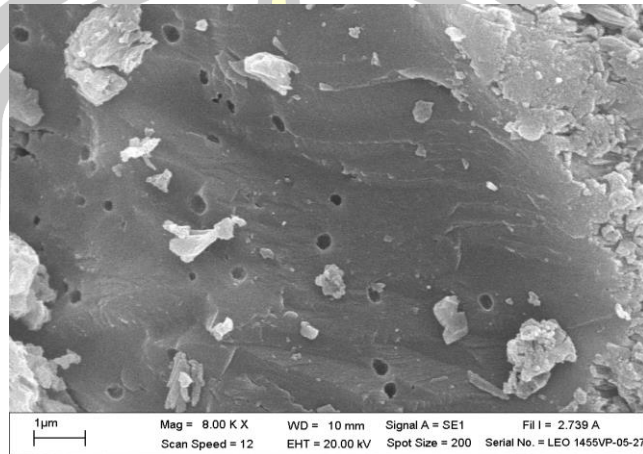
องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่แคลไซน์จากเปลือกไข่พบว่า ระยะเวลาในการแคลไซน์ให้ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ 97.9 - 98 % ซึ่งเทียบเท่ากับเกรดการค้า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่แคลไซน์จากเปลือกไข่

Element (%w)	CaO-1	CaO-2	CaO-3	CaO-4	Commercial CaO	Eggshell
CaO	97.9	98.0	97.9	97.9	97.42	68.2
MgO	0.977	0.984	1.01	1.01	1.63	0.459
P ₂ O ₅	0.543	0.530	0.579	0.532	0.52	0.396
Na ₂ O	0.223	0.162	0.171	0.161	-	0.103
SO ₃	0.111	0.107	0.116	0.120	0.26	0.105
K ₂ O	0.065	0.034	0.045	0.036	0.08	0.0622

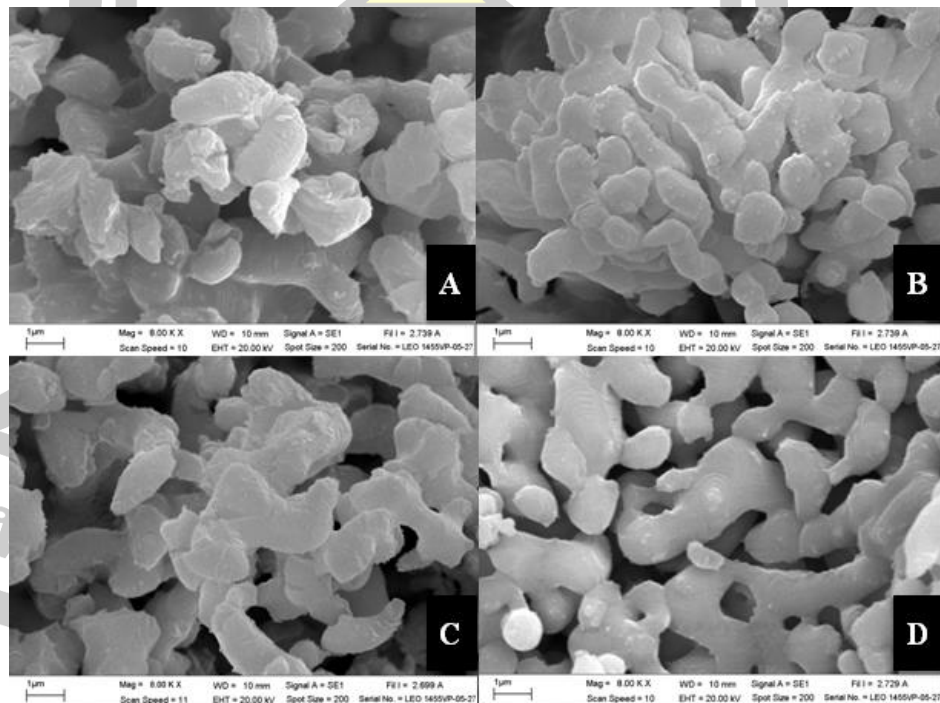
ที่มา: (Pornchai et al., 2016)

จากภาพที่ 10 และ 11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ กำลังขยาย 8,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก มีรูปร่างมนแต่ไม่มีรูปทรงใดรูปทรงหนึ่งที่ชัดเจน มีทั้งรูปทรงที่เป็นลักษณะคล้ายดัมเบลหรือคล้ายท่อ เป็นต้น



ภาพที่ 10 SEM ของเปลือกไข่ ใช้กำลังขยาย 8,000x

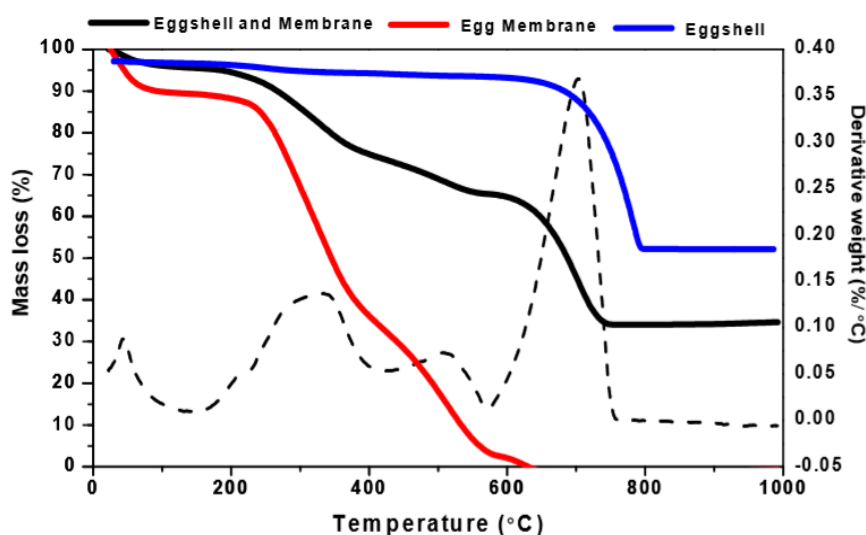
ที่มา: (Pornchai et al., 2016)



ภาพที่ 11 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของแคลเซียมออกไซด์ใช้กำลังขยาย 8,000x โดยแคลเซิดเปลือกไข่ที่ 800 °C เป็นเวลา 1 ถึง 4 ชั่วโมง, CaO-1 (A), CaO-2 (B), CaO-3 (C) และ CaO-4 (D)

ที่มา: (Pornchai et al., 2016)

ทีปกร (2561) ได้ศึกษาการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) แสดงการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกไข่ไก่ใน 3 รูปแบบ คือ 1) เปลือกไข่ที่มีเยื่อติดอยู่ 2) เฉพาะเยื่อเปลือกไข่ และ 3) เปลือกไข่ล้วน พบว่า เปลือกไข่ที่มีเยื่อติดอยู่มีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ทั้งหมด 3 ช่วง โดยมีการสลายตัวในช่วงแรกประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C เนื่องจากสูญเสียความชื้น หลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 200 °C จนถึง 600 °C เป็นการสลายตัวของเยื่อเปลือกไข่ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 600 °C จนถึง 770 °C เป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยสูญเสียมวลที่ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักเปลือกไข่ไก่ซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูญเสียมวลโดยรวมที่ไม่ใช่แคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ประมาณร้อยละ 65 และเหลือมวลที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 35 ของน้ำหนัก ส่วนผลการศึกษาของเฉพาะเยื่อเปลือกไข่เป็นในทิศทางเดียวกันคือมีการสูญเสียมวลเนื่องจากสูญเสียความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C หลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 200 °C จนถึง 620 °C เป็นการสลายตัวของตัวของเยื่อเปลือกไข่ซึ่งเป็นสารอินทรีย์จนสูญเสียมวลทั้งหมด การศึกษาเปลือกไข่ล้วนผลที่ได้คือ มีการสลายตัวอยู่ 2 ช่วง โดยในช่วงแรกสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C หลังจากนั้นที่อุณหภูมิ 600 °C จนถึง 795 °C เป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 43 ของน้ำหนัก และได้ผลผลิตแคลเซียมออกไซด์จากการสังเคราะห์อยู่ที่ร้อยละ 52 ของน้ำหนัก



ภาพที่ 12 การสลายตัวทางความร้อน (TGA thermogram) ของเปลือกไข่

ที่มา: (ทีปกร พรไชย, 2561)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์และวิธีการสังเคราะห์

แหล่งที่ใช้ในการสังเคราะห์	คุณลักษณะ				
	Surface area (m ² /g)	Basic Strength (H ₊)	Basic site density (mmol/g)	Calcination 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 ที่ได้ไปใส่ในซีเมนต์ที่มีความชื้น
CaO ⁷ จากหินปูน	13	15.0 < H ₊ < 18.4	0.12	ความร้อน 900 °C 1.5 ชั่วโมง	แก๊สซีเมนต์
CaO + Air จากหินปูน	13	9.3 < H ₊ < 15.0	0.03	ความร้อน 900 °C 1.5 ชั่วโมง	นำ CaO ที่ได้ไปทิ้งไว้ให้สัมผัสอากาศ
เปลือกไข่แห้ง	0.05	-	-	-	-
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 เปลือกหอยหอยเชอร์รี่	0.9	-	0.207	ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO เปลือกหอยตลับ	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	-	-	บดให้มีขนาดเฉลี่ย 11 μm ให้ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	3.54	-	-	บดให้มีขนาดเฉลี่ย 23 μm ให้ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จาก CaCO ₃	1.73	-	-	บดให้มีขนาดเฉลี่ย 26 μm ให้ความร้อน 900 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	1.00	-	-	ให้ความร้อน 800 °C 4 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จาก CaCO ₃	5.09	-	-	ให้ความร้อน 800 °C 2 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากเปลือกไข่	19.32	-	-	ให้ความร้อน 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 3 ชั่วโมง	ใช้อากาศ
CaO จากหินปูน	25	12.2 < H ₊ < 15.0	-	ความร้อน 800 °C 3 ชั่วโมง นำ CaO Reflux กับน้ำ 60 °C 3 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนที่ 600 °C	ใช้อากาศ
CaO สำเร็จรูป	2.1	9.8 < H ₊ < 12.2	-	-	-
CaO เปลือกไข่ฟาร์ม ซีพีเอฟ (Pornchai et al., 2016)	14.1	-	-	ให้ความร้อน 800 °C 1 ชั่วโมง	ใช้อากาศ

ที่มา: (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และ อภิพงษ์ พุฒคำ, 2557)

2.2.2.2 กระบวนการทางเคมี

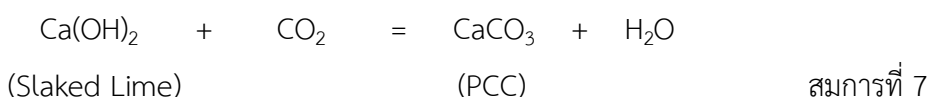
แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกเรียกว่า Precipitated Calcium Carbonate (PCC)

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (PCC) เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ เป็นผงขนาดเล็กที่เกิดจากการตกผลึก รูปร่างของผลึกอาจจะแตกต่างกันตามวิธีการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะเป็นรูปเข็มหรือ Rhomboids ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศ และไม่ละลายน้ำ

คุณสมบัติที่ดีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (PCC) เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบด เรียกว่า Ground Calcium Carbonate (GCC) คือมีความขาวและความบริสุทธิ์สูงกว่า เพราะมีการตกผลึกกำจัดมลทินออกไปแล้ว นอกจากนี้ PCC ยังมีคุณสมบัติด้านฟิลิกส์ที่ดีกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่แข็งแกร่งกว่า โครงสร้างรูปผลึกมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีน้ำหนักที่เบากว่าและเข้ากับเนื้อเยื่อไม้ที่เป็นวัตถุดิบหลักในการทำกระดาษได้ดีกว่า GCC เนื่องจากมีการควบคุมอุณหภูมิและความดันขณะตกผลึก

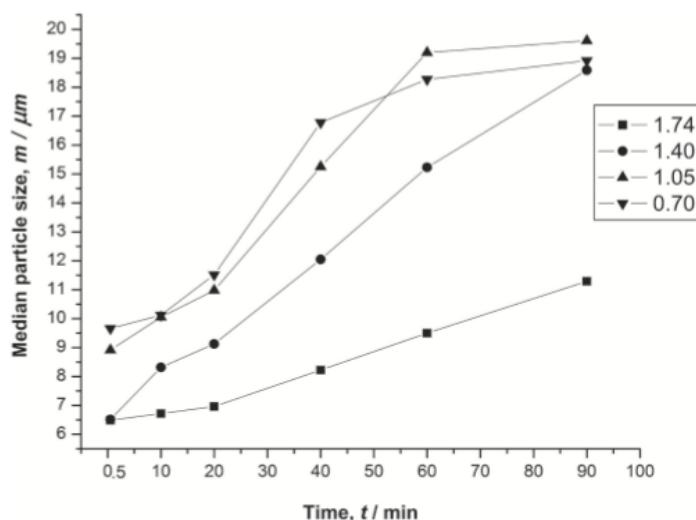
ขั้นตอนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (PCC)

กรรมวิธีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (PCC) ในเชิงพาณิชย์ นิยมใช้กรรมวิธีฟั่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonation Process) หรือวิธี Recarbonizing ทำได้โดยการเผาหินปูน (Limestone) ซึ่งอยู่ในรูปของปูนสุก (Quick Lime) หรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 825 °C ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวเหลือแคลเซียมออกไซด์ เมื่อเติมน้ำลงไปจะทำให้แคลเซียมออกไซด์อยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เรียกว่า Slaked Lime และเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปเป็น Slaked Lime จะเกิดผลึกใหม่กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 5 , 6 และ 7



ขนาดของผลึกและการกระจายตัวของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก (PCC) ขนาดต่าง ๆ สามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา อัตราการเติมวัตถุดิบ และอัตราเวลาที่เหมาะสม (กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย สำนักเหมืองแร่และสัมประทาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2545)

จากการศึกษาของ Putkham และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาการกวน อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมจากเปลือกไข่ไก่ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก โดยระยะเวลาการกวนและความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมคลอไรด์กับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก พบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการกวนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กทำให้กลายเป็นขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่ 1.74 M มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 6.4 - 11.2 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเกรดวิเคราะห์ (11.4 ไมโครเมตร) และเกรดอุตสาหกรรม (11.8 ไมโครเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 12

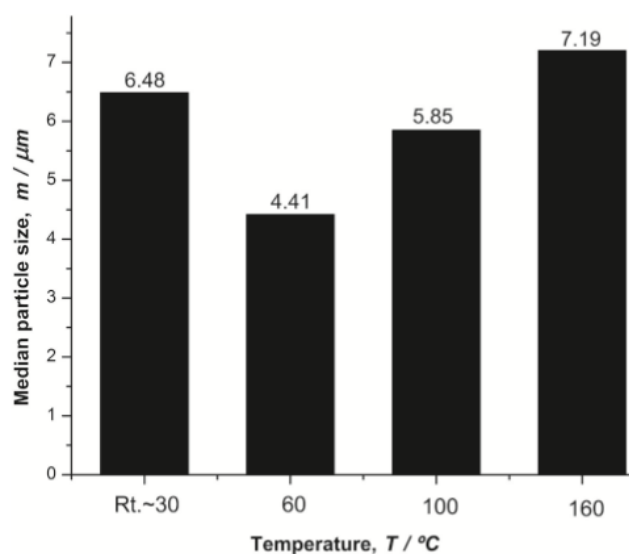


ภาพที่ 13 ระยะเวลาการกวนและความเข้มข้นเริ่มต้นของแคลเซียมคลอไรด์กับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก

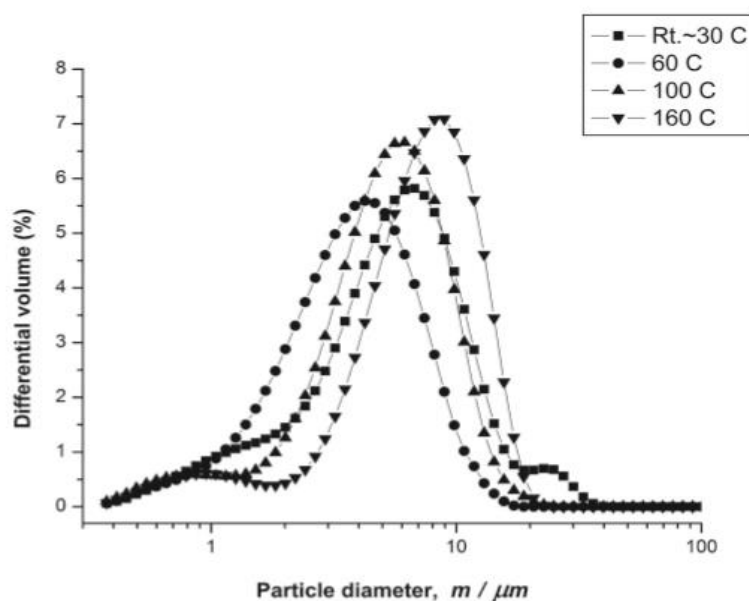
ที่มา: (Putkham, Ladhan, & Putkham, 2018)

ส่วนอุณหภูมิกับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ที่เตรียมจากเปลือกไข่ไก่ (CaCl_2) 1.74 M ที่อุณหภูมิ 30, 60, 100 และ 160 °C พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแคลเซียมคาร์บอเนตลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 60 °C และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 160 °C จะเพิ่มขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงใน

ภาพที่ 13 และยังพบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าการกระจายของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนขนาดอนุภาคได้มากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มมวลจากอนุภาคขนาดเล็กเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคที่ผลิตที่ 30, 60, 100, และ 160 °C มีขนาดอนุภาค 6.48, 4.41, 5.85 และ 7.19 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าสามารถผลิตขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนเป็นไมโครเมตรได้



ภาพที่ 14 อุณหภูมิกับขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึก
ที่มา: (Putkham et al., 2018)



ภาพที่ 15 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน
ที่มา: (Putkham et al., 2018)

2.3 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃)

การนำแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.3.1 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

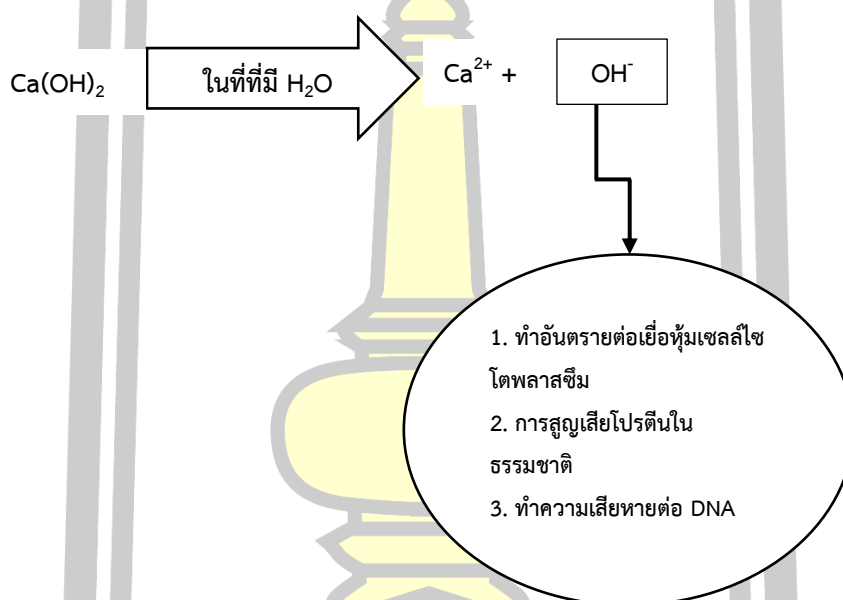
ตารางที่ 3 ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ประเภทอุตสาหกรรม	ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์
อุตสาหกรรมเหมืองแร่	- ปรับสภาพความเป็นกรดต่างของน้ำเสียและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการแต่งแร่
อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ	- แยกสารเคมีในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษให้กลับมาใช้ใหม่ได้ - เป็นส่วนเติมแต่งในการผลิตกระดาษ - เป็นวัตถุดิบในการผลิตแร่หินปูนสังเคราะห์ (Precipitated Calcium Carbonate หรือ PCC)
อุตสาหกรรมน้ำตาล	- ดึงสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำตาลดิบและน้ำตาลทรายขาว
อุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ	- เป็นส่วนประกอบในกระบวนการหมักน้ำตาลหรือแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตพลาสติกชีวภาพ
อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า	- กำจัดแร่หรือสิ่งเจือปนในการถลุงแร่เหล็ก
อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี	- เป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิตเคมีพื้นฐาน เช่น โซดาแอชและแคลเซียมคาร์ไบด์ เป็นต้น
อุตสาหกรรมการเกษตร	- ปรับปรุงคุณภาพดิน แก้ดินเปรี้ยว - ปรับสภาพความเป็นกรดต่างของบ่อเลี้ยงกุ้ง - เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์เพื่อเพิ่มแคลเซียม
อุตสาหกรรมสาธารณูปโภคพื้นฐาน	- กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการดำเนินงานของโรงไฟฟ้า และโรงงานเผาขยะ - ช่วยในการตกตะกอน แยกสารแขวนลอย กำจัดหรือลดความกระด้างของน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำใส
อุตสาหกรรมการก่อสร้างและวัสดุก่อสร้าง	- วัตถุดิบในการผลิต ปูนซีเมนต์ อิฐมวลเบา และวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ - เป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของปูนฉาบ - ปรับสภาพพื้นดินก่อนงานก่อสร้าง

นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ และบางอุตสาหกรรมใช้แคลเซียมออกไซด์ในการฆ่าเชื้ออีกด้วย

ในส่วนงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการใช้แคลเซียมออกไซด์ในการฆ่าเชื้อ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

กลไกของกิจกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กิจกรรมต้านจุลชีพของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ นั้นขึ้นอยู่กับการปลดปล่อยของไฮดรอกซิลไอออนในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำ ส่วนไฮดรอกซิลไอออนเป็นอนุมูลอิสระสูงที่แสดงปฏิกิริยารุนแรงกับชีวโมเลกุล ดังนั้นอนุมูลอิสระนี้ไม่ค่อยแพร่กระจายออกไปจากแหล่งกำเนิด ผลกระทบที่ร้ายแรงของไอออนไฮดรอกซิลต่อเซลล์แบคทีเรียอาจเกิดจากความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ไซโทพลาสซึม แบคทีเรียทำลายสภาพของโปรตีนหรือทำลาย DNA ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 มุมมองแผนผังของกลไกของกิจกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มา: (Mohammadi, Shalavi, & Yazdizadeh, 2012)

ชนิดของสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่ใช้ มีหลายประเภทรวมกันตามลักษณะการใช้งาน เช่น ใช้สารในกลุ่มซัลโฟน (Sodium Lauryl Ether Sulphate) และด่างแก่ (Sodium Hydroxide) ในการล้างทำความสะอาดโรงเรือน ใช้สารในกลุ่ม Aldehyde และ Ammonium chloride ในการฆ่าเชื้อโรคในบริเวณต่าง ๆ และอุปกรณ์การเลี้ยง ใช้สารกลุ่ม Iodine ในการฆ่าเชื้อบุคคล ใช้กรดแก่ (Hydrochloric acid) ในการกำจัดตะกอนในระบบท่อน้ำ ใช้ปูนขาวในการฆ่าเชื้อโรคบนพื้นโดย

การโรยหรือรมควันโดยใช้ Formalin และ Potassium permanganate (ไพรัช รุ่งอุทัย และ ชาญชัย จุลโบล, 2553)

ความถี่ในการใช้สารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ ในการใช้สารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อชนิดต่าง ๆ จะใช้สารแต่ละชนิดที่ห่างต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานและคำสั่งของสัตวแพทย์ผู้ควบคุมฟาร์ม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความถี่ในการใช้สารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

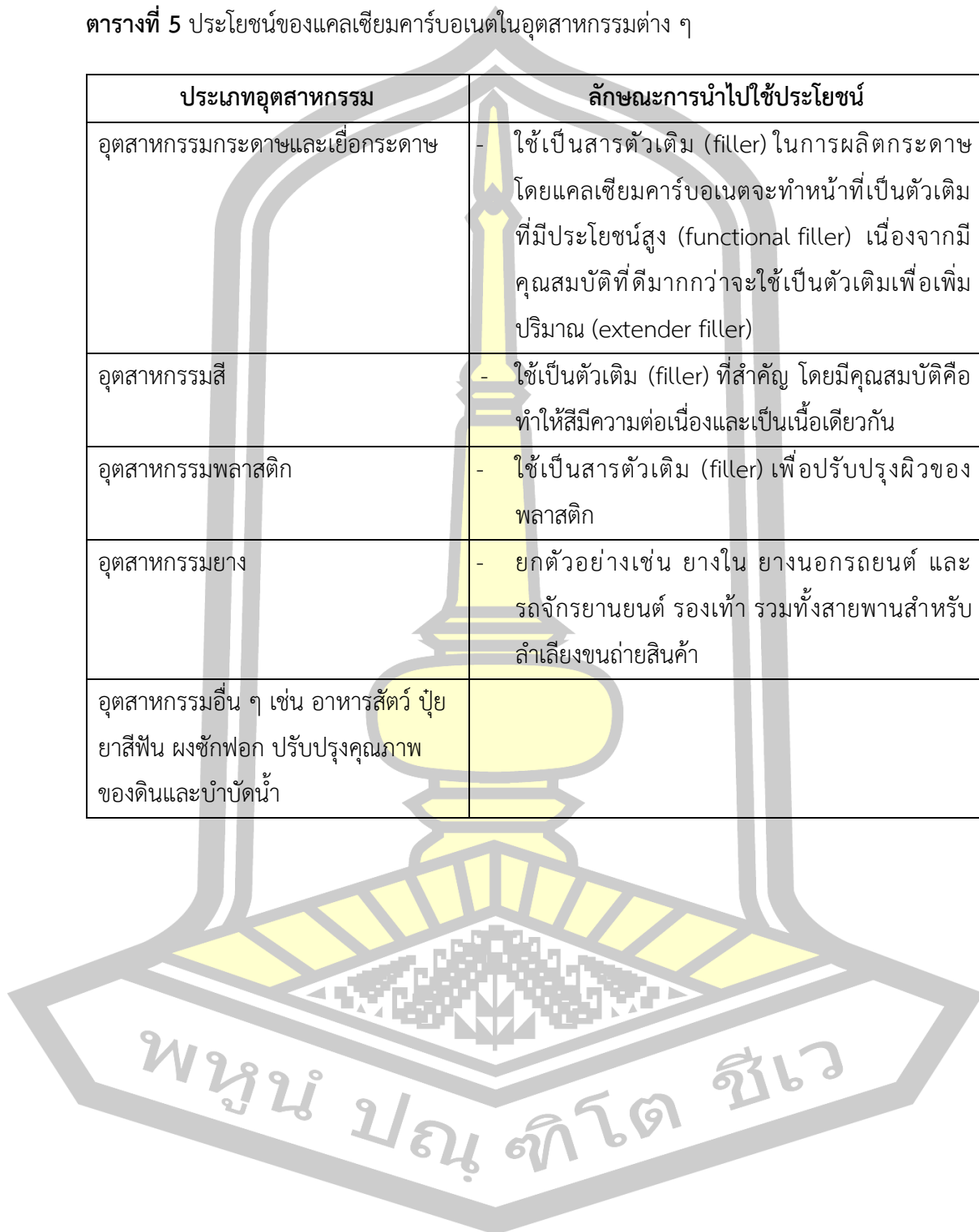
ชนิดสารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ	จำนวน (ฟาร์ม)	จำนวนครั้งที่ใช้/ร่นการเลี้ยง (ฟาร์ม)				
		1	2	3-5	6-10	>10
Sodium Lauryl Ether Sulphate	53	53				
Sodium Hydroxide	16	16				
Hydrochloric acid	1	1				
Acetic acid, Cersylic acid, High boiling tar acid, Dodecyl benzene sulfonic acid	4	4				
Formalin & Potassium permanganate	13	13				
Povidone Iodine	9					9
Alkyl benzyl dimethyl ammonium chloride, Glutaraldehyde, Polyethoxylated alkyl alcohol	26			4	22	
Hydrogen peroxide, Peracetic acid	2	2				
Alkyl benzyl dimethyl ammonium chloride	2		2			
Glutaraldehyde	52				44	8
ปูนขาว	53					53
Formadehyde, Isopropanol, Glutaraldehyde, Glyoxal. Alkyl benzyl dimethyl ammonium chloride	2			1	1	

ที่มา: (ไพรัช รุ่งอุทัย และ ชาญชัย จุลโบล, 2553)

2.3.2 การใช้ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

ตารางที่ 5 ประโยชน์ของแคลเซียมคาร์บอเนตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ประเภทอุตสาหกรรม	ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์
อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ	- ใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ในการผลิตกระดาษ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำหน้าที่เป็นตัวเติมที่มีประโยชน์สูง (functional filler) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีมากกว่าจะใช้เป็นตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณ (extender filler)
อุตสาหกรรมสี	- ใช้เป็นตัวเติม (filler) ที่สำคัญ โดยมีคุณสมบัติคือทำให้สีมีความต่อเนื่องและเป็นเนื้อเดียวกัน
อุตสาหกรรมพลาสติก	- ใช้เป็นสารตัวเติม (filler) เพื่อปรับปรุงผิวของพลาสติก
อุตสาหกรรมยาง	- ยกตัวอย่างเช่น ยางใน ยางนอกรถยนต์ และรถจักรยานยนต์ รองเท้า รวมทั้งสายพานสำหรับลำเลียงขนถ่ายสินค้า
อุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อาหารสัตว์ ปุ๋ย ยาสีฟัน ผงซักฟอก ปรับปรุงคุณภาพของดินและบำบัดน้ำ	



2.4 เทคโนโลยีเตาเผาที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน

เทคโนโลยีเตาเผา หรือ Incineration คือการเผาไหม้มูลฝอยกับอากาศเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ให้ความร้อนและอุณหภูมิเพื่อทำลายมวลและปริมาตรของมูลฝอย การเผาไหม้เกิดขึ้นในเตาเผาที่ได้มีการออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้เข้ากับลักษณะสมบัติของขยะมูลฝอย คืออัตราความชื้นสูงและมีค่าความร้อนที่แปรผันได้ การเผาไหม้จะต้องมีการควบคุมที่ดีเพื่อจะป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษและการรบกวนต่อสภาพแวดล้อม เช่น ก๊าซพิษ เขม่า กลิ่น เป็นต้น ก๊าซซึ่งเกิดจากการเผาไหม้จะได้รับการกำจัดเขม่าและอนุภาคตามที่กฎหมายควบคุมก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งมีปริมาตรประมาณร้อยละ 10 และน้ำหนักร้อยละ 25 ถึง 30 ของขยะที่ส่งเข้าเตาเผา สามารถนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้นสำหรับการสร้างถนน ส่วนซัลเฟอร์ที่มีส่วนประกอบของโลหะ อาจถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ในบางพื้นที่ที่มีปริมาณขยะมูลฝอยอยู่มาก สามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ในการผลิตไอน้ำหรือทำน้ำร้อน หรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้

หัวใจของโรงเผามูลฝอยคือระบบการเผาไหม้ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือระบบการเผาไหม้มวล (Mass Burn System) ซึ่งหมายถึงการเผาทำลายมูลฝอยในสภาพที่รับเข้ามาโดยไม่ต้องมีกระบวนการจัดการเบื้องต้นก่อน และอีกประเภทหนึ่งคือ ระบบที่มีการจัดการเบื้องต้น (Burning of Preheated and Homogenized Waste)

ระบบการเผาไหม้มวลเป็นการเผาไหม้มูลฝอยที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายโดยไม่ต้องมีการจัดการเบื้องต้นก่อน จากการศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเทคโนโลยีเตาเผามูลฝอยระบบการเผาไหม้มวลที่มีอยู่ในปัจจุบัน พบว่า เตาเผาระบบการเผาไหม้มวลที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท หลักๆ คือ เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายและได้รับการทดสอบแล้วมีสมรรถนะทางเทคนิคที่ยอมรับได้และสามารถรองรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบ และค่าความร้อนที่หลากหลาย และเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับความนิยมรองลงมา

ระบบที่มีการจัดการมูลฝอยเบื้องต้นก่อนทำการเผาต้องมีการลดขนาดการบดตัด และการคัดแยก หรือในบางครั้งอาจมีระบบการผลิตเชื้อเพลิงจากมูลฝอย (Refuse-Derived Fuel : RDF) ซึ่งทำให้มีความยุ่งยากในการปฏิบัติงานมากขึ้น ดังนั้นระบบดังกล่าวจึงมีการใช้งานอยู่ในวงจำกัด

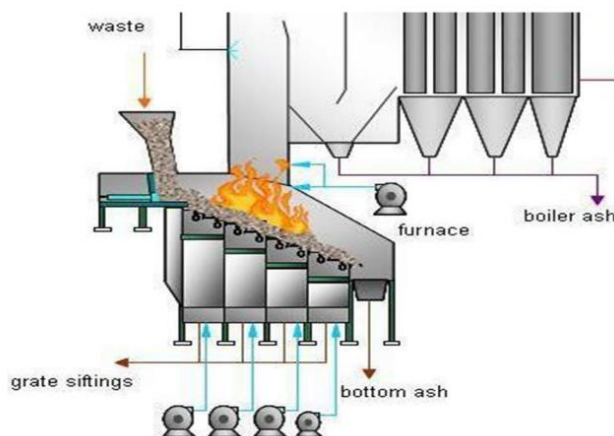
ระบบที่มีการจัดการมูลฝอยเบื้องต้นก่อนทำการเผาในทางทฤษฎีอาจจัดให้เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) จัดอยู่ในพวกเดียวกันด้วย อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบดจัดว่าเทคโนโลยีที่ใหม่อยู่ และมีการใช้งานเพื่อการเผาทำลายขยะมูลฝอยในวงจำกัด โดยทั่วไปใช้ใน

การกำจัดมูลฝอยอุตสาหกรรม (มีตัวอย่างการใช้งานในประเทศญี่ปุ่น) นอกจากนี้มีเทคโนโลยีไพโรไลซิส-ก๊าซซิฟิเคชันอีกด้วย โดยรายละเอียดของเตาเผาแต่ละเทคโนโลยีทั้งทางด้านเทคนิค วิศวกรรม การจัดการสิ่งแวดล้อม การบริหารจัดการโรงแรม รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และการบำรุงรักษา จะได้กล่าวถึงต่อไป

2.4.1 ประเภทของเทคโนโลยีและหลักการทำงานของเทคโนโลยี

2.4.1.1 เตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่ (Moving Grate)

เตาเผามูลฝอยแบบการเผาไหม้มวลเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งประกอบด้วยตะกรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีการเผาไหม้บนตะกรับนี้ ดังแสดงในภาพที่ 19 โดยขยะเผาไหม้ตะกรับจะเคลื่อนที่และลำเลียงมูลฝอยจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้าย



ภาพที่ 17 เตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่ (Moving Grate)

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)



ภาพที่ 18 ภาพถ่ายแสดงให้เห็นตะกรับที่อยู่ด้านในของเตาเผามูลฝอย

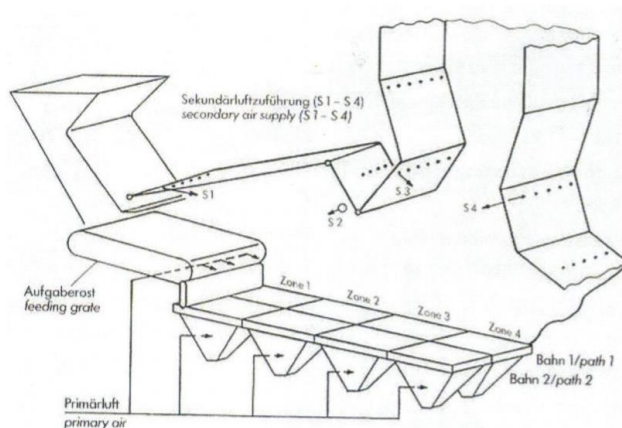
ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

ก้ามปูของ Overhead Crane จะทำหน้าที่จับมูลฝอยเพื่อป้อนลงไปในห้องป้อนก่อนที่จะหล่นเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเตาเผาด้วยแรงโน้มถ่วง เมื่อมูลฝอยตกลงไปวางบนตะกรับ ความร้อนในเตาเผาจะทำให้มูลฝอยแห้งก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิสูงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซีเมนต์ (รวมทั้งส่วนประกอบของ มูลฝอยส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้) จะหลุดออกจากตะกรับในลักษณะของ Slag/Bottom Ash ลงสู่หลุมถ่ายซีเมนต์

ตะกรับจะทำหน้าที่เป็นเสมือนพื้นผิวด้านล่างของเตา การเคลื่อนที่ของตะกรับหากได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องจะทำให้มูลฝอยมีการขนย้ายและผสมผสานกันอย่างมีประสิทธิภาพและทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแทรกซึมไปทั่วถึงพื้นผิวของมูลฝอย ตะกรับอาจถูกจัดแบ่งให้เป็นที่ย่อยเฉพาะซึ่งทำให้สามารถปรับปริมาณอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ได้อย่างอิสระและทำให้สามารถเผาไหม้ได้แม้มูลฝอยที่มีค่าความร้อนต่ำ

อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบ่งออกเป็นอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ซึ่งเป่าด้านล่างของผิวตะกรับ โดยทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ในภาคของแข็งและระบายความร้อนให้กับตะกรับ อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) จะจ่ายเข้าบริเวณด้านบนของห้องเผาไหม้และทำหน้าที่เผาไหม้ก๊าซที่ระเหยขึ้นมาจากมูลฝอยที่วางบนตะกรับเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 19

ตะกรับที่ใช้กับระบบเตาเผามูลฝอยมีหลายแบบเช่นกัน Forward Movement, Backward Movement, Double Movement Rocking และ Roller เป็นต้น



ภาพที่ 19 อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่จ่ายเข้าตามส่วนต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้
ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

ผนังของห้องเผาไหม้ในเตาเผามูลฝอยมักเป็นแบบบุด้วยอิฐทนไฟ (Refractory Wall) หรือแบบผนังน้ำ (Water Wall) สำหรับแบบหลังนี้ส่วนมากจะปฏิบัติงานโดยใช้อากาศส่วนเกินในปริมาณต่ำ ซึ่งช่วยให้ลดปริมาตรของห้องเผาไหม้และลดขนาดของอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ

ตารางที่ 6 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่

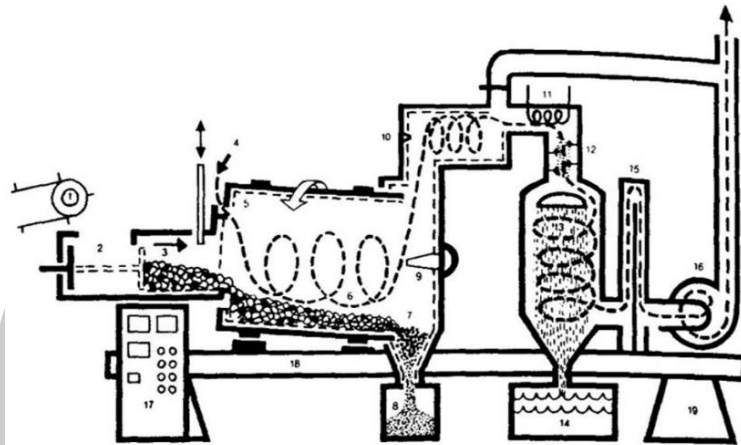
ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่ต้องการคัดแยกหรือบดตัดมูลฝอยก่อน 2. เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการทดสอบแล้วสำหรับการเผาทำลายมูลฝอยและมีสมรรถนะตรงตามวัตถุประสงค์ 3. สามารถจัดการกับมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี 4. สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึงร้อยละ 85 5. เตาเผาแต่ละเตาสามารถก่อสร้างให้มี ความสามารถในการเผาทำลายได้ถึง 1,200 ตัน ต่อวัน (50 ตันต่อชั่วโมง) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เงินลงทุนและบำรุงรักษาค่อนข้างสูง

2.4.1.2 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

ระบบเตาเผาแบบหมุนเป็นการเผาไหม้มวลของมูลฝอยโดยใช้ห้องเผาไหม้ทรงกระบอก ซึ่งสามารถหมุนได้รอบแกนมูลฝอยจะเคลื่อนตัวไปตามผนังของเตาเผาทรงกระบอกตามการหมุนของเตาเผาซึ่งทำมุมเอียงกับแนวระดับ

เตาเผาแบบหมุนส่วนใหญ่จะเป็นแบบผนังอิฐทนไฟ แต่ก็มีบ้างที่เป็นผนังถ้ำทรงกระบอก อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร และยาวตั้งแต่ 8 ถึง 20 เมตร ความสามารถในการเผาทำลายมูลฝอย มีตั้งแต่ 2.4 ตันต่อวัน (0.1 ตันต่อชั่วโมง) จนถึงประมาณ 480 ตันต่อชั่วโมง (20 ตันต่อชั่วโมง)

อัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่จะใช้มีปริมาณที่มากกว่าแบบที่ใช้กับเตาเผาแบบตะกรับและอาจจะมีมากกว่าที่ใช้กับเตาเผาแบบฟลูอิโดไธซ์เบดด้วย สิ่งก็ตามมาก็คือ เตาเผาแบบหมุนมีประสิทธิภาพพลังงานที่ต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ก็ยังมีค่ามากกว่าร้อยละ 80



ภาพที่ 20 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (Retention Time) ของก๊าซไอเสียค่อนข้างสั้นเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นเตาทรงกระบอกจึงมักมีส่วนต่อที่ทำเป็นห้องเผาไหม้หลัง (After-Burning Chamber) และหมักรวมอยู่ในส่วนของหม้อน้ำด้วย ตัวอย่างระบบเตาเผาแบบหมุนที่ติดตั้งใช้งานจริงแสดงดังภาพที่ 21

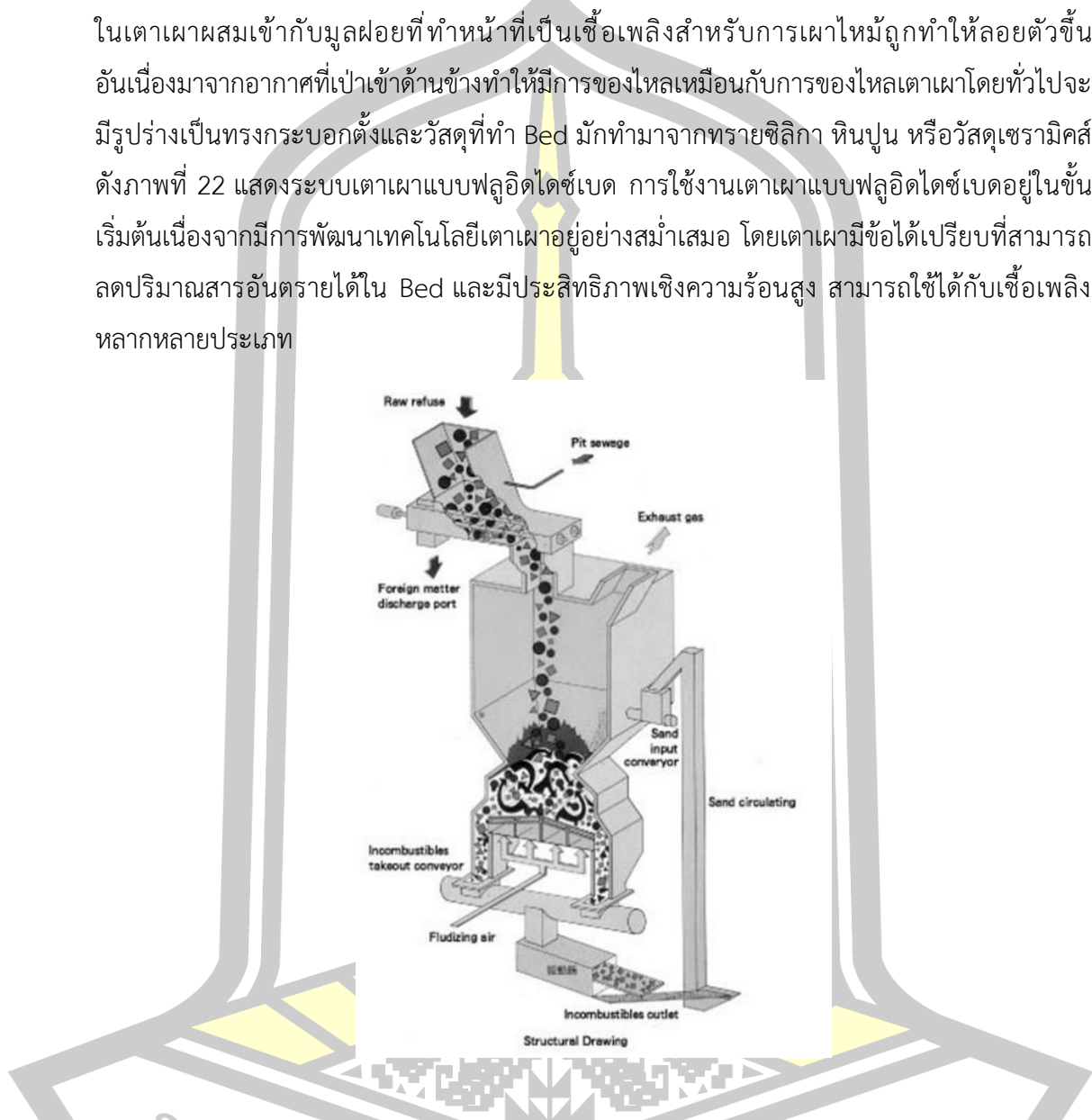


ภาพที่ 21 เตาเผาแบบหมุนที่ติดตั้งใช้งานจริง

ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

2.4.1.3 เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดทำงานโดยอาศัยหลักการที่อนุภาคของแข็งที่รวมตัวเป็น Bed ในเตาเผาผสมเข้ากับมูลฝอยที่ทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ถูกทำให้ลอยตัวขึ้น อันเนื่องมาจากอากาศที่เป่าเข้าด้านข้างทำให้มีการของไหลเหมือนกับการของไหลเตาเผาโดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตั้งและวัสดุที่ทำ Bed มักทำมาจากทรายซิลิกา หินปูน หรือวัสดุเซรามิกส์ ดังภาพที่ 22 แสดงระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด การใช้งานเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดอยู่ในขั้นเริ่มต้นเนื่องจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีเตาเผาอยู่อย่างสม่ำเสมอ โดยเตาเผาที่มีข้อได้เปรียบที่สามารถลดปริมาณสารอันตรายได้ใน Bed และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลากหลายประเภท



ภาพที่ 22 ระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

ข้อเสียเปรียบหลักของเตาเผาแบบนี้อยู่ที่ต้องการกระบวนการในการจัดการมูลฝอยเบื้องต้นก่อนที่จะสามารถป้อนข้อมูลเข้าสู่เตาเผาได้ เพื่อให้มูลฝอยมีขนาดค่าความร้อน ปริมาณซีเมนต์ที่อยู่ข้างในและอื่น ๆ เพื่อให้ตรงต่อข้อกำหนดในการปฏิบัติงานของเตาเผา และเนื่องจากมูลฝอยมีลักษณะสมบัติที่หลากหลายจึงทำให้เกิดความยากลำบากในการทำให้ได้เชื้อเพลิงที่ตรงตามความต้องการ ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดสรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบหลักของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
<ol style="list-style-type: none"> 1. เงินลงทุนและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำเนื่องจากออกแบบที่ค่อนข้างง่าย 2. สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึงร้อยละ 90 3. สามารถใช้ในการเผาทำลายเชื้อเพลิงที่หลากหลายประเภทและสามารถรับรองได้ทั้งกากของแข็งและเหลวโดยเผาทำลายร่วมกันหรือแยกจากกัน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ปัจจุบันยังจัดว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังต้องการทดสอบอยู่สำหรับเผาทำลายมูลฝอยชุมชน 2. ค่อนข้างมีข้อจำกัดด้านขนาดและองค์ประกอบของมูลฝอย โดยทั่วไปต้องมีกระบวนการในการจัดการมูลฝอยก่อนส่งเข้าเตาเผา

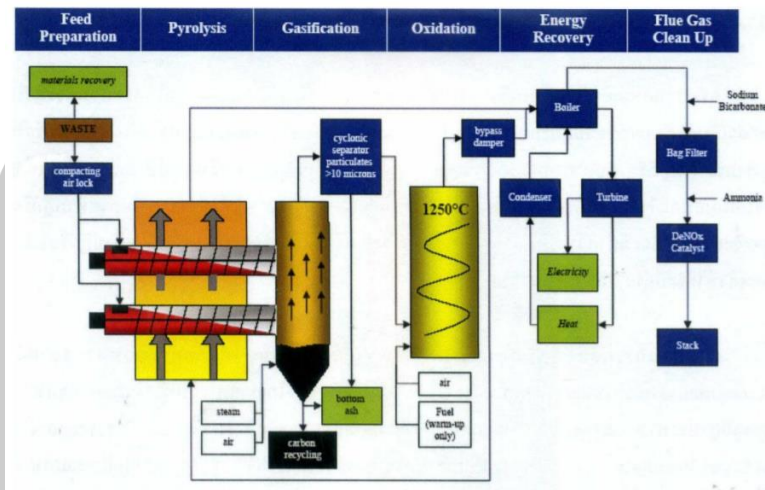
2.4.1.4 เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากมูลฝอยชุมชน (MSW Gasification) เป็นกระบวนการทำให้มูลฝอยเป็นก๊าซโดยการทำปฏิกิริยาสันดาปแบบไม่สมบูรณ์ (Partial Combustion) กล่าวคือ สารอินทรีย์ในมูลฝอยจะทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนปริมาณจำกัดทำให้เกิดก๊าซ ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน เรียกว่า Producer gas ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นก๊าซทำปฏิกิริยาก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนต่ำประมาณ 3-5 MJ/Nm³ แต่ถ้าใช้ออกซิเจนเป็นก๊าซทำปฏิกิริยาก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าคือ ประมาณ 15-20 MJ/Nm³

กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยกระบวนการสลายตัว (Decomposition) และกระบวนการกลั่นสลาย (Devolatilization) ของโมเลกุลสารอินทรีย์ในมูลฝอยชุมชน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200-1,400 °C ในบรรยากาศที่ควบคุมปริมาณออกซิเจน เพื่อผลิตสารระเหยและถ่านชาร์ (Char) ในขั้นตอนของกระบวนการกลั่นสลายที่เรียกว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis) มูลฝอยจะสลายตัวด้วยความร้อนเกิดเป็นสารระเหย เช่น มีเทน และส่วนที่เหลือยังคงสภาพของแข็งอยู่เรียกว่า ถ่านชาร์ สารระเหยจะทำปฏิกิริยากับอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำได้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง ภาพที่ 23 แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส-ก๊าซซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน Gasification Process จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยหลักที่กำหนดเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว คืออุณหภูมิ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ถ้า Residence Time ในบริเวณ Hot Zone ของปฏิกรณ์ของเกินไป หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป

จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดสันดาป และจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นที่บริเวณ Reduction Zone เป็นน้ำมันทาร์



ภาพที่ 23 กระบวนการไพโรไลซิส-ก๊าซซิฟิเคชัน
ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

2.5 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

2.5.1 นิยามของเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

เตาเผาแบบหมุนเป็นเตาเผาแบบต่อเนื่องที่ห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอก ซึ่งวัตถุดิบนั้นจะเคลื่อนตัวไปตามแนวเอียงของเตาเผาแบบไหลสวนทาง (Counter-current) เข้าสู่ความร้อน ตัวอย่างแสดงข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเตาเผาแบบหมุน ดังต่อไปนี้

ข้อได้เปรียบของเตาเผาแบบหมุน

- สามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง
- สามารถเผาของเสียได้หลายสถานะทั้งในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซในเวลาเดียวกัน
- สามารถควบคุมเวลาในการเผาไหม้ในเตาเผาได้
- ประสิทธิภาพการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับของเสียสูง

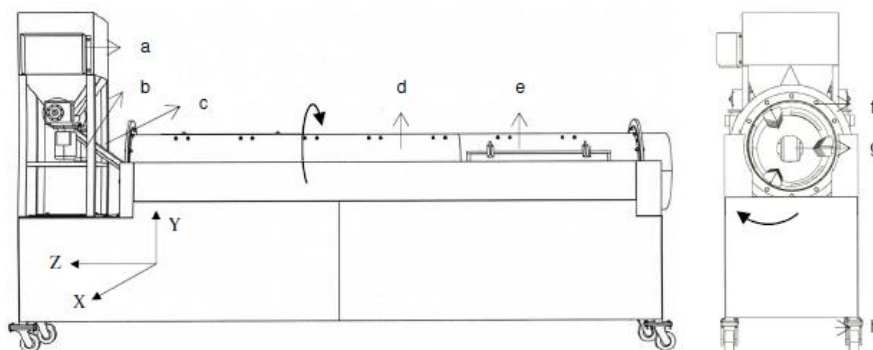
ข้อเสียเปรียบของเตาเผาแบบหมุน

- สภาวะต่าง ๆ ตามแนวยาวของเตาเผาควบคุมยาก
- การซีลไม่ให้อากาศรั่วออกไปนอกเตาทำได้ยาก

2.5.2 องค์ประกอบของเตาเผาแบบหมุน

เตาเผามูลฝอยแบบหมุนได้ออกแบบให้เอียงทำมุมกับแนวระดับเล็กน้อย และสามารถควบคุมเวลาในการเผาไหม้จากมุมเอียงและความเร็วรอบของเตาเผาได้ เตาเผาแบบหมุนออกแบบให้ทำมุมเอียงกับแนวระดับเล็กน้อยประมาณ 3 องศา ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ของเสียเคลื่อนตัวจากทางเข้าไปสู่ทางออก ดังนั้นสามารถควบคุมเวลาในการเผาไหม้จากมุมเอียงและความเร็วรอบของเตาเผาได้ ซึ่งปกติความเร็วรอบจะอยู่ในช่วง 0.25 – 2.5 รอบต่อนาที ทั้งนี้แล้วแต่สภาพการเผาไหม้ในเตา (มงคล จิ่งสถาปัตย์ชัย และคณะ., 2546)

การเคลื่อนตัวของวัตถุขี้ในเตาเผามีลักษณะที่แตกต่างจากเตาเผาอื่น ๆ คือ เมื่อป้อนวัตถุขี้เข้าไป วัตถุขี้จะกองสุมกัน เมื่อระบบเตาเผาเริ่มทำการหมุนวัตถุขี้จะเคลื่อนตัวหมุนไปตามผนังเตาได้เนื่องจากแรงเสียดทานของผนังเตาจนถึงความสูงระดับหนึ่ง ทำให้วัตถุขี้ไม่สามารถเคลื่อนตัวต่อไปได้ก็จะตกลงมาที่เตาด้านล่างโดยแรงโน้มถ่วง กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำ ๆ กันจนกว่าวัตถุขี้ นั้นจะไหม้จนหมดหรือเคลื่อนตัวออกจากเตา ซึ่งองค์ประกอบโดยทั่วไปของเตาเผาแบบหมุนแสดงดังแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 (a) กรวยรับวัตถุขี้ (b) ส่วนป้อนวัตถุขี้ (c) ล้อปิด-เปิดเตา (d) เตาเผาแบบหมุน (e) ช่องเปิด (f) ตัวป้อนแบบสกรู (g) ไบควาน (h) เปลือกเตา

ที่มา: (Trinks & Mawhinney, 2004)

การเคลื่อนที่ของวัตถุขี้ในเตาเผาแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) การเคลื่อนที่แบบมวลกลุ่มตกลับลงมา (Slumping motion)
- 2) การเคลื่อนที่แบบอนุภาคตกลับลงมา (Rolling motion)
- 3) การเคลื่อนที่แบบผสม (Transitional motion)

Trinks and Mawhinney (2004) อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุติดในเตาเผาแบบหมุนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วรอบ (Speed ratio) ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของเตา ส่วนด้วยความเร็วรอบวิกฤตของเตา โดยการเคลื่อนที่แบบอนุภาคตกกลับลงมาจะเหมาะกับการเผา วัตถุติดที่มีขนาดเล็ก โดยการออกแบบถ้ามีการติดตั้งใบกวานที่ด้านในของเตาเผาจะทำให้วัตถุติดถูก ยกขึ้นจากกันเตาขึ้นไปตามผนังเตา และปล่อยให้ตกลงกลับลงมาที่กันเตาอีกครั้ง ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ วัตถุติดในเตาเผาได้รับความร้อนจากไอร้อนและผนังเตาได้อย่างทั่วถึงตลอดทั้งการเคลื่อนที่ตามแนว ยาวของเตาเผา (Trinks & Mawhinney, 2004)

ภาพตัดภายในเตาเผาแบบหมุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 โซนดังนี้

1) Enter Zone จะป้อนของเสียเข้าไปในเตาโดยผ่านประตูเตาความร้อนจากการแผ่รังสี โดยผนังเตาและของเสียส่วนที่เผาไหม้แล้วที่อยู่ด้านในจะระเหยน้ำที่อยู่ภายในอุณหภูมิในโซนนี้จะต่ำกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของเสียจะแห้งและเริ่มระเหยเป็นก๊าซ โดยปกติในโซนนี้จะไม่มีการเปลวไฟหรือซี้ถ้าจับที่ผนัง

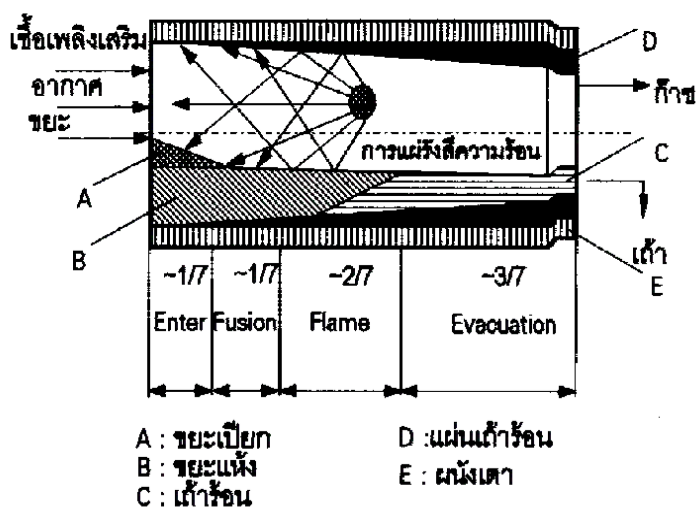
2) Fusion and Evaporation Zone อุณหภูมิในโซนนี้จะอยู่ที่ประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ จะสังเกตเห็นสารระเหยเกิดขึ้นอย่างรุนแรง

3) Flame Zone ณ บริเวณนี้อุณหภูมิของของเสียจะสูงถึง $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดการเผาไหม้ และเปลวไฟรวมทั้งซี้ถ้าจากของเสียที่เผาไหม้สมบูรณ์แล้ว

4) Evacuation Zone แผ่นซี้ถ้าจะจับผนังเตาในส่วนนี้โดยรอบก๊าซร้อนจากการเผาไหม้จะไหลออกไปสู่ห้องเผาไหม้หลัง ในขณะที่ซี้ถ้าจะลำเลียงออกที่บริเวณด้านท้ายเตา

เตาเผาผลอยแบบหมุนได้ออกแบบให้เอียงทำมุมกับแนวระดับเล็กน้อย และสามารถควบคุมเวลาในการเผาไหม้จากมุมเอียงและความเร็วรอบของเตาเผาได้ เตาเผาแบบหมุนออกแบบให้ทำมุมเอียงกับแนวระดับเล็กน้อยประมาณ 3 องศา ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ของเสียเคลื่อนตัวจากทางเข้าไปสู่ทางออก ดังนั้นสามารถควบคุมเวลาในการเผาไหม้จากมุมเอียงและความเร็วรอบของเตาเผาได้ ซึ่งปกติความเร็วรอบจะอยู่ในช่วง 0.25 – 2.5 รอบต่อนาที ทั้งนี้แล้วแต่สภาพการเผาไหม้ในเตา

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



ภาพที่ 25 โซนต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้ของเตาเผาแบบหมุน

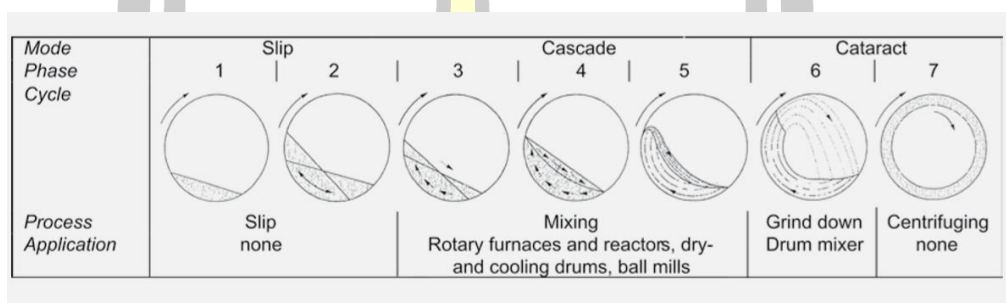
ที่มา: (มงคล จิ่งสถาปัตยกรรม และคณะ., 2546)

จากข้างต้นพบว่าในเตาเผาแบบหมุนจะมีโซนการเผาไหม้ที่หลากหลายตั้งแต่ drying / pyrolysis / gasification / combustion / post-combustion ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เตาเผาแบบหมุนมีความยืดหยุ่นในการเผาทำลายของเสียได้ทุกสถานะ

การเคลื่อนที่ของวัสดุในหลอดเตาเผาเป็นปัจจัยในการถ่ายโอนความร้อนจากผนังที่อุ่นของท่อเตาเผาไปยังวัสดุที่มีการเคลื่อนที่อยู่ 7 แบบดังนี้

1. Pure slip: การเคลื่อนตัวแบบลื่นไถล แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับวัสดุต่ำมากทำให้วัสดุไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปตามท่อได้สูงจึงไหลลื่นตกลงมาเหมือนเดิมอย่างรวดเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การเคลื่อนตัวแบบนี้ไม่ทำให้เกิดการกวนผสมกันของวัสดุ
2. Oscillation: การเคลื่อนตัวไถลกลับไปมา แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับวัสดุต่ำมาก แต่เมื่อเพิ่มรอบการหมุนทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหรือโมเมนตัม ทำให้วัสดุขึ้นลงไปตามผนังได้มากกว่า การเคลื่อนตัวแบบลื่นไถล การเคลื่อนตัวแบบนี้ไม่ทำให้เกิดการกวนผสมกันของวัสดุ
3. Periodic fall: ในการเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนที่ที่ 2 เป็น 3 การผสมของวัสดุจำนวนมากสามารถสังเกตการผสมของวัสดุจำนวนมากได้ที่พื้นผิว พื้นผิวของวัสดุถูกกำหนดโดยพื้นผิวที่มีระหวางมุมป้าน
4. Unroll: การเคลื่อนที่ของมุมนี้เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่วัสดุที่พื้นผิวซึ่งต่อเนื่องที่ด้านล่าง

5. Over-slope: การเคลื่อนที่แบบนี้ทำให้ขอบด้านบนของวัสดุจำนวนมากเพิ่มความสูงด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นและถูกปิดอย่างต่อเนื่องโดยการเลื่อนลง จึงเกิดการผสมกันมากขึ้น
6. Wave rollover: พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดจะเกิดการโรลโอเวอร์ขนาดใหญ่ซึ่งสามารถบดวัสดุจำนวนมากลงได้ การเคลื่อนที่แบบนี้เกิดขึ้นบ่อยครั้งหากอุปกรณ์ติดตั้งอยู่ในท่อ
7. Centrifugation: เฉพาะที่แรงเสียดทานสถิตที่เพียงพอระหว่างผนังท่อและวัสดุจำนวนมากเท่านั้น กระบวนการหมุนเหวี่ยงโดยทั่วไปสามารถสังเกตได้ที่แท่งดีทั้งหมดบนผนังท่อ



ภาพที่ 26 ประเภทของลักษณะการไหลในเตาเผาแบบหมุน

ที่มา: (Wübben, 2012)

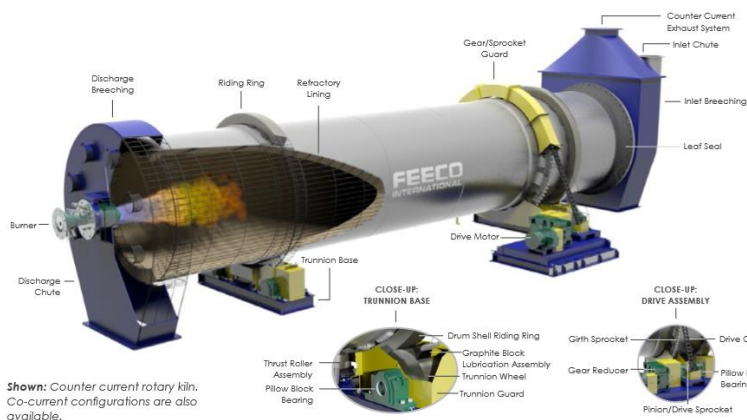
2.5.3 ประเภทของเตาเผาแบบหมุน

2.5.3.1 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired kilns)

เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรงพึ่งพาการสัมผัสโดยตรงระหว่างก๊าซในกระบวนการและวัสดุเพื่อให้ความร้อนวัสดุที่อุณหภูมิที่ระบุไว้ เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรงส่วนใหญ่อยู่อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อนเนื่องจากมีประสิทธิภาพมากกว่าเตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียว อย่างไรก็ตามอาจเป็นข้อเสียของเตาเผาแบบใช้เชื้อเพลิงโดยตรง ตัวอย่างเช่น การใช้แก๊สในกระบวนการเพื่อบำบัดวัสดุเตาเผาที่เผาโดยตรงนั้นจะผลิตก๊าซนอกจากตัวที่ต้องการซึ่งจะต้องได้รับการบำบัด นอกจากนี้วัสดุบางอย่างต้องทำในสภาพแวดล้อมเฉื่อยเพื่อไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนหรือไนโตรเจน เตาเผาแบบใช้เชื้อเพลิงโดยตรงจะไม่ใช่ตัวเลือกวัสดุทั่วไปในเตาเผาเชื้อเพลิงโดยตรงรวมถึง:

- แร่ธาตุ
- เซรามิกและดินเหนียว
- หินปูน
- ปูนซีเมนต์
- แร่เหล็ก

DIRECT-FIRED ROTARY KILN



ภาพที่ 27 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรง (Direct-fired kilns)

ที่มา: (The Rotary kiln Handbook.)

2.5.3.2 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียว (Indirect-fired kilns)

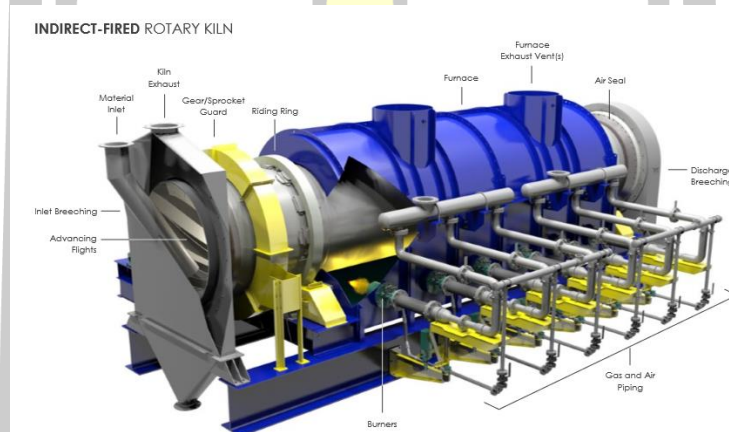
เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียวสามารถแปรรูปวัสดุในสภาพแวดล้อมที่เฉื่อยซึ่งวัสดุไม่เคยสัมผัสกับก๊าซ เตาเผาให้ความร้อนจากภายนอกโดยใช้ผ้าห่อหุ้มความร้อนและวัสดุจะถูกให้ความร้อนผ่านการสัมผัสกับเปลือกเตาเผาไอร้อน ในขณะที่วิธีนี้มีประสิทธิภาพน้อยกว่าเตาเผาแบบหมุนที่ใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรงแต่มีความจำเป็นในบางกระบวนการที่ต้องใช้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมอย่างเข้มงวดมากขึ้น ซึ่งอาจรวมถึงกรณีที่สารประกอบออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ในทำนองเดียวกันวัสดุบางชนิดอาจก่อให้เกิดสารประกอบกับไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง การใช้เตาเผาแบบใช้เชื้อเพลิงอัดจะให้สภาพแวดล้อมเฉื่อยที่จำเป็นสำหรับการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพ เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียวการควบคุมอุณหภูมิแม่นยำตามความยาวของเตาเผาเป็นข้อได้เปรียบในการตั้งค่าที่วัสดุที่อุณหภูมิตามระยะเวลาที่กำหนดขณะเคลื่อนที่ผ่านเตาเผา

นอกจากนี้ประโยชน์ของเตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียวคือเมื่อวัสดุที่ใช้ในการแปรรูปประกอบด้วยของแข็งที่ถูกบดละเอียดในเตาเผาแบบหมุนเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงแหล่งความร้อนคือก๊าซร้อน (ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้และอากาศ) ซึ่งไหลด้วยความเร็วโดยธรรมชาติ ก๊าซเหล่านี้สามารถพาอนุภาคผ่านการลากแบบระดับของการขึ้นรถไฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็วของแก๊ส ความหนาแน่นของแก๊ส ความหนาแน่นของอนุภาคและรูปร่าง เนื่องจากศักยภาพในการเปลี่ยนรูปวัสดุเผาแบบเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงจะต้องมีการออกแบบให้คำนึงถึงความเร็วของ

ก๊าซที่ได้รับอนุญาตซึ่งตรงข้ามกับข้อกำหนดการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างของวัสดุที่ดีที่สุดที่ใช้กันทั่วไปในแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียวคือ:

- คาร์บอนสีดำ
- ตกตะกอนทางเคมี
- ดินที่เป็นของแข็ง

เนื่องจากความร้อนจะถูกถ่ายโอนผ่านเปลือกเตาเผาแบบหมุนทางอ้อมจะไม่เรียงรายเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือก ดังนั้นเตาเผาแบบหมุนแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียวมักทำจากอัลลอยที่ทนต่ออุณหภูมิแทนที่จะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน แม้ว่าเตาเผาแบบใช้เปลวไฟให้ความร้อนโดยตรงจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็ไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่ต้องการในการตั้งค่าเช่นนี้เตาเผาที่เผาแบบใช้ไอร้อนอย่างเดียวจะให้ทางออกที่ดีที่สุด



ภาพที่ 28 เตาเผาแบบหมุนที่ใช้ไอร้อนอย่างเดียว (Indirect-fired kilns)

ที่มา: (The Rotary kiln Handbook.)

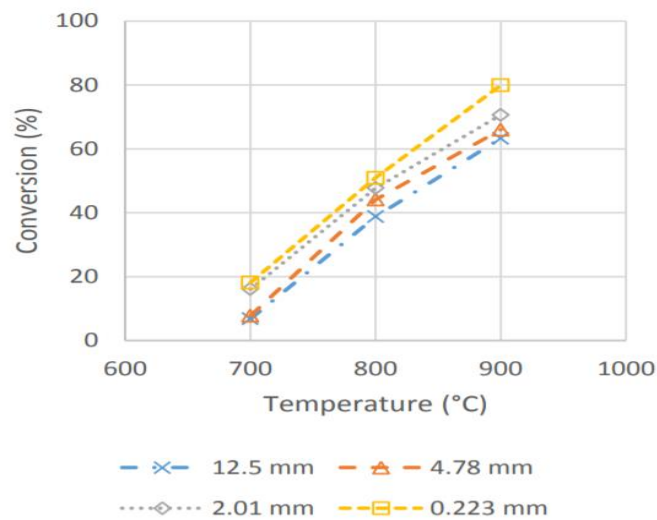
2.5.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิต

2.5.4.1 ขนาดอนุภาค

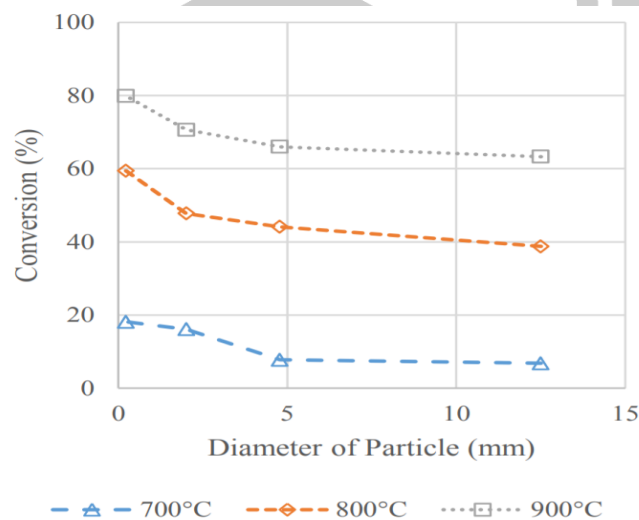
จากการศึกษาของ Wulandari และคณะ (2018) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเผาโดโลไมต์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ โดยการหมุนที่ใช้ในการทดลองคือ 3 รอบต่อนาที มุมเอียง 3 องศา การทดลองเผาใช้ขนาดอนุภาคต่าง ๆ ของวัสดุที่ป้อน พบว่า ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าสามารถเปลี่ยนรูปโดโลไมต์ได้ดีกว่าขนาดที่ใหญ่ และเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่งผลให้เกิดเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนรูปโดโลไมต์ได้มากขึ้น แสดงในภาพที่ 29 และพบว่าเมื่อป้อนวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตรทำให้

ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมออกไซด์ในเวลาที่จะเร็วกว่าการป้อนวัตถุดิบขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 30 และเมื่อใช้อุณหภูมิ 1,000 °C ทำให้โดโลไมต์เปลี่ยนรูปได้เร็วและได้ประสิทธิภาพสูงกว่าอุณหภูมิอื่น ๆ ดังภาพที่ 31

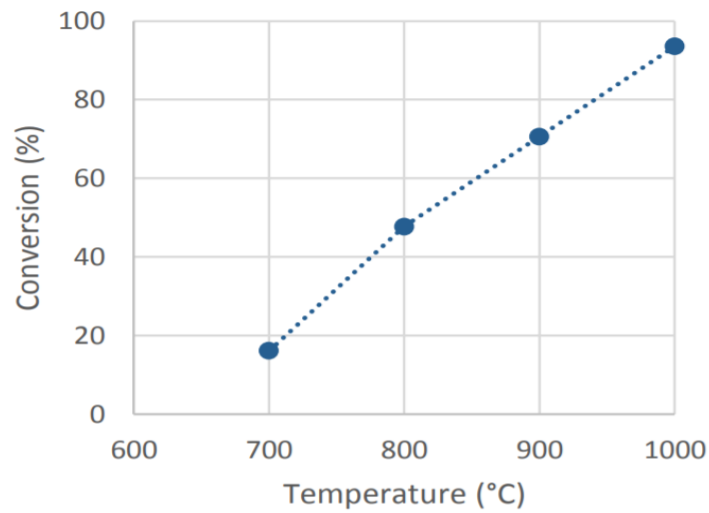
ขนาดของอนุภาคมีผลต่อการเปลี่ยนรูปอย่างมีนัยสำคัญน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคโดโลไมต์ การหมุนเตาเผาแบบหมุนช่วยกระจายความร้อนที่เข้ามาอนุภาคทั้งหมดภายในเตาเผา



ภาพที่ 29 ผลของอุณหภูมิต่อการเผาที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ
ที่มา: (Wulandari, Subagio, Tri Mursito, Juanjaya, & Alwi, 2018)



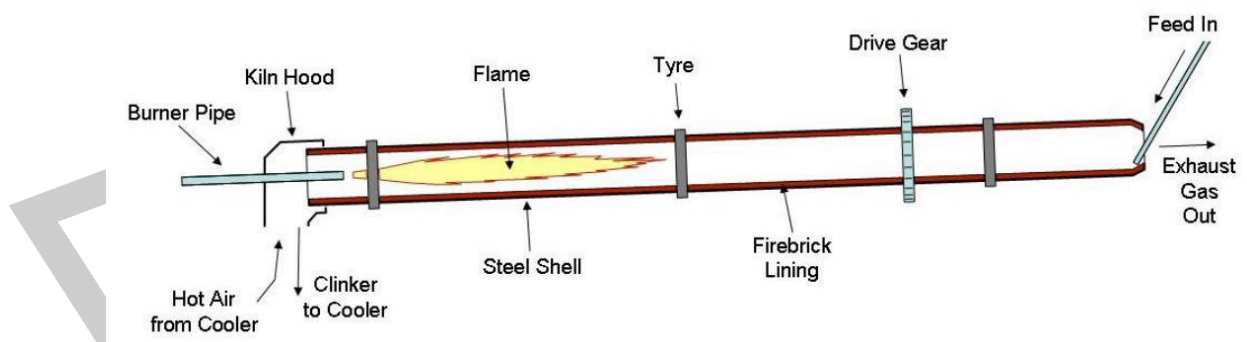
ภาพที่ 30 อิทธิพลของขนาดวัตถุดิบต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์
ที่มา: (Wulandari et al., 2018)



ภาพที่ 31 อิทธิพลของอุณหภูมิการแคลไซต์ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์
ที่มา: (Wulandari et al., 2018)

2.5.4.2 มุมเอียง

เตาเผาถูกสร้างให้มีมุมเอียง ซึ่งมุมเอียงที่เตาเผาขนาดเล็กสามารถปรับมุมเอียงได้ด้วยตนเองด้วยมือ โดยมุมเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 10 องศา (ภาพที่ 32) ส่วนเตาเผาขนาดใหญ่ในกรณีส่วนใหญ่จะใช้ระบบยกไฮดรอลิกในการปรับมุมเอียงซึ่งให้ความลาดเอียงอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 องศา (Wübben, 2012)



ภาพที่ 32 คำโครงของเตาเผาแบบหมุน

ที่มา: (Valle, 2012)

จากการศึกษาของ Bongo Njeng และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาผลต่อรูปร่างของวัสดุและพารามิเตอร์ในการไหลของวัสดุในเตาเผาแบบหมุน พบว่า ความลาดเอียงของเตาเผาในการใช้งานทางอุตสาหกรรมบางประเภทจะใช้เตาเผาแบบหมุนในแนวนอน เตาเผาส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบให้ทำงานในตำแหน่งเอียง ดังนั้นใช้ความลาดชัน 2 ถึง 5 องศา (Bongo Njeng, Vitu, Clause, Dirion, & Debacq, 2015)

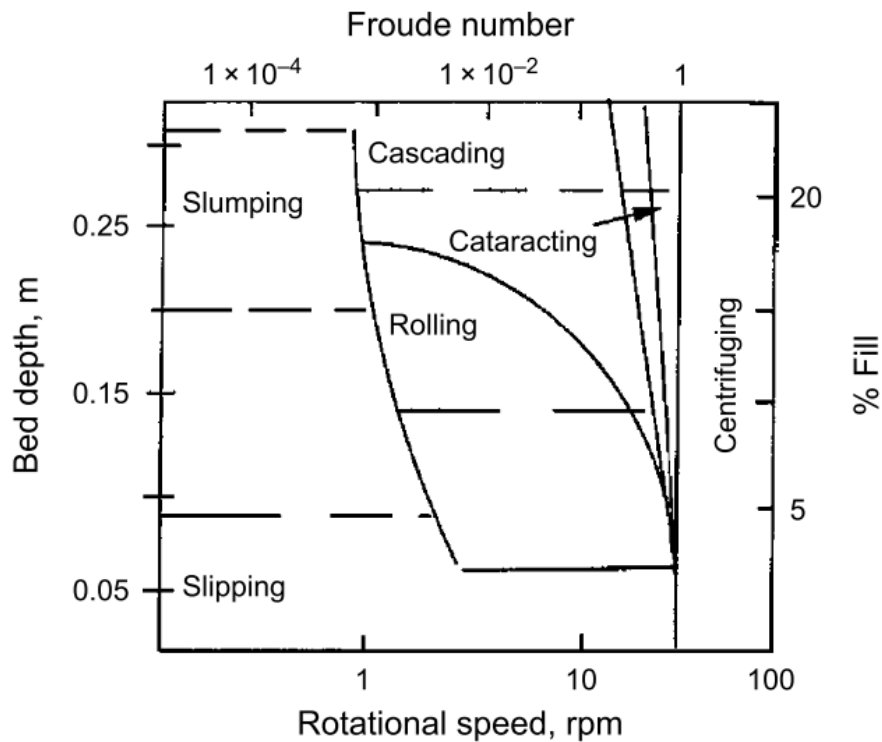
2.5.4.3 เวลา

จากการศึกษาของ Wulandari และคณะ (2018) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเผาโดโลไมต์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ โดยการหมุนที่ใช้ในการทดลองคือ 3 รอบต่อนาที มุมเอียง 3 องศา การทดลองเผาใช้ขนาดอนุภาคต่าง ๆ ของวัสดุที่ป้อน พบว่า เมื่อป้อนวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมออกไซด์ในเวลาที่ใช้เร็วกว่าการป้อนวัตถุดิบขนาดใหญ่ และเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โดโลไมต์เปลี่ยนรูปได้เร็วและได้ประสิทธิภาพสูงกว่าอุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาในการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค อุณหภูมิ ความเร็วรอบในการหมุน และมุมเอียง (Wulandari et al., 2018)

2.5.4.4 ความเร็วรอบ

การหมุนเกิดขึ้นผ่านมอเตอร์สลับที่ควบคุมความถี่ และเวลาของวัสดุในหลอดสามารถปรับได้ตามจำนวนรอบและความลาดชันของหลอดหมุน จำนวนการหมุนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1 ถึง 10 รอบต่อนาที (Wübben, 2012) และจากการศึกษาของ Wulandari และคณะ (2018) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเผาโดโลไมต์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ โดยการหมุนที่ใช้ในการทดลองคือ 3 รอบต่อนาที มุมเอียง 3 องศาการทดลองเผาใช้ขนาดอนุภาคต่าง ๆ ของวัสดุที่ป้อน (Wulandari et al., 2018)

จากการศึกษาของ Valle (2012) กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบในเตาเผาแบบหมุน พบว่า การที่เพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนและการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบในเตามากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 20 ของปริมาตรเตาเผา) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการกวนวัสดุที่มากขึ้น และเกิดถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น (Valle, 2012)



ภาพที่ 33 รูปแบบการเคลื่อนตัวต่อความเร็วรอบและการเติมวัสดุในเตา
ที่มา: (Valle, 2012)

2.5.4.5 อัตราการป้อน

การออกแบบระดับของการป้อน (ปริมาณการป้อน) ของเตาเผาแบบหมุนจะอยู่ประมาณ 10% ของปริมาตรของหลอดหมุน และขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการเผา เช่น ผง หรือเม็ดเล็ก เป็นต้น (Wübben, 2012) และจากการศึกษาของ กฤษ มณีรัตน์ (2542) ศึกษาการออกแบบเตาเผาของเสียชุมชนแบบ Rotary Kiln ขนาดเล็กเพื่อคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผาในรูปของประสิทธิภาพการเผาไหม้ และประสิทธิภาพการทำลายของเสีย ศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเผาไหม้ 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการป้อนอากาศที่ 150, 200 และ 250% ของอากาศส่วนเกิน อัตราการป้อนขยะที่ 15, 20 และ 25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบเตาเผา 0.6, 0.8 และ 1 รอบต่อนาที พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ อัตราการป้อนอากาศ 250% ของอากาศส่วนเกิน อัตราการป้อนขยะ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบเตาเผา 0.6 รอบต่อนาที อุณหภูมิภายในเตาเผาที่สภาวะคงที่ให้ค่าสูงสุดประมาณ 790 °C (กฤษ มณีรัตน์, 2542)

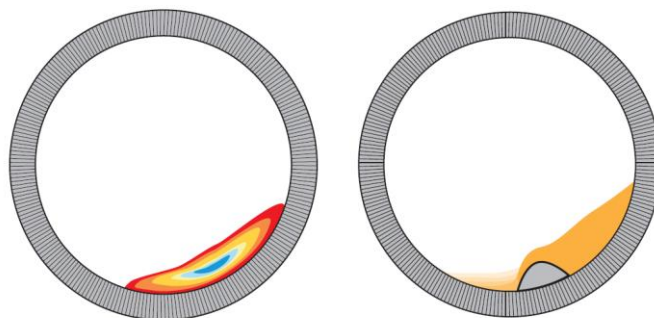
2.5.4.6 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

ความร้อนของปฏิกิริยาในการใช้งานเตาเผาจำนวนมากต้องใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่นในการเผาหินปูนถึงปูนขาวต้องใช้พลังงานเพื่อแยกแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ออกเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้จะใช้พลังงานแล้วยังต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเพื่อให้ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้น การแยกตัวของหินปูนจะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า $900\text{ }^\circ\text{C}$ (“The Rotary kiln Handbook.”)

เกียรติฟ้า และ อัญชิสา (2554) ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งการวางหัวเผาต่อการกระจายความร้อนในเตาโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์วอลุ่ม เตาเผาที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเท่ากับ 26 อัตราการหมุนเท่ากับ 1-1.5 รอบต่อนาที มีมุมเอียงของเตาเท่ากับ 1.8 องศา พบว่าการตำแหน่งหัวเผามีนัยสำคัญต่อการกระจายความร้อนภายในเตา ซึ่งในการเดินระบบต้องมีการปรับเทียบอาจทำได้แบบจำลองหรือใช้วิธีปรับเทียบโดยการตรวจวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้จากไอเสีย (เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต และ อัญชิสา ยี่สุนแซม, 2554)

จากการศึกษาของมงคล และคณะ (2546) ได้ทำศึกษาหารูปแบบการเผาทำลายของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการที่เหมาะสมทั้งประสิทธิภาพการเผาทำลาย การใช้อุณหภูมิ $1,000\text{ }^\circ\text{C}$ เตามีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเตา เท่ากับ 2.7 พบว่าการผสมของเสียไม่ติดไฟและของเสียติดไฟเพื่อป้อนเข้าเตาเผา รวมถึงการเดินระบบต่อเนื่องจะทำให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลดลงเนื่องจากไม่ต้องเสียเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาก่อนปฏิบัติงาน ส่วนการอุ่นเตาเผาให้เท่ากับอุณหภูมิปฏิบัติงานสำคัญต่อการปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพของระบบเตาเผา ส่วนเตาเผาที่มีความร้อนสะสมมาจากการเผาไหม้เมื่อการปฏิบัติงานที่ผ่านมาทำให้ช่วงเวลาอุ่นเตาล้นลง (มงคล จึงสถาปัตย์ชัย และคณะ, 2546)

จากการศึกษาของ ฤมล (2540) ได้ศึกษาการกระจายอุณหภูมิผ่านผนังเตา พบว่าการกระจายของอุณหภูมิของผนังเตาด้านในสัมผัสกับก๊าซสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิจะสูงมาก เนื่องจากได้รับความร้อนจากก๊าซมาเก็บสะสมไว้ในผนังเตา และค่อย ๆ ลดลงจนถึงผนังเตาด้านนอก เพราะความร้อนส่วนหนึ่งจะถ่ายเทออกไปยังบรรยากาศภายนอก และสังเกตการกระจายของอุณหภูมิผ่านผนังเตาด้านในสัมผัสของแข็งได้ คือ อุณหภูมิของผนังเตาจะลดลงจากกึ่งกลางของผนังเตาทั้ง 2 ด้าน เพราะอุณหภูมิของผนังเตาด้านในสัมผัสกับของแข็งจะลดลงเนื่องจากความร้อนจากผนังเตาจะส่งถ่ายไปยังของแข็ง และอุณหภูมิของเตาด้านนอกลดลงเพราะถูกถ่ายเทไปให้บรรยากาศภายนอก (ฤมล ลากแก้ว, 2540)



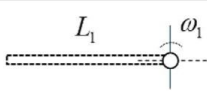
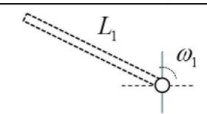
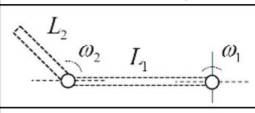
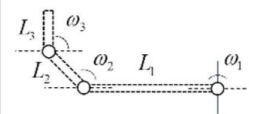
ภาพที่ 34 การกระจายตัวของความร้อนในวัตฤติบเมื่อไม่มีไบกวน (ก) และการกระจายตัวของความร้อนในวัตฤติบได้รับอย่างสม่ำเสมอเมื่อมีไบกวนในเตา (ข)

ที่มา: (“The Rotary kiln Handbook.”)

จากภาพที่ 34 (ก) แสดงการกระจายตัวของความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัตฤติบที่หมุนได้ไม่ดีเนื่องจากไม่มีไบกวน ส่วนการเพิ่มไบกวนแสดงในภาพที่ 34 (ข) ช่วยในการหมุนและการกระจายความร้อนในวัตฤติบได้รับอย่างสม่ำเสมอภายในเตา

การติดตั้งไบกวน (Lifter) จะส่งผลให้วัตฤติบภายในเตาได้รับความร้อนจากไอร้อนและผนังเตาได้อย่างทั่วถึงและยังส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังเตาและจากไอร้อนไปยังวัตฤติบสูงขึ้นด้วย ไบกวนที่นิยมใช้ดังแสดงในภาพที่ 35 ไบกวนแบบตรง (Lifter A-B) สามารถยกวัตฤติบไปด้านบนของเตาเผาครั้งละไม่มาก ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าแบบ (Lifter C-D) ซึ่งมีตะขอเกี่ยววัตฤติบขึ้นไปได้มากกว่า 90 องศา (ตอนบนของเตา) ทำให้เกิดการตกกลับของวัตฤติบและถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า อย่างไรก็ตามการติดตั้ง (Lifter C-D) จะติดตั้งภายในเตายากมากกว่าและอาจส่งผลกระทบต่อระบบการหมุนของเตาเผาแบบหมุนด้วย

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

Type	Geometry	Segment size [m]	Inclination [°]
Lifter A		L1) 0.2	omega1) 180
Lifter B		L1) 0.2	omega1) 150
Lifter C		L1) 0.15 L2) 0.07	omega1) 180 omega2) 135
Lifter D		L1) 0.15 L2) 0.07 L3) 0.05	omega1) 180 omega2) 135 omega3) 90

ภาพที่ 35 ลักษณะของไบกวนที่นิยมติดตั้งในเตาเผา
ที่มา: (Lee & Choi, 2013)

2.5.5 สมการในการออกแบบเบื้องต้น

สมการในการคำนวณของการออกแบบเตาเผาจะใช้สมการของ (Niessen & Walter R., 2010) โดยจะแสดงวิธีการคำนวณดังนี้

1) การคำนวณหาความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา ต้องทราบระยะเวลาการกักเก็บของเสีย ความเร็วรอบในการหมุนเตาเผา และมุมเอียงของเตาเผา โดยจะแสดงสมการการคำนวณดังสมการที่ 1

$$\theta = \frac{0.19 LT}{NDS}$$

สมการที่ 1

โดยที่

LT คือความยาวของเตาเผา (m)

θ คือ เวลาที่กักเก็บของเสีย (min)

N คือ ความเร็วรอบ (RPM)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

S คือ มุมเอียงของเตาเผา (m/m)

2) การคำนวณหาปริมาตรเตาเผา ต้องทราบความยาวของเตาเผา และเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผา เพื่อใช้ในการคำนวณโดยจะแสดงสมการการคำนวณดังสมการที่ 2

$$V = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 (LT)$$

สมการที่ 2

โดยที่

V คือ ปริมาตรเตาเผา (m³)

LT คือความยาวของเตาเผา (m)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

3) การคำนวณหา loading ของวัตถุดิบที่ต้องป้อนเข้าเตาเผา อัตราการป้อนวัตถุดิบที่เป็นของเสียของเตาเผาแบบหมุนโดยทั่วไปมีอัตราการป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 20% ของปริมาตรเตาเผา และต้องทราบปริมาตรของเตาเผา ระยะเวลาการกักเก็บของเสีย เพื่อใช้ในการคำนวณโดยจะแสดงสมการการคำนวณดังสมการที่ 3

$$\phi = 100 \frac{F\theta}{V},$$

สมการที่ 3

โดยที่

ϕ คือ อัตราการรองรับของเตาเผา (%)

F คือ loading ของวัตถุดิบ (m³/min)

θ คือ ระยะเวลาการกักเก็บของเสีย (min)

V คือ ปริมาตรเตาเผา (m³)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

จากการคำนวณดังสมการที่ 3 จะได้ค่า loading ของวัตถุดิบในหน่วย (m^3/min) ดังนั้น การที่จะป้อน loading เข้าในเตาเผาต้องทำให้เป็นหน่วย kg/min โดยจะคิดจากความหนาแน่นของเปลือกไข่ แสดงสมการการคำนวณดังสมการที่ 4

$$F (kg/min) = F (m^3 / min) \times \rho \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่

F คือ loading ของวัตถุดิบ (kg/min)

F คือ loading ของวัตถุดิบ (m^3/min)

ρ คือ ความหนาแน่นของเปลือกไข่ (kg/m^3)

องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ คือแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปของแคลไซต์ตั้งแต่ 94 - 97% และสารอินทรีย์ 3 - 4.5% นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น MgO (0.83%), SO_3 (0.66%), P_2O_5 (0.43%), Al_2O_3 (0.15%), K_2O (0.08%), SiO_2 (0.07%), Cl_2O_3 (0.06%) และ SrO (0.04%) ในองค์ประกอบมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จากการศึกษาเพื่อศึกษาซึ่งอาจเป็นผลมาจากประเภทของอาหารไก่และสิ่งสกปรกที่เป็นไปได้ที่เกิดจากโปรตีนอินทรีย์และเยื่อหุ้มเซลล์

สีของเปลือกไข่ไม่ได้กำหนดปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างเช่น เปลือกไข่สีน้ำตาลมีรายงานว่ามีความเข้มข้นแคลเซียมคาร์บอเนต 96–97% และสารอินทรีย์ 3–4% ในขณะที่เปลือกไข่สีขาวพบว่ามีความเข้มข้นแคลเซียมคาร์บอเนต 94% และสารอินทรีย์ 6% จากการค้นพบนี้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งในเปลือกไข่สีน้ำตาลและสีขาวถือว่าเท่ากัน

ส่วนความหนาแน่นของเปลือกไข่ได้รับการวัดปริมาณจากการศึกษาต่าง ๆ 2.50 g/cm^3 , 2.53 g/cm^3 , 2.59 g/cm^3 และ 2.62 g/cm^3 ความหนาแน่นของเปลือกไข่มีน้อยกว่าแร่หินปูนเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากลักษณะรูพรุนของเปลือกไข่ มีรายงานว่าความหนาแน่นของเยื่อหุ้มเปลือกนอกมีขนาดเล็กลงโดยมีค่า 1.36 g/cm^3 (Owuamanam & Cree, 2020)

นอกจากนี้สัดส่วนความยาวของเตาเผาต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และความชันของเตาเผาแบบหมุนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สรุปได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ขนาด มุมเอียง และอุณหภูมิในการเดินระบบของเตาเผาแบบหมุนในอุตสาหกรรม

Applications	Length/inner Diameter ratio	Inclination Angle (degree)	Temperature (°C)
ปูนซีเมนต์ (Cement)	14.7	4 % slope	850-1350
การเผา (Calcination)	6.5	1-4 % slope	950-1450
โรงงานอลูมิเนียม (Aluminum plant)	1.4	3.5-5	800
ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	12.3	2-6	800-1100
เตาเผาขยะ (Incinerator)	2.7	1-2	3000
ไพโรไลซิส (Pyrolysis)	12.5	Adequate	800-900

ที่มา: (Vijayan & Sendhilkumar, 2014)

เตาเผาปูนขาวแบบแนวตั้งได้ออกแบบจำลองและดำเนินการตามการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาการเผาของแหล่งหินปูน เตาเผามีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 61% และประสิทธิภาพการเผาที่ 83% (Okonkwo, Adefila, & Beecroft, 2012)

ในส่วนของค่าของคุณสมบัติการขนส่ง, การแพร่กระจาย, การนำไฟฟ้า, สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชั้นปูนขาวที่ใช้งาน, พารามิเตอร์การกระจายและพารามิเตอร์การพา คือการได้รับการแปรผันของเวลาการเผา (t_c) สำหรับช่วงของขนาดอนุภาคและความดันของระบบ ดังแสดงตารางที่ 9 และ 10

พหุ ประ โท ชี เว

ตารางที่ 9 ค่าที่กำหนดของพารามิเตอร์การกระจายและการไหลเวียนของ Jakura Lime

อุณหภูมิ °C	พารามิเตอร์การกระจาย Diffusive Parameter	พารามิเตอร์การไหลเวียนความร้อน Convective Parameter
900	0.148	0.175
960	0.094	0.368
1000	0.105	1.080
1060	0.266	0.572
1080	4.66×10^{-3}	0.568

ตารางที่ 10 ผลลัพธ์ที่คำนวณได้สำหรับการเผาของ Jakura ในขนาดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิการเผาที่ความดันเตาเผาที่ 100 mmH₂O

Temp. °C	รัศมี (ซม.) / เวลา (วินาที)								
	0.4	1.2	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6	2.0	2.2
900	4461.6	2285.1	10503.8	14117.7	18126.7	22530.8	27380	38114.2	44099
960	939.3	2050	2663.2	3819.4	5171.8	6720.4	8465.2	12543	14876.5
1000	312.86	620.9	1030.1	1491.9	2151.7	2864.2	3677.7	5608.1	6724.9
1060	149.6	265.5	408.7	579.4	777.4	1002.8	1255.6	1605.7	2176.3
1080	2136	4748.6	8390.9	13062.9	18764.7	25496.2	3325.7	5186.9	6271.5

ผลการจำลองถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดขนาดของโหนดการเผาไหม้ เวลาสำหรับการเผาที่สมบูรณ์ของขนาดประจุของเตาเผาหมายถึงเวลาที่อยู่ชั้นต่ำของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาในเขตเผาซึ่งเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว โหนดอุณหภูมิการปรับขนาดบนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนจากโหนดการเผาไหม้โหนดนี้มีการกำหนดขนาดเพื่อให้มีความร้อนสูงสุดจากก๊าซร้อน

ประสิทธิภาพของเตาเผาจะพิจารณาจากการประมาณประสิทธิภาพทั้งสามประเภท ได้แก่

1. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนซึ่งได้จากการสกัดด้วยความร้อน / การเผาด้วยความร้อน
2. ประสิทธิภาพการเผา
3. ประสิทธิภาพของเตาเผาโดยรวมซึ่งกำหนดโดย

3.1 คุณสมบัติการออกแบบ

เตาเผาความจุของเตาเผาคือ 200 กิโลกรัม / วัน เตาเผามีระบบเตาคู่และใช้ LPG (ก๊าซปิโตรเลียมเหลว)

ตารางที่ 11 ขนาดของโซนเตาเผา

โซน	พารามิเตอร์			
	ความหนา	ความสูงของโซน	เส้นผ่านศูนย์กลางของโซน	ปริมาตรของโซน
Preheating zone	0.14 m	0.81 m	0.20 m	25.4×10^{-3}
Upper burning zone	0.16 m	0.1 m	0.18 m	2.54×10^{-3}
Lower burning zone	0.19 m	0.09 m	0.15 m	1.59×10^{-3}
Finishing zone	0.19 m	0.12 m	0.15 m	2.12×10^{-3}
Cooling zone	0.19 m	0.30 m	0.15 m	5.3×10^{-3}

คำอธิบาย:

t_k = ความหนา

H_k = ความสูงของโซน

D_k = เส้นผ่านศูนย์กลางของโซน

V_k = ปริมาตรของโซน

3.2 เตาเผาผลิต

การบ้อน (Jakura limestone) จากอนุภาค 4 มม. ถึง 14 มม. ถูกเผาเตาเผาได้เดินระบบตามระยะเวลาที่กำหนดในขณะที่รักษาระดับอุณหภูมิที่ต้องการในเขตเผาไหม้ การวิเคราะห์หินปูนที่ผ่านการเผาแล้วจะวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของปูนขาวอิสระ ปูนขาวทั้งหมดและการเปลี่ยนรูปค่าที่ได้รับจะแสดงค่าเฉลี่ยสำหรับช่วงของขนาดที่คำนวณตามทีแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลของการเผาที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาท)	เปอร์เซ็นต์ของปูนขาว อิสระ	เปอร์เซ็นต์ของปูนขาว ทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยน รูป
5	3.36	39	8.5
10	7.16	62.3	11.5
15	59.0	76.6	78
20	61.0	77	79
25	64.5	77.3	83.4

3.3 เตาเผาอุณหภูมิ

พัฒลมเริ่มทำงานเตาเริ่มต้นด้วยการส่งก๊าซที่ปรับให้เป็นอัตราการไหล 1.4 กก. / ชม. สำหรับแต่ละเตา 10 ตำแหน่งที่เลือกตามเพลตาเตาเผาที่วัดจากด้านล่างถูกเชื่อมต่อกับ thermocouple กับแผงอ่านค่าอุณหภูมิแบบดิจิทัล การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของโซนต่าง ๆ ถูกตรวจสอบเมื่อเวลาผ่านไปพร้อมกัน

3.4 การประมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และการเปลี่ยนรูป

การใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจะถูกใช้ในการพิจารณาของปูนขาวอิสระ ปูนขาวทั้งหมดในตัวอย่างที่ผ่านการเผาและระดับการเปลี่ยนรูป ปูนขาวอิสระซึ่งถูกกำหนดโดยขั้นตอนแรกของการไตเตรทแสดงถึงปริมาณที่แท้จริงของแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริง ส่วนปูนขาวทั้งหมดซึ่งถูกกำหนดโดยขั้นตอนที่สองของการไตเตรทจะแสดงจำนวนหินปูนที่เปลี่ยนรูปแล้วทั้งหมด

ในส่วนกรณีของ Eeom และคณะ (2013) ได้วิเคราะห์และการประยุกต์ใช้ตัวอย่างของโมเดลโดยใช้เตาเผาแบบหมุนเงื่อนไขการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์จะแสดงในตารางที่ 13 และ 14 ในกรณี (I) และ (II) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ให้ความร้อนโดยตรงซึ่งเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดเพื่อให้เป็นแหล่งความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนความยาว / เส้นผ่าศูนย์กลาง 24 ดังแสดงในตารางที่ 13 ส่วนกรณี Case III เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอัตราส่วนความยาว / เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ซึ่งเป็นเตาเผาแบบหมุนสำหรับการลดโลหะ คือระบบทำความร้อนทางอ้อมหรือไอร้อนอย่างเดียวที่เพิ่มอุณหภูมิภายในโดยการทำความร้อนผนังด้านนอกของเตาเผาผ่านแหล่งความร้อนภายนอก ดังแสดงในตารางที่ 14 (Eeom, Hahn, Lee, & Choi, 2013)

ตารางที่ 13 การทำงานของเตาเผาแบบหมุนที่เผาไหม้โดยตรง

Rotary kiln	อัตราส่วน (L/D)	24
	ความเร็วในการหมุน	1-2 rpm
	ความจุ	10%
Fuel	ชนิด	coal
	อัตราการไหล	6 t/hr
Reductant	ลักษณะ	solid phase
	อัตราการไหล	8 t/hr
Solid material	อัตราการไหล	120 t/hr
	เวลาที่อยู่ในเตา	120 min

ที่มา: (Eeom et al., 2013)

ตารางที่ 14 การใช้งานของเตาเผาแบบหมุนโดยอ้อม

Rotary kiln	อัตราส่วน (L/D)	12
	ความเร็วในการหมุน	1-2 rpm
	ความจุ	10%
Heating	Type	electric
	อุณหภูมิจากผนัง	ave. 800 °C
Reductant	ลักษณะ	gas phase
Solid material	อัตราการไหล	1 t/hr
	เวลาที่อยู่ในเตา	90 min

ที่มา: (Eeom et al., 2013)

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เปลือกไข่ไก่

เปลือกไข่ไก่ที่นำมาศึกษาเป็นเศษเปลือกไข่ไก่จากโรงฟักไข่สูงเนินในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เลขที่ 377 หมู่ 1 ถนนมิตรภาพ ตำบลมะเกลือเก่า อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา 30170

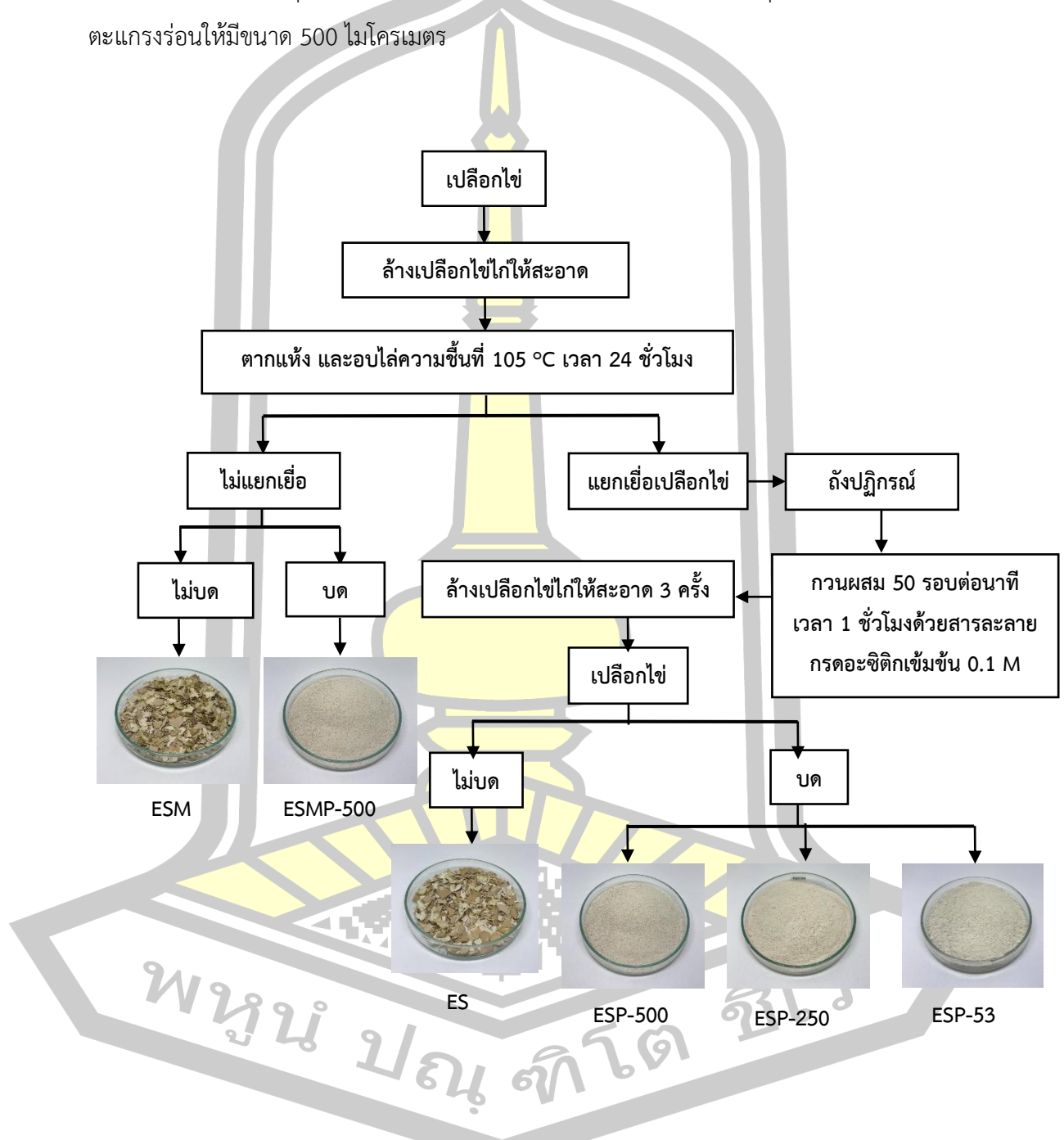
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.2.1 เครื่องปั่นยี่ห้อ Panasonic รุ่น MX-AC 400
- 3.2.2 ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ (Sieve) No. 35, 60 และ 270
- 3.2.3 ผ้าใบสำหรับตากเปลือกไข่
- 3.2.4 ถังเก็บเปลือกไข่ขนาดต่าง ๆ
- 3.2.5 เต้าเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการ
- 3.2.6 เต้าอบลมร้อน (Hot air oven)
- 3.2.7 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.2.8 เครื่องชั่งสาร
- 3.2.9 ถุงซิปล็อกตัวอย่าง
- 3.2.10 ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างทางออก
- 3.2.11 ถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อเปลือกไข่
- 3.2.12 กรดอะซิติก

3.3 การเตรียมเปลือกไข่ไก่

เปลือกไข่ไก่มาจากโรงฟักไข่สูงเนินในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) นำมาล้างด้วยน้ำให้สะอาด ทำการตากแห้ง และอบให้แห้งในเต้าอบลมร้อนอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วิธีการแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่โดยใช้ถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่โดยมีถังกวนผสมขนาด 150 ลิตร คือกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ทางเคมีและถังแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่คือกระบวนการเชิงกล แยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ที่สภาวะกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา 60 นาที ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 M แล้วนำเปลือกไข่และเยื่อเปลือกไข่ที่แยกได้นำไปล้างน้ำให้สะอาด 3 ครั้ง แยกเปลือกไข่และ

เปลือกไข่ที่มีเยื่อหุ้มเปลือกไข่เก็บไว้บางส่วนที่ไม่บด และอีกส่วนนำเปลือกไข่ไปบดด้วยเครื่องป่นยี่ห้อ Panasonic รุ่น MX-AC400 ร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาด 500, 250, 53 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเปลือกไข่ที่มีเยื่อหุ้มเปลือกไข่ไปบดด้วยเครื่องป่นยี่ห้อ Panasonic รุ่น MX-AC400 ร่อนผ่าน ตะแกรงร่อนให้มีขนาด 500 ไมโครเมตร



ภาพที่ 36 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเปลือกไข่

3.4 ศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้

ศึกษาขนาดของเปลือกไข่ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

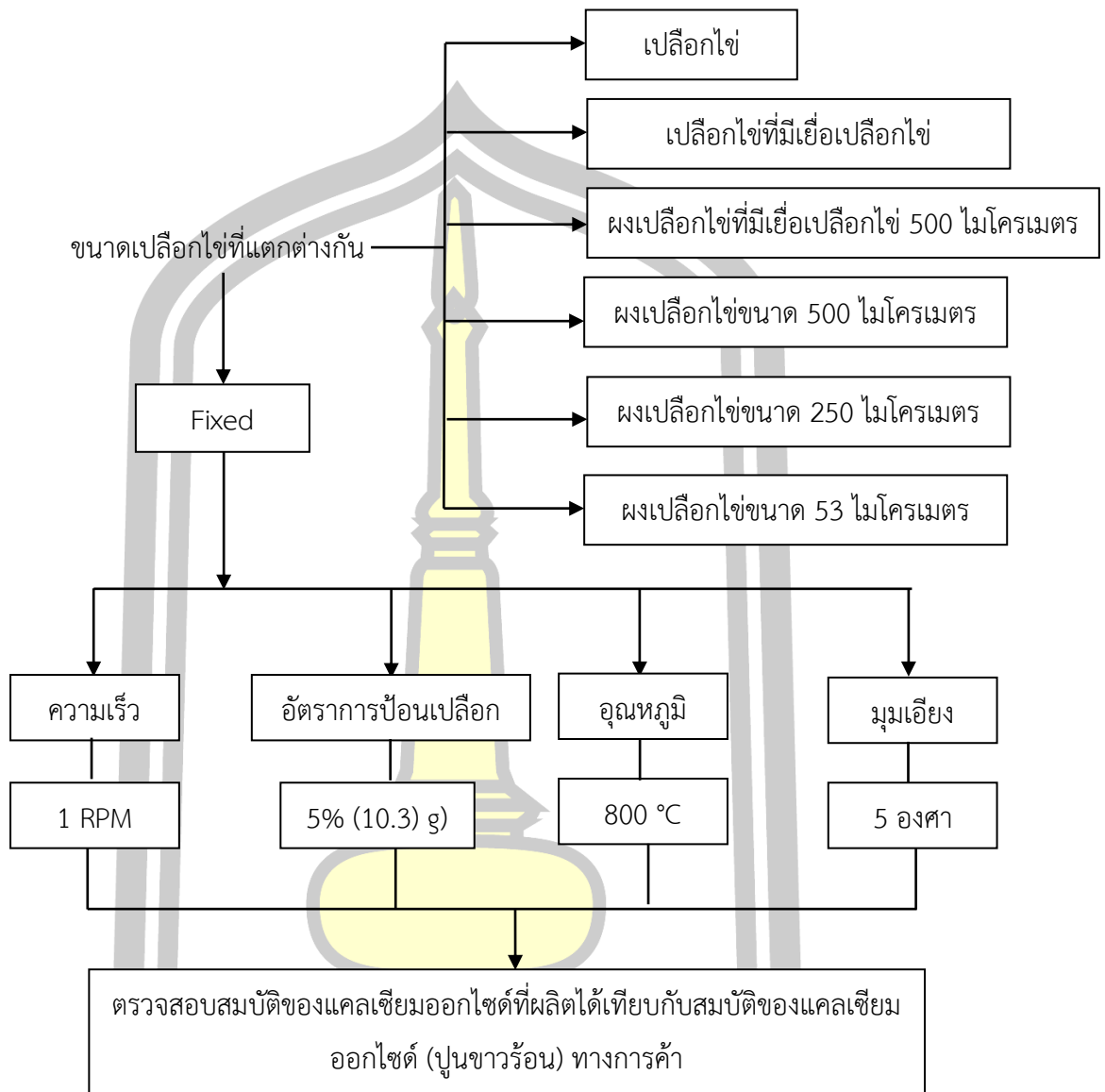
นำเปลือกไข่ที่ผ่านการล้างและบดโดยมี 6 ขนาดที่แตกต่างกัน คือ เปลือกไข่ เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ ผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร และผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร แล้วป้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการป้อน 5% ของปริมาตรเตา ความเร็วรอบการหมุน 1 รอบต่อนาที โดยให้ความร้อนในเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 800 °C มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที โดยเมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อนตัวอย่างจะเคลื่อนตัวออกด้านทางออก และทำการเก็บตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นแบบสุญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งผลการศึกษาจะทำให้ทราบขนาดของเปลือกไข่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์

ตัวแปรต้น ขนาดของเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

- เปลือกไข่
- เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่
- ผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร
- ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร
- ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร
- ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร

ตัวแปรควบคุม

- ความเร็วรอบ 1 รอบ/นาที
- อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5% (10.3 กรัม)
- อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
- มุมเอียงเตาเผา 5 องศา



ภาพที่ 37 แผนผังขั้นตอนการศึกษาขนาดของเปลือกไข่ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

พูน ปณ ทิโต ชีเว

3.5 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้

ศึกษาความเร็วรอบในการหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

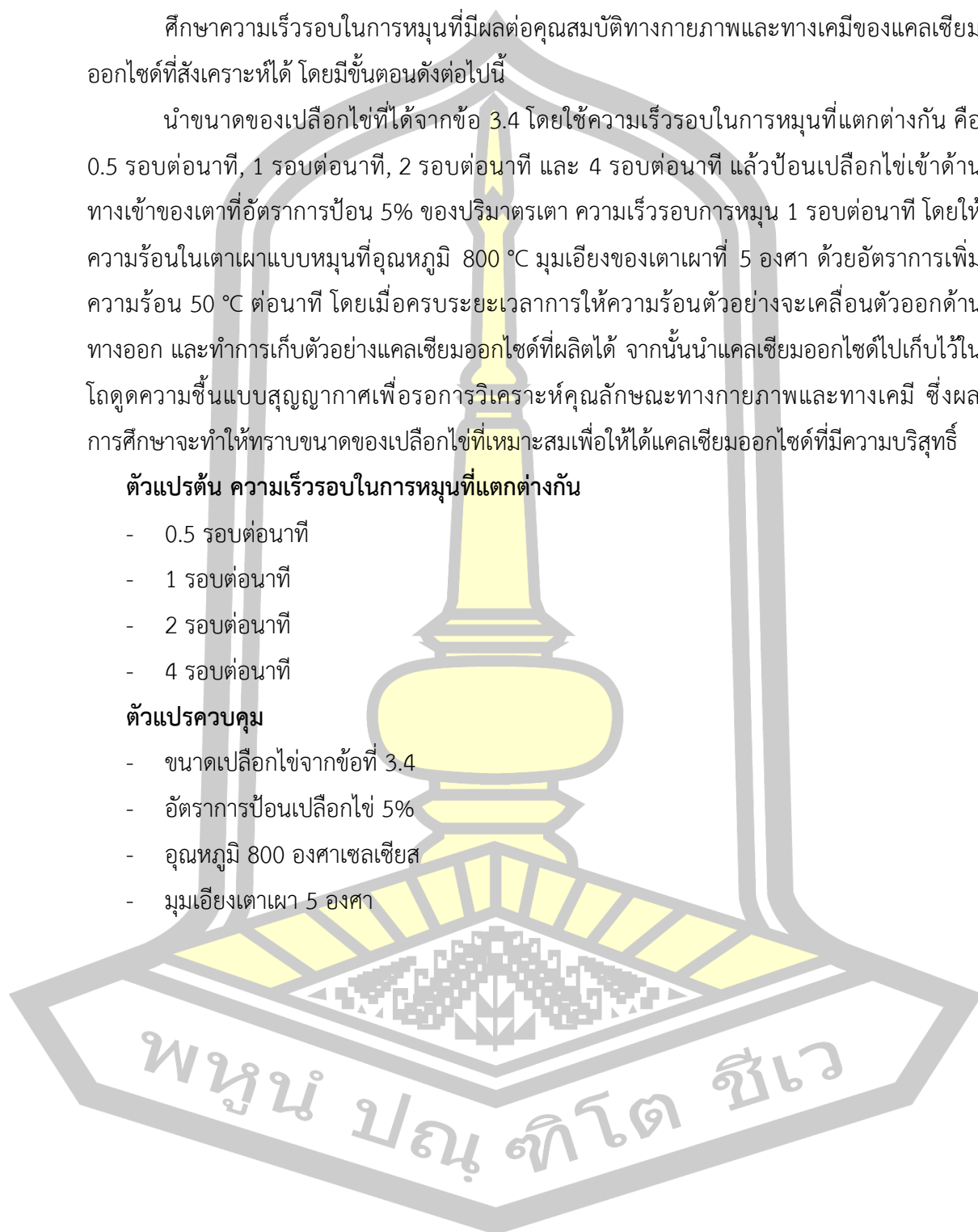
นำขนาดของเปลือกไข่ที่ได้จากข้อ 3.4 โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน คือ 0.5 รอบต่อนาที, 1 รอบต่อนาที, 2 รอบต่อนาที และ 4 รอบต่อนาที แล้วป้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการป้อน 5% ของปริมาตรเตา ความเร็วรอบการหมุน 1 รอบต่อนาที โดยให้ความร้อนในเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 800 °C มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที โดยเมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อนตัวอย่างจะเคลื่อนตัวออกด้านทางออก และทำการเก็บตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นแบบสูญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งผลการศึกษจะทำให้ทราบขนาดของเปลือกไข่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์

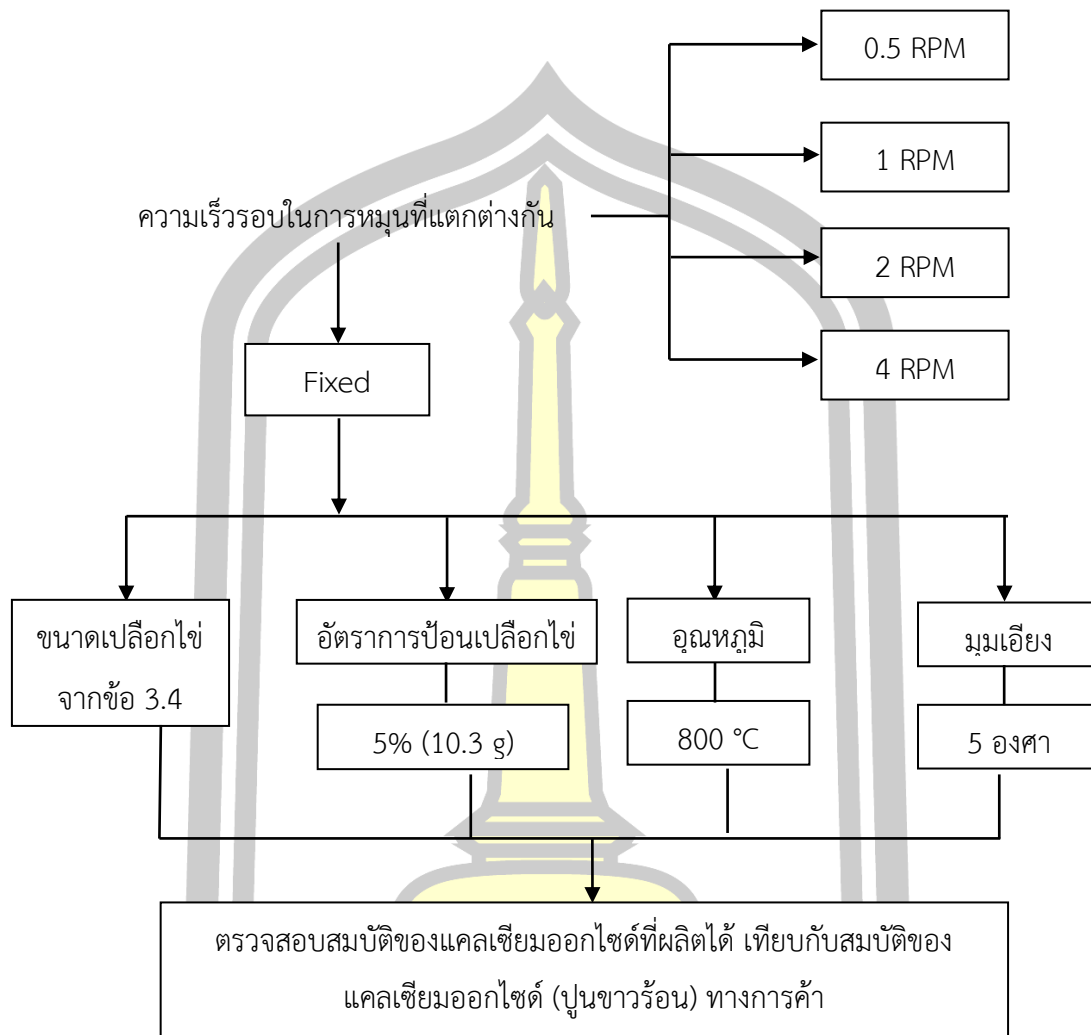
ตัวแปรต้น ความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน

- 0.5 รอบต่อนาที
- 1 รอบต่อนาที
- 2 รอบต่อนาที
- 4 รอบต่อนาที

ตัวแปรควบคุม

- ขนาดเปลือกไข่จากข้อที่ 3.4
- อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5%
- อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
- มุมเอียงเตาเผา 5 องศา





ภาพที่ 38 แผนผังขั้นตอนการศึกษาความเร็วยรอบในการหมุนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

พหุบัณฑิตศึกษา

3.6 ศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้

ศึกษาอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

นำขนาดของเปลือกไข่ที่ได้จากข้อ 3.4 และความเร็วรอบที่ได้จากข้อ 3.5 โดยใช้อัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน คือ 5% (10.3 กรัม) , 10% (20.6 กรัม) และ 15% (30.9 กรัม) แล้วป้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตา โดยให้ความร้อนในเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 800 °C มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที โดยเมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อนตัวอย่างจะเคลื่อนตัวออกด้านทางออก และทำการเก็บตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นแบบสุญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งผลการศึกษานี้จะทำให้ทราบขนาดของเปลือกไข่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์

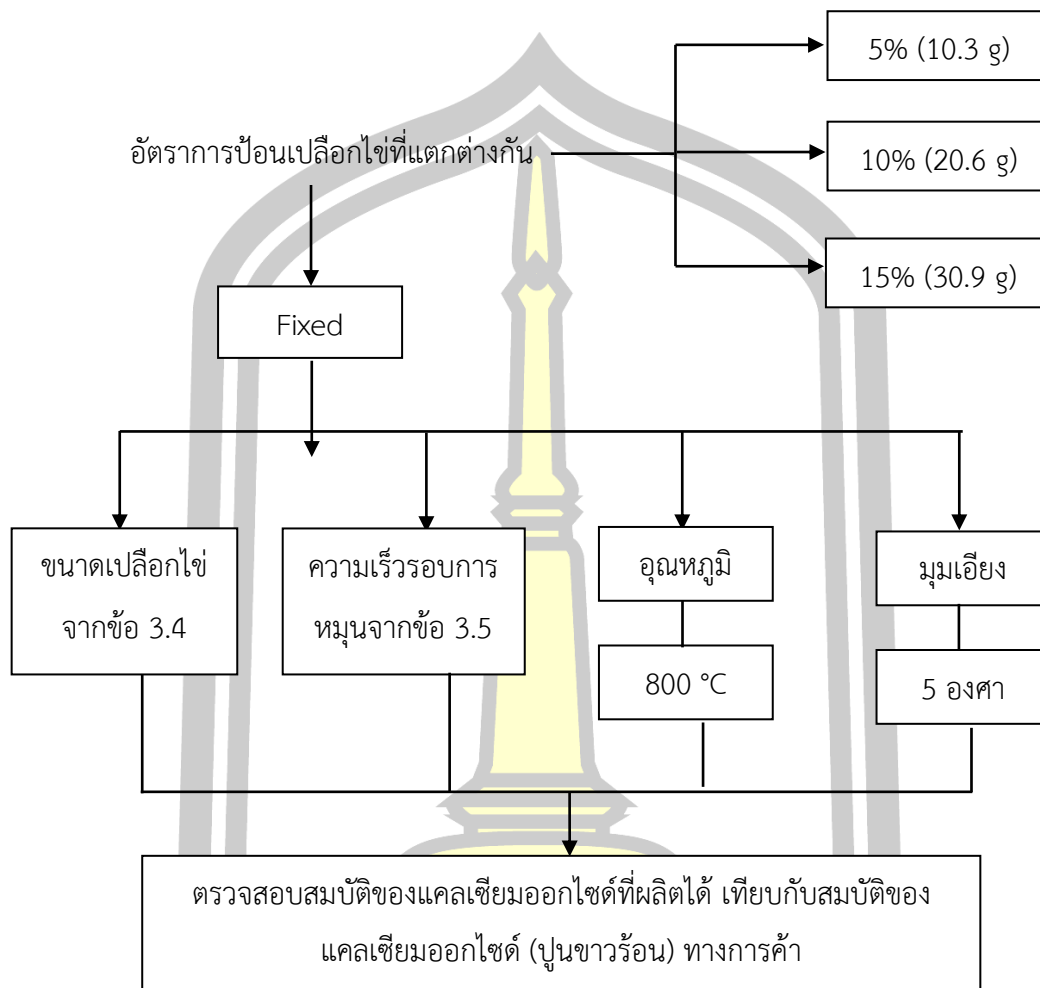
ตัวแปรต้น อัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

- 5% (10.3 กรัม)
- 10% (20.6 กรัม)
- 15% (30.9 กรัม)

ตัวแปรควบคุม

- ขนาดเปลือกไข่จากข้อที่ 3.4
- ความเร็วรอบในการหมุนจากข้อที่ 3.5
- อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส
- มุมเอียงเตาเผา 5 องศา

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 39 แผนผังขั้นตอนการศึกษ้อัตราการใช้แป้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

พูน ปณ ทิโต ชีเว

3.7 ตรวจสอบสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้



3.7.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

3.7.1.1 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Sieve Shaker

3.7.1.2 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope: SEM)

ตารางที่ 15 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

เครื่องมือวิเคราะห์	ยี่ห้อและรุ่น	ภาพเครื่องมือวิเคราะห์
เครื่องร่อนตะแกรง (Sieve Shaker)	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	
เครื่อง Scanning Electron Microscope	ยี่ห้อ LEO รุ่น 1450 VP คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร	

ตารางที่ 16 การเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพ	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	ภาพการเตรียมตัวอย่าง
Sieve Shaker	<ol style="list-style-type: none"> 1. ชั่งตัวอย่างเปลือกไข่ 500 กรัม 2. นำตะแกรงขนาด 3/8 in, No.4, No.8, No.16 และถาดรอง ประกอบตะแกรงให้เรียบร้อย 3. เทตัวอย่างเปลือกไข่ลงบนตะแกรงที่ซ้อนกัน เรียงจากขนาดช่องเปิดใหญ่ลงไปหาเล็ก นำไปร่อนบนเครื่องร่อน ทำการร่อนนานประมาณ 30 นาที 4. นำเปลือกไข่ในแต่ละตะแกรงที่ร่อนได้ไปชั่งน้ำหนัก 	
Scanning Electron Microscope (SEM)	<ol style="list-style-type: none"> 1. นำสตั๊บบิดกับเทปคาร์บอนติดลงไปบนแผ่นอลูมิเนียมของสตั๊บบ 2. ตัวอย่างที่เป็นผงทำให้กระจายบาง ๆ บนสตั๊บบที่มีเทปคาร์บอน โดยใช้ลมช่วยเป่าให้ตัวอย่างกระจายตัวกัน 3. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ใส่กับด้วยทอง 4. ทำการวิเคราะห์ SEM 	



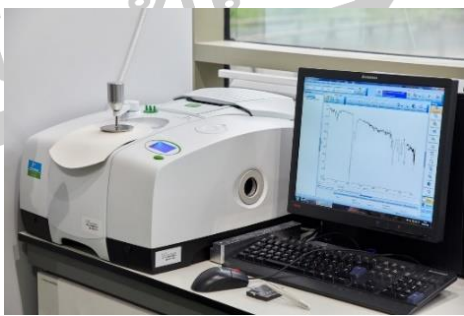
3.7.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมี

3.7.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

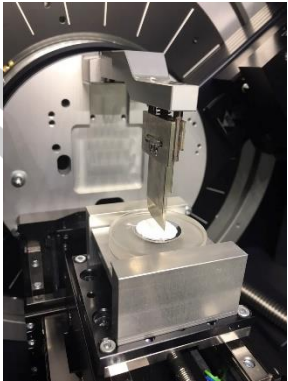


3.7.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

3.7.2.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

ตารางที่ 17 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

เครื่องมือวิเคราะห์	รุ่น และยี่ห้อ	ภาพเครื่องมือวิเคราะห์
เครื่อง X-Ray Diffraction	ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	
เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry	ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น S4 PIONEER คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและ วัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	
เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR Spectrometer Frontier ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัย มหาสารคาม	

ตารางที่ 18 การเตรียมตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

สมบัติทางเคมี	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	ภาพการเตรียมตัวอย่าง
<p>X-Ray Diffraction (XRD)</p>	<ol style="list-style-type: none"> นำตัวอย่างที่เป็นผงมาบดให้ละเอียด ใส่ตัวอย่างในภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่างที่เป็นผง ทำการเกลี่ยให้ทั่วให้ผิวของตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปใส่ที่แทนวางตัวอย่างของเครื่อง XRD และทำการวิเคราะห์ XRD 	
<p>X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)</p>	<ol style="list-style-type: none"> ทำการเตรียมถ้วยใส่ตัวอย่างโดยจะใส่ Film แทรกอยู่ระหว่างถ้วยสองถ้วย เมื่อประกอบถ้วยที่เตรียมตัวอย่างเสร็จ จะได้ถ้วยที่มีก้นเป็น Film ใส่ปิดอยู่ และสารตัวอย่างที่เป็นผงจะนำไปบรรจุใส่ไว้ในถ้วยแล้วปิดฝา นำถ้วยตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่องวิเคราะห์ XRF 	
<p>Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)</p>	<ol style="list-style-type: none"> นำตัวอย่างที่เป็นผงมาบดให้ละเอียด จากนั้นนำตัวอย่างที่บดละเอียดโดยใช้ช้อนตักสารตักใส่ในแทนวางของเครื่อง FTIR ทำการหมุนด้ามที่จับกับสารตัวอย่างให้แน่นและทำการวิเคราะห์ FTIR 	

การคำนวณหา %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่

วิธีการคำนวณ

$$\%Yield = \frac{a}{b} \times 100$$

โดยที่

a = น้ำหนักเปลือกไข่หลังการเผา (กรัม)

b = น้ำหนักเปลือกไข่ก่อนการเผา (กรัม)

จากสูตรการคำนวณหา %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ข้างต้น หากทำการคำนวณแล้วทำให้ทราบถึงปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่นั้นว่าผลิตได้กี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณเปลือกไข่ที่ป้อนเข้าไป โดยในการวิจัยครั้งนี้จะคำนวณ %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ของทุกชุดการทดลอง

สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

การหาค่าเฉลี่ย (Mean)

คือ การหารผลรวมของข้อมูลทั้งหมดด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำของทุกชุดการทดลอง และนำมาหาค่าเฉลี่ย (Mean) จะได้เป็นค่าเฉลี่ยของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาเปลือกไข่ของแต่ละชุดการทดลอง

การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

คือ เครื่องมือในการวัดการกระจายของข้อมูลที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลและการทำวิจัย เพื่อให้ทราบถึงลักษณะข้อมูลค่าเฉลี่ยที่ได้รับว่ามีคุณภาพที่เหมาะสมกับสถานการณ์หรือไม่ กล่าวกันอย่างง่ายคือ หากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายตัวน้อย แสดงว่าข้อมูลในค่าเฉลี่ยนั้นใกล้เคียงกัน ในทางตรงกันข้าม หากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายตัวมาก แสดงว่าข้อมูลในค่าเฉลี่ยแตกต่างกันมาก ซึ่งอาจจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของการวิจัยคลาดเคลื่อนได้

3.8 ขั้นตอนสรุปเกณฑ์การออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม

นำข้อมูลจากการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มาสรุปเป็นเกณฑ์การออกแบบ (Criteria design) เตาเผาระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ ตัวแปรในการเดินระบบ และตัวแปรในการออกแบบระบบ

ตารางที่ 19 สรุปเกณฑ์ในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม

ตัวแปรในการ Operate ระบบ	ตัวแปรในการ Design ระบบ
ขนาดของเปลือกไข่	อัตราการป้อน
อุณหภูมิในการแคลไซน์	เวลา
มุมเอียงของเตาเผา	อัตราส่วนของความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผา
ความเร็วรอบของการหมุน	

เพื่อเสนอต่อบริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) สำหรับใช้ในการออกแบบเตาสำหรับโรงฟักไข่สูงเนินซึ่งมีปริมาณเปลือกไข่ที่ต้องกำจัด 1 ตันต่อวัน ในการออกแบบเตาเผาต้องออกแบบเพื่อประมาณ 20% ของปริมาณเปลือกไข่ที่ต้องการกำจัด ดังนั้นปริมาณเปลือกไข่ที่ต้องกำจัดเท่ากับ 1.2 ตันต่อวัน ซึ่งเกณฑ์ที่ได้จะใช้ประเมินและคำนวณขนาดของเครื่องบดเปลือกไข่ ความยาวและรัศมีของเตาเผาเปลือกไข่ รวมถึงโรงเรือนด้วย



3.9 การประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

ในการประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่นั้นจะประเมินในรูปแบบของผลผลิตแคลเซียมออกไซด์ (กก.) ต่อค่าลงทุนและดำเนินการที่เกิดขึ้น โดยจากการออกแบบร่วมกับซีพีเอฟจะทำให้ทราบต้นทุนในการก่อสร้าง (Capital cost) การประเมินค่าดำเนินการ (operating cost) นอกจากนี้ผู้วิจัยจะได้ดำเนินการประเมินผลตอบแทนจากโครงการและประเมินระยะเวลาการคืนทุน (Payback period) และประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

ขั้นตอนการประเมินต้นทุน

- 1) การประเมินต้นทุนในการก่อสร้างระบบ ทำให้ทราบต้นทุนในการก่อสร้าง (Capital cost) ของโรงเรือน ค่าเครื่องบดเปลือกไข่ และค่าก่อสร้างเตาเผา
- 2) ค่าดำเนินการประเมินค่าดำเนินการ (operating cost) ซึ่งเกิดจากค่าก๊าซ LPG ค่าสาธารณูปโภค ค่าสาธารณูปโภค และค่าจ้างบุคลากร (กรณีมีการจ้างเพิ่มในการล้างทำความสะอาดเปลือกไข่)
- 3) การประเมินผลตอบแทนจากโครงการ เช่น ค่าใช้จ่ายที่ลดลงในการซื้อปูนขาวร้อนในการล้างทำความสะอาดฟาร์มและการฝังกลบเปลือกไข่
- 4) การประเมินระยะเวลาการคืนทุน (Payback period) เป็นเกณฑ์ที่คำนึงระยะเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิจากการดำเนินงาน (ผลกำไรที่ได้รับแต่ละปีรวมกัน โดยเป็นกำไรสุทธิหลังหักภาษี ดอกเบี้ย และค่าเสื่อมราคาของ ทรัพย์สิน) เท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรกของโครงการ นั่นคือทำการพิจารณาจำนวนปีที่ได้รับผลประโยชน์คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดังนั้น หากดำเนินงานแล้วผลประโยชน์คุ้มกับจำนวนเงินที่ลงทุนได้รวดเร็วก็จะดี เพราะความเสี่ยงน้อยและผู้ลงทุนสามารถนำเงินที่ถอนทุนได้ไปลงทุนเพื่อหาประโยชน์ในกิจการอื่น ๆ ต่อไป การคำนวณระยะเวลาการคืนทุน สามารถคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน (ปี)} = \text{จำนวนงวดก่อนคืนทุน} + \frac{\text{เงินส่วนที่ยังไม่คืนทุน}}{\text{กระแสเงินสดในงวดนั้น}}$$

โดยทั่วไปเกณฑ์ตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุนที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจแตกต่างกันไปในแต่ละโครงการขึ้นอยู่กับว่าโครงการนั้น ๆ มีความต้องการเงินต้นคืนกลับมาในระยะเวลาใด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าระยะเวลา 5 ปี คือระยะเวลาที่โครงการต้องการเงินต้นคืนกลับมา การตัดสินใจจะเป็นดังนี้

หาก ระยะเวลาคืนทุน ≤ 5 ปี ก็ตัดสินใจลงทุน

หาก ระยะเวลาคืนทุน > 5 ปี ก็ตัดสินใจไม่ลงทุน

วิธีการคำนวณระยะเวลาคืนทุนนี้ เป็นการพิจารณาอย่างคร่าวๆและมีความสะดวกในการเปรียบเทียบหรือจัดลำดับโครงการโดยเฉพาะโครงการขนาดเล็ก การคืนทุนเร็วจะช่วยให้โครงการมีสภาพคล่องดีขึ้นและมีความเสี่ยงน้อยลง แต่ก็มีจุดอ่อนตรงที่ไม่ได้นำเรื่องค่าของเงินตามเวลามาพิจารณาและไม่ให้ความสำคัญกับกระแสเงินสดที่ได้รับภายหลังระยะเวลาคืนทุน

- 5) การประเมิน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน โดยใช้อัตราคิดลด (discount rate) ตัวใดตัวหนึ่งมาปรับมูลค่าของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาให้มาอยู่ที่จุดเดียวกัน คือ ณ ปัจจุบัน วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ หรือ NPV นับเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการนำเรื่องค่าของเงินตามเวลามาร่วมพิจารณา และเป็นการคำนวณกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นตลอดอายุโครงการ สามารถคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ NPV} = \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \right) - I$$

โดยที่	NPV	คือ มูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิ
	I	คือ เงินจ่ายลงทุนครั้งแรก
	C_t	คือ กระแสเงินสดได้รับสุทธิในแต่ละงวด
	t	คือ ปีที่ 1 ถึงปีที่ n
	n	คือ จำนวนดอกเบี้ย/จำนวนปี
	r	คือ อัตราดอกเบี้ย/อัตราผลตอบแทน

เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้ของโครงการมีค่ามากกว่า 0 ก็ตัดสินใจลงทุนหรือยอมรับโครงการนั้น หากมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าน้อยกว่า 0 หรือ มีค่าเป็นลบก็ไม่ลงทุนในโครงการดังกล่าว เนื่องจากไม่คุ้มค่าที่จะลงทุน (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, 2558)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเศษเปลือกไข่ไก่จากอุตสาหกรรมเพาะพันธุ์ไก่พ่อ - แม่พันธุ์เนื้อ โดยนำเปลือกไข่ที่ผ่านการล้างและบดโดยมีทั้งหมด 6 ขนาด ได้แก่ เปลือกไข่, เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่, ผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร และ ผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร จากนั้นทำการแคลไซน์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที แล้วบ้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการบ้อน 5%, 10% และ 15% โดยคำนวณจากของปริมาณเตา ความเร็วรอบการหมุน 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที โดยให้ความร้อนในเตาเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิ 800 °C มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา เมื่อครบระยะเวลาการให้ความร้อนตัวอย่างจะเคลื่อนตัวออกด้านทางออก และทำการเก็บตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นแบบสุญญากาศเพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ วิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Sieve Shaker และวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) วิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) โดยมีผลการศึกษาแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

พูน ปณ ทิโต ชีเว

4.1 ลักษณะและสมบัติของเปลือกไข่

คุณสมบัติของเปลือกไข่

เปลือกไข่ไก่ที่นำมาศึกษาเป็นเศษเปลือกไข่ไก่จากโรงฟักไข่สูงเนินในเครือบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เลขที่ 377 หมู่ 1 ถนนมิตรภาพ ตำบลมะเกลือเก่า อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา 30170 โดยลักษณะของเศษเปลือกไข่ไก่ที่ได้มามีลักษณะที่เป็นเปลือกไข่ติดกับเยื่อเปลือกไข่ และมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ เช่น มูลไก่ ขนไก่ เป็นต้น

4.1.1 อัตราส่วนเปลือกไข่ต่อเยื่อเปลือกไข่

ทำการสุมเปลือกไข่และเยื่อเปลือกไข่ทั้งหมด 3 ชั่วโมงเพื่อหาอัตราส่วนเปลือกไข่ต่อเยื่อเปลือกไข่ซึ่งมีค่าเฉลี่ย %เปลือกไข่ต่อ %เยื่อ เท่ากับ 87.1% ต่อ 12.9% ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 อัตราส่วนเปลือกไข่ต่อเยื่อเปลือกไข่วิเคราะห์หลังล้างเปลือกไข่

ซ้ำที่	น้ำหนักเปลือกไข่	น้ำหนักเยื่อเปลือกไข่	น้ำหนักเปลือกไข่ + เยื่อเปลือกไข่	%เปลือกไข่	%เยื่อเปลือกไข่
1	82.2	17.2	99.4	82.7	17.3
2	90.8	8.9	99.7	91.1	8.9
3	87.3	12.3	99.6	87.7	12.3
ค่าเฉลี่ย	86.8±4.32	12.8±4.17	99.6±0.15	87.1±4.21	12.9±4.21

4.1.2 ขนาดของเปลือกไข่

นำเปลือกไข่มาทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำให้สะอาด นำไปตากให้แห้งและอบให้แห้งในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกเยื่อเปลือกไข่ออกจากเปลือกไข่โดยใช้ถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ โดยมีถึงกวนผสมคือกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ทางเคมี และล้างเยื่อออกจากเปลือกไข่คือกระบวนการเชิงกล การแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ที่สภาวะกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 M โดยใช้เวลา 60 นาที จะทำให้สามารถแยกเปลือกไข่และเยื่อเปลือกไข่ออกจากกันได้ แล้วนำเปลือกไข่และเยื่อเปลือกไข่ที่แยกได้นำไปล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่เก็บไว้บางส่วนแบบไม่บด เพื่อนำไปทำการแคลไซน์ในขั้นตอนต่อไป ส่วนเปลือกไข่นำไปบดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่น แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 500,

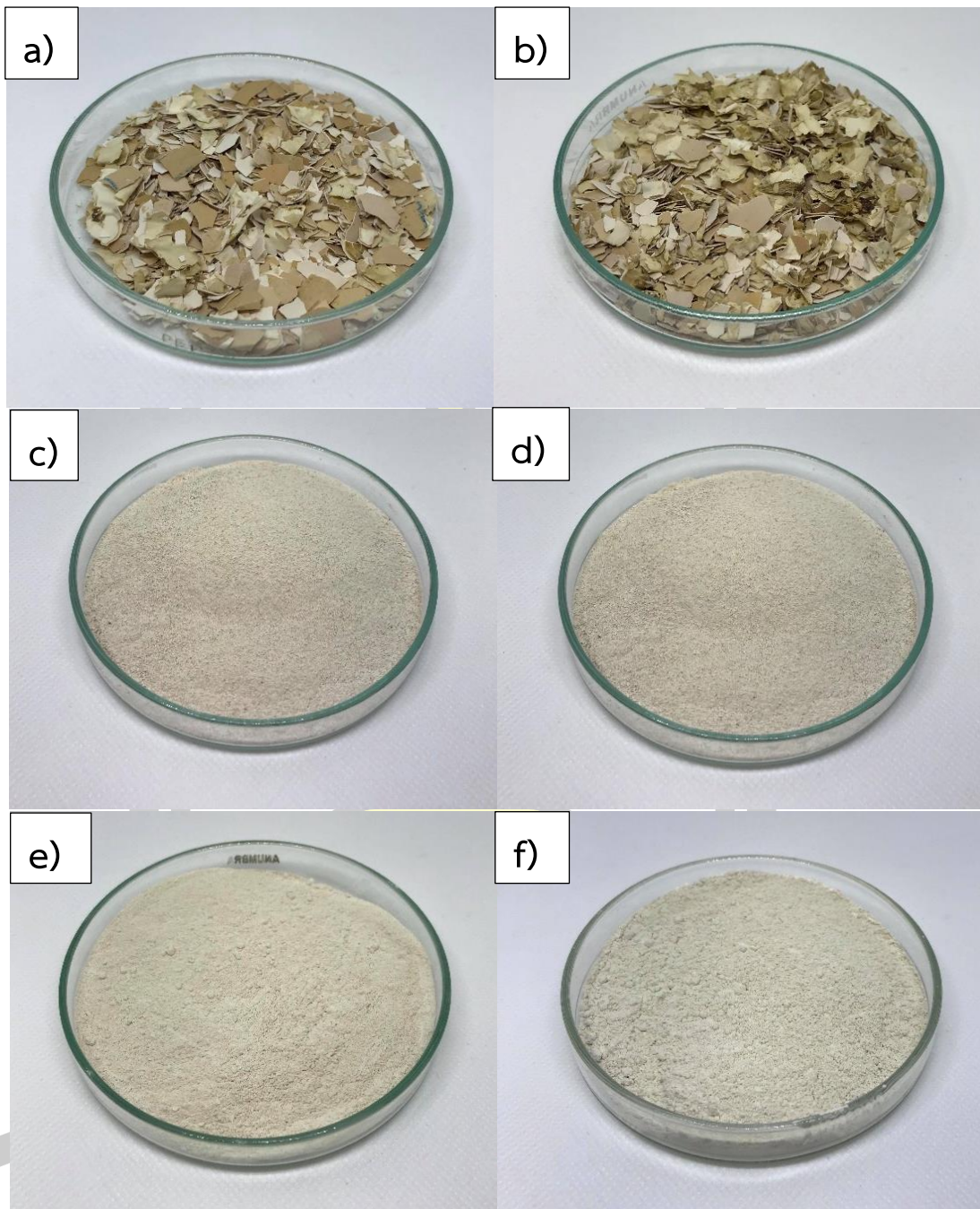
250 และ 53 ไมโครเมตร และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่นำไปบดให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่น แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร ซึ่งผงเปลือกไข่ไก่ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวอมน้ำตาลอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 40 และ 41 และมีสัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง

สัญลักษณ์	ตัวอย่าง
ES	Eggshell
ESM	Eggshell + Eggshell Membrane
ESMP-500	Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron
ESP-500	Eggshell Powder 500 Micron
ESP-250	Eggshell Powder 250 Micron
ESP-53	Eggshell Powder 53 Micron



ภาพที่ 40 a) เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างและทำความสะอาด b) เครื่องปั่น
c) ผงเปลือกไข่ไก่ d) ผงเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการแคลไซน์ (แคลเซียมออกไซด์)



ภาพที่ 41 ขนาดเปลือกไข่ที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 6 ขนาด

a) ES, b) ESM, c) ESMP-500, d) ESP- 500, e) ESP-250 และ f) ESP-53

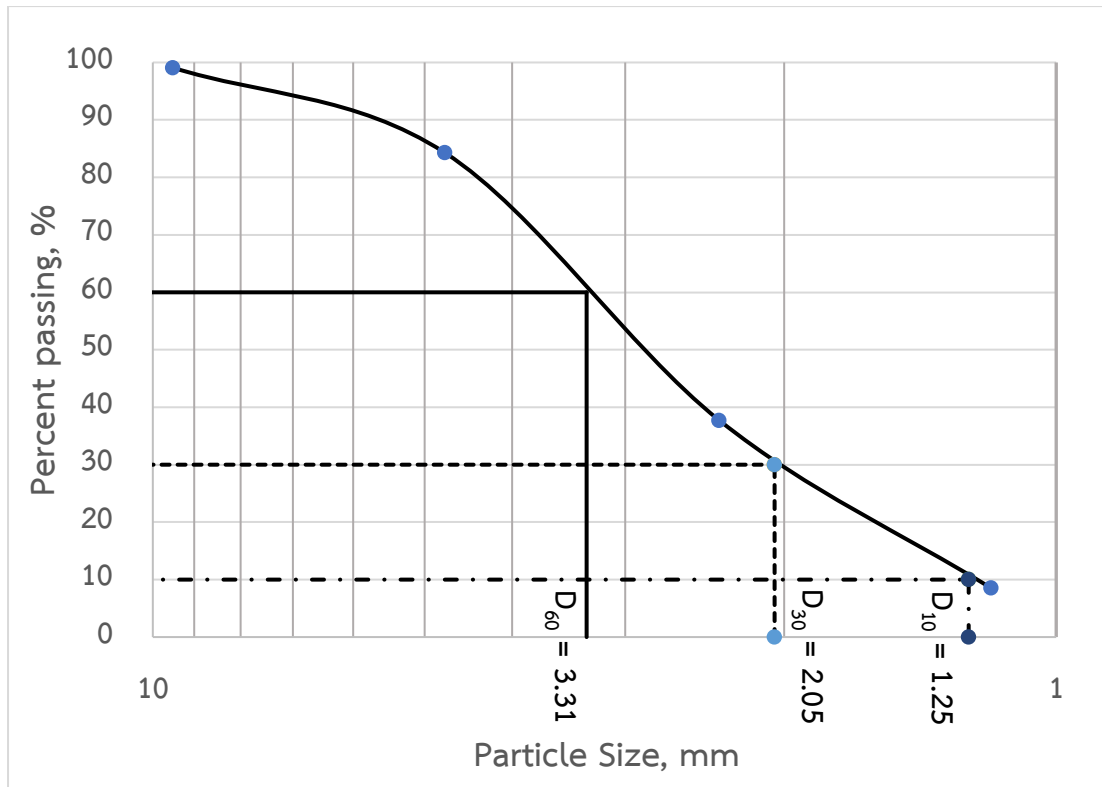
4.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกไข่ที่ได้จากโรงฟักไข่สูงเนินด้วยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Sieve Shaker

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ด้วยเครื่อง Sieve Shaker โดยใช้เปลือกไข่ 500 กรัม ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 in No.4 No.8 และ No.16 ช่องเปิดตะแกรงขนาด 9.5, 4.75, 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร พบว่า น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้างตะแกรงเท่ากับ 4.57, 73.97, 227.93, 151.00 กรัม ตามลำดับ และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์สะสมส่วนที่ผ่านตะแกรง เท่ากับ 99.09%, 84.29%, 37.71 และ 8.51% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 การวิเคราะห์ขนาดเปลือกไข่ด้วยตะแกรงร่อน

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 500 กรัม					
ตะแกรง ขนาด เบอร์	ช่องเปิดของ ตะแกรง มม.	น้ำหนักของเปลือก ไข่ที่ค้าง กรัม	น้ำหนักของ เปลือกไข่ค้าง ตะแกรง %	น้ำหนักของ เปลือกไข่ค้าง สะสม %	ส่วนที่ผ่าน ตะแกรง %
3/8 in	9.5	4.57	0.84	0.91	99.09
No.4	4.75	73.97	14.58	15.71	84.29
No.8	2.36	227.93	46.68	61.29	37.71
No.16	1.18	151.00	29.56	91.49	8.51
PAN	-	42.53	8.34	100.00	0.00

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 42 ขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์สะสมที่ผ่านของเปลือกไข่

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของเปลือกไข่ โดยค่าร้อยละของสะสมของส่วนที่ผ่านตะแกรงถูกนำมาพล็อตเทียบกับขนาดของเปลือกไข่ ดังแสดงในภาพที่ 42 จะได้ว่า

$D_{10} = 1.25$ มิลลิเมตร

$D_{30} = 2.05$ มิลลิเมตร

$D_{60} = 3.31$ มิลลิเมตร

การคำนวณ (สุกิจ นามพิชญ์ และคณะ, 2549)

- 1) ขนาดประสิทธิผล (Effective Size) หรือ D_{10} เท่ากับ 1.25 มิลลิเมตร
- 2) สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) เป็นค่าตัวเลขที่บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของเปลือกไข่ โดยถ้าค่า C_u มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าเปลือกไข่มีขนาดเปลือกไข่สม่ำเสมอ (Uniform) แต่หากค่า C_u มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าเปลือกไข่มีขนาดเปลือกไข่แตกต่างกัน (Well-graded) ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

3) สัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Coefficient of Curvature, C_c) เป็นค่าตัวเลขอีกค่าที่ใช้บ่งบอกลักษณะของเปลือกไข่ โดยถ้าค่า C_c อยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 แสดงว่าเปลือกไข่มีขนาดเปลือกไข่คละกัณฑ์ ค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

เมื่อ D_{10} = ขนาดของเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวน 10 %
 D_{30} = ขนาดของเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวน 30 %
 D_{60} = ขนาดของเปลือกไข่ที่มีขนาดเล็กกว่านี้จำนวน 60 %

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u)

$$\begin{aligned} C_u &= D_{60} / D_{10} \\ &= 3.31 / 1.25 \\ C_u &= 2.65 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $C_u = 2.65$ มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าขนาดเปลือกไข่มีขนาดสม่ำเสมอ

สัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Coefficient of Curvature, C_c)

$$\begin{aligned} C_c &= \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \\ C_c &= 1.02 \end{aligned}$$

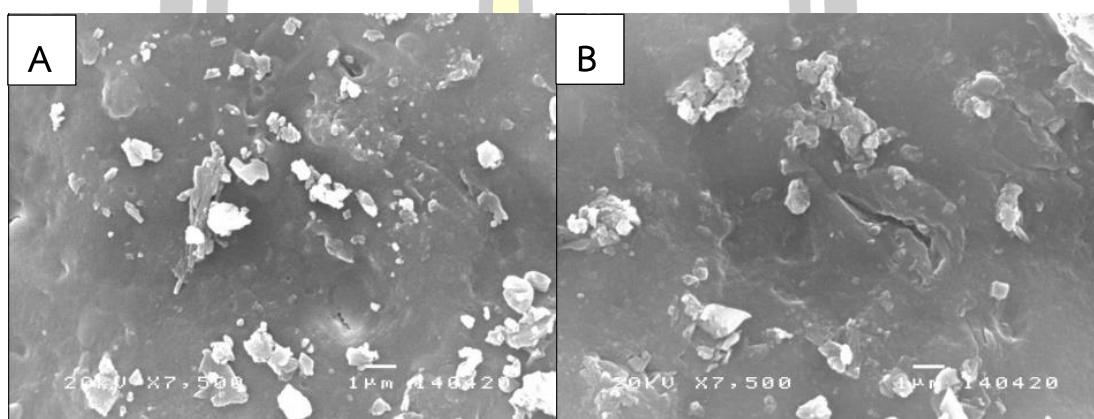
เนื่องจาก $C_c = 1.02$ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1 และ 3 แสดงว่าเปลือกไข่มีขนาดคละกัณฑ์

พหุ ประ โท ชีวะ

4.1.3 การแยกเยื่อเปลือกไข่

4.1.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

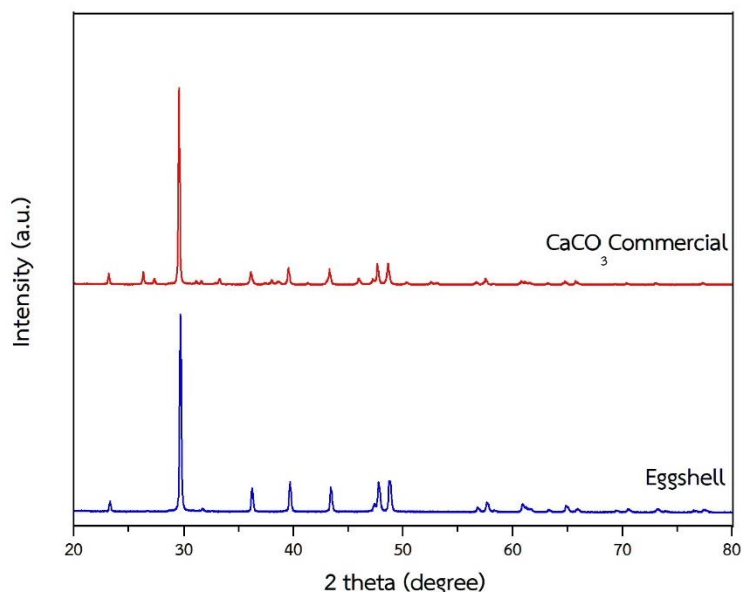
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 7,500 เท่า แสดงให้เห็นสัณฐานวิทยาของเปลือกไข่ที่ผ่านการล้างน้ำและเปลือกไข่ที่ผ่านการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ (ภาพที่ 43A และ 43B) พบว่า เปลือกไข่ทั้งสองมีลักษณะผิวเรียบและมีรูพรุนเพียงเล็กน้อยกระจายอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของทีปกร (2561) (ทีปกร พรไชย, 2561)



ภาพที่ 43 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 7,500 เท่า ของ (A) เปลือกไข่ที่ผ่านการล้างน้ำ , (B) เปลือกไข่ที่ผ่านการแยกเยื่อโดยใช้สารเคมี

4.1.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ด้วยสารเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเปลือกไข่ไก่จากการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ของเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ใช้สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.1 M พบว่า เปลือกไข่ไก่มีโครงสร้างผลึกเป็นแคลไซต์ของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดที่ตำแหน่ง 23.2° , 29.5° , 36.2° , 39.7° , 43.2° , 47.8° และ 48.7° แสดงดังภาพที่ 44 โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ไก่ด้วยสารเคมีสอดคล้องกับงานวิจัยของ Putkham และคณะ (2018) (Putkham et al., 2018) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้สารเคมีในการแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่ความเข้มข้นที่ 0.1 M ซึ่งเป็นความเข้มข้นในปริมาณที่น้อยไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 44 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่กับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้

การศึกษาอิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่ต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์โดยมีขนาดทั้งหมด 6 ขนาด ได้แก่ เปลือกไข่, เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่, ผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร, ผงเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร และผงเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร จากนั้นทำการแคลไซน์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที แล้วบ้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการบ้อน 5% โดยคำนวณจากของปริมาตรเตา ความเร็วรอบการหมุน 1 รอบต่อนาที มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา เมื่อทำการแคลไซน์เสร็จนำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และมีสัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง

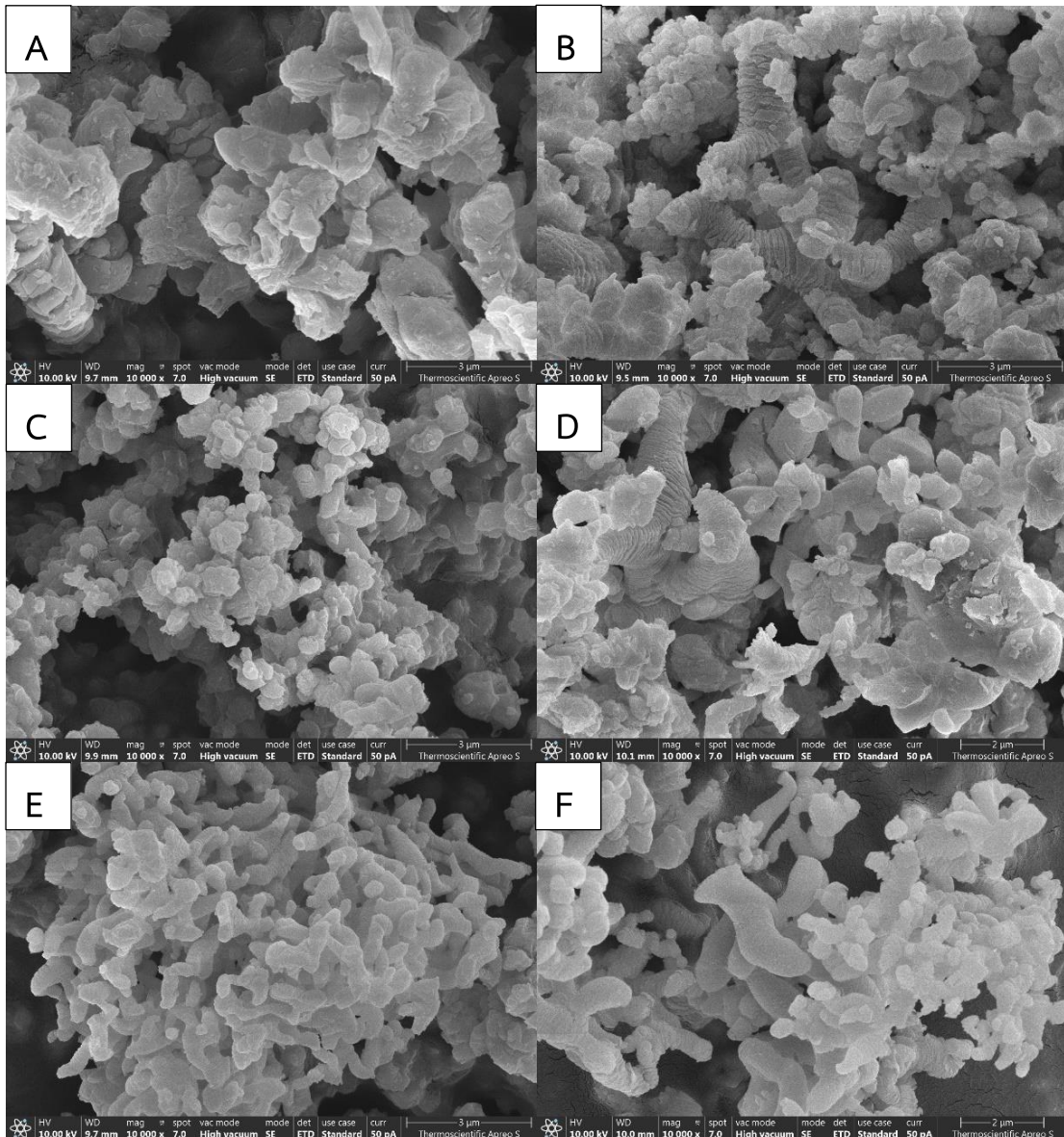
สัญลักษณ์	ตัวอย่าง
CaO[ES]	CaO from Eggshell
CaO[ESM]	CaO from Eggshell + Eggshell Membrane
CaO[ESMP-500]	CaO from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron
CaO[ESP-500]	CaO from Eggshell Powder 500 Micron
CaO[ESP-250]	CaO from Eggshell Powder 250 Micron
CaO[ESP-53]	CaO from Eggshell Powder 53 Micron

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

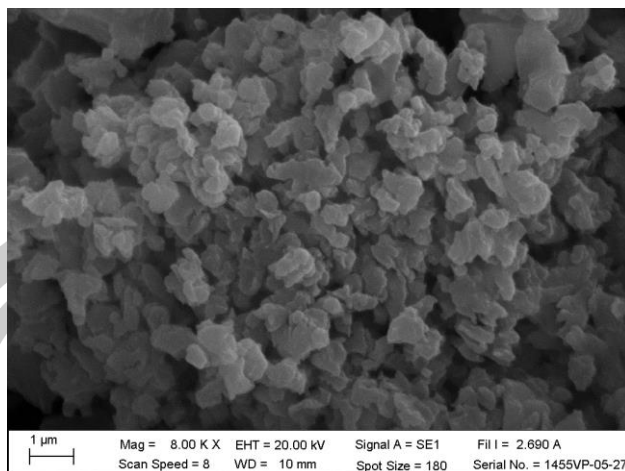
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 10,000 เท่าของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร และแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร พบว่า แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (ภาพที่ 45A) อนุภาคมีการเกาะรวมกันเป็นรูปทรงคล้าย ๆ ทรงกระบอกซ้อนทับกัน ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ (ภาพที่ 45B) และแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร (ภาพที่ 45D) มีรูปทรงกระบอกกระจายตัวกันทั่วไปและมีลักษณะซ้อนทับกัน แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร (ภาพที่ 45C) มีรูปทรงคล้าย ๆ กับทรงกลมซ้อนทับและกระจายตัวกัน ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 250 ไมโครเมตร (ภาพที่ 45E) และแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 53 ไมโครเมตร (ภาพที่ 45F) มีรูปทรงกระบอกที่เล็กกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรกระจายตัวและมีลักษณะซ้อนทับกัน ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 6 ขนาดมีลักษณะสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ทีปกร พรไชย, 2561) และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า (ภาพที่ 46) สามารถอธิบายรูปร่างของอนุภาคได้ว่ามีรูปร่างผิดปกติและอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ยังคงรวมตัวกัน เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรมทำมาจากหินปูนซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าเปลือกไข่ โดยปกติแล้วปูนขาวที่มีความหนาแน่นสูงจะนำไปสู่อุณหภูมิขนาดใหญ่เนื่องจากกลไกการหลอมรวมของแคลเซียมออกไซด์

พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 45 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของ (A) CaO[ES], (B) CaO[ESM], (C) CaO[ESMP-500], (D) CaO[ESP-500], (E) CaO[ESP-250] และ (F) CaO[ESMP-53]

พหุ ประถมศึกษา



ภาพที่ 46 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 8,000 เท่าของแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ทั้ง 6 ขนาดด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ แคลเซียม (Ca) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) และแมกนีเซียม (Mg) และส่วนมากที่พบจะเป็นธาตุแคลเซียม (Ca) และออกซิเจน (O) ดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันด้วยวิธี EDS

ขนาดของเปลือกไข่	ธาตุองค์ประกอบ %wt			
	Ca	O	C	Mg
CaO[ES]	48.12±8.3778	42.16±7.1717	9.38±1.9880	0.36±0.1140
CaO[ESM]	39.08±3.9657	50.60±3.1401	9.86±0.8820	0.46±0.1342
CaO[ESMP-500]	33.54±3.2876	49.22±4.6976	17.2±1.8262	-
CaO[ESP-500]	38.08±2.3113	49.68±2.2039	11.82±1.4202	0.42±0.1095
CaO[ESP-250]	42.64±16.6727	45.58±14.3964	11.8±2.3130	-
CaO[ESP-53]	33.26±6.7582	47.98±2.7179	18.72±5.4463	-

4.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

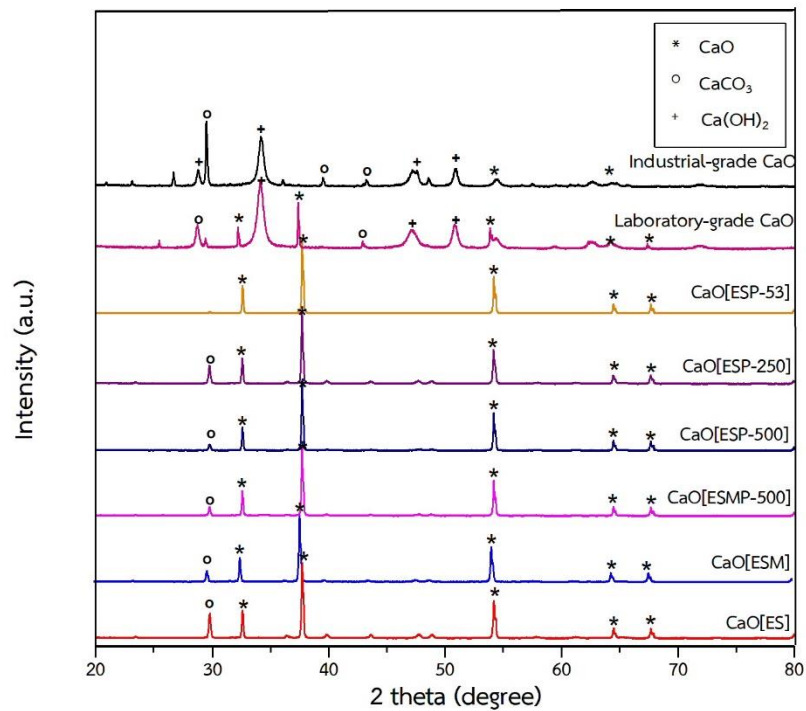
4.2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ของเปลือกไข่ที่มีขนาดแตกต่างกันมีทั้งหมด 6 ขนาด พบว่า แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บด CaO[ES] และเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บด CaO[ESM] แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ พิกัดที่ตำแหน่ง 32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° แต่ยังมีพิกัดแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่พิกัดที่ตำแหน่ง 29.7° ซึ่งมีบางส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่หมด ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESMP-500] และเปลือกไข่ที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESP-500] แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้พิกัดที่ตำแหน่ง 32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° แต่ยังมีพิกัดแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่พิกัดที่ตำแหน่ง 29.7° ซึ่งมีบางส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่หมด ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่บดที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESP-500], 250 ไมโครเมตร CaO[ESP-250] และ 53 ไมโครเมตร CaO[ESP-500] แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้พิกัดที่ตำแหน่ง 32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° แต่ยังมีพิกัดแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่พิกัดที่ตำแหน่ง 29.7° ซึ่งมีบางส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ไม่หมด แต่แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ขนาด 53 ไมโครเมตรไม่มีพิกัดแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าสามารถเปลี่ยนรูปแคลเซียมออกไซด์ได้ดีกว่าขนาดที่ใหญ่เพราะได้รับความร้อนทั่วถึง ดังแสดงในภาพที่ 47 และจากงานวิจัยของ Ayodeji และคณะ (2018) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 850 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพิกัดของแคลเซียมคาร์บอเนตพิกัดที่ตำแหน่ง 29.0° และ 47.5° (Ayodeji, Ojewumi, Rasheed, & Ayodele, 2018) และงานวิจัยของ Mohadi และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพิกัดของแคลเซียมคาร์บอเนตพิกัดที่ตำแหน่ง 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° และมีพิกัดแคลเซียมไฮดรอกไซด์พิกัดที่ตำแหน่ง 28.8° 34.2° 50.9° (Mohadi, Anggraini, Riyanti, & Lesbani, 2016) ดังแสดงในตารางที่ 25 และเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) พบว่า มีพิกัดแคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) เกิดจากโมเลกุลของ

แคลเซียมออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่ชื้น จึงส่งผลทำให้แคลเซียมออกไซด์เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์

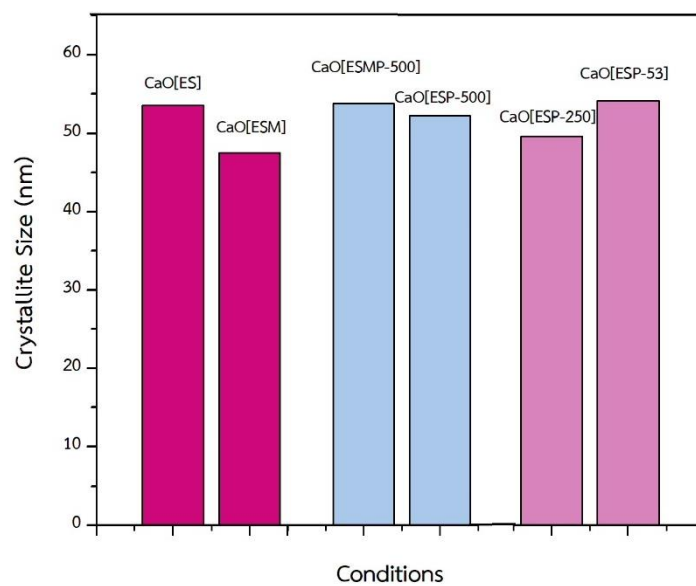
ตารางที่ 25 พีคของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction

Samples	2 θ	References
CaO[ES]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	This study
CaO[ESM]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESMP-500]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESP-500]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESP-250]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESP-53]	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7°	
CaO-Eggshell	32.5° - 54.0° - - 29.0° - - 47.5° -	
CaO-Eggshell	32.3° 37.5° - 64.3° 67.3° 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° 28.8° 34.2° - 50.9° -	(Mohadi et al., 2016)
JCPDS data (CaO)	32.2° 37.3° 58.3° 64.1° 67.3°	(Lesbani, Tamba,
JCPDS data (CaCO ₃)	29.4° 39.4° 43.2° 47.4° 48.5°	Mohadi, &
JCPDS data Ca(OH) ₂	28.6° 34.1° 47.1° 50.8° -	Fahmariyanti, 2013)



ภาพที่ 47 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) สามารถคำนวณ Crystallite Size หรือขนาดของผลึกได้ พบว่า แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 6 ขนาด มีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 48.4 ± 1.2 ถึง 54.45 ± 1.3 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด

4.2.2.2 การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ X-ray fluorescence spectrophotometer (XRF) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่มีขนาดที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ขนาด มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 94.9±0.4 ถึง 97.9±0.1 ที่เหลือเป็นแร่ธาตุอื่น ๆ จากการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ พบว่า แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บด CaO[ES] และเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บด CaO[ESM] มีแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 97.8±0.3 และ 94.9±0.4 จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บดมีความบริสุทธิ์สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บด เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) สามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ได้ทั้งแบบที่แยกเยื่อและไม่แยกเยื่อ และเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการต้องสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่แยกเยื่อออก ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESMP-500] และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESP-500] มีแคลเซียมออกไซด์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 96.7±1.1 และ 97.6±0.3 จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตรมีความบริสุทธิ์สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่นำมาบดก่อนเผาขนาด 500 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) สามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ได้ทั้งแบบที่แยกเยื่อและไม่แยกเยื่อ และเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการต้องสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่แยกเยื่อออกได้ทั้งแบบที่ไม่บดและบด ส่วนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่บดขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESP-500], 250 ไมโครเมตร CaO[ESP-250] และ 53 ไมโครเมตร CaO[ESP-53] มีแคลเซียมออกไซด์เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 97.6±0.3, 97.9±0.1 และ 97.3±0.7 ซึ่งทั้ง 3 ขนาดมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการสามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ได้ทั้ง 3 ขนาด และองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 94.3 และ 98.2 ตามลำดับ ทั้งยังมีองค์ประกอบของ MgO, P₂O₅, SO₃, Na₂O, SrO, K₂O, Fe₂O₃ และ CuO เหมือนกันกับแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่อีกด้วย และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่สามารถเทียบได้กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแคลเซียมออกไซด์มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 90 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ ๓๘๘๗, 2552)

ดังแสดงตารางที่ 26 และเมื่อทำการวิเคราะห์สถิติจากการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็นกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เปลือกไข่ที่ไม่บด กลุ่มที่ 2 เปลือกไข่ที่บดขนาดขนาด 500 ไมโครเมตร และกลุ่มที่ 3 เปลือกไข่ที่บดขนาดต่างกันโดยใช้ t-test ทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่ไม่บด $\text{CaO}[\text{ESM}]$ และ $\text{CaO}[\text{ES}]$ เท่ากับ $94.85\% \pm 1.3435$ ซึ่งความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่ไม่บดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (sig. = 0.006 มีค่าน้อยกว่า 0.05) ส่วนค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่บดขนาด 500 ไมโครเมตร $\text{CaO}[\text{ESMP-500}]$ และ $\text{CaO}[\text{ESP-500}]$ เท่ากับ $95.65\% \pm 0.0707$ ซึ่งความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่บดที่มีขนาด 500 ไมโครเมตรมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (sig. = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05) และค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่บดขนาดต่างกัน $\text{CaO}[\text{ESP-500}]$ $\text{CaO}[\text{ESP-250}]$ และ $\text{CaO}[\text{ESP-53}]$ เท่ากับ $95.6\% \pm 1.1789$ ซึ่งความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่บดขนาดต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (sig. = 0.000 มีค่าน้อยกว่า 0.05) อย่างไรก็ตามอิทธิพลของขนาดอนุภาคของเปลือกไข่ต่อการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ พบว่า ขนาดอนุภาคของเปลือกไข่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์เปลือกไข่แบบแยกหรือไม่แยกเยื่อ เนื่องจากผลการสังเคราะห์แบบแยกเยื่อและไม่แยกเยื่อที่ขนาดอนุภาคเดียวกันให้ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ที่แตกต่างกัน และจากงานวิจัยของ Wulandari และคณะ (2018) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเผาโดโลไมต์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ กัน พบว่า ขนาดอนุภาคของโดโลไมต์ที่เล็กสามารถเปลี่ยนรูปโดโลไมต์เป็นแคลเซียมออกไซด์ได้ดีกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้มากขึ้น เป็นเช่นนี้เนื่องจาก วัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ต่างกันจึงส่งผลให้การแปรผลของขนาดอนุภาคต่อการเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์จึงแตกต่างกัน (Wulandari et al., 2018)

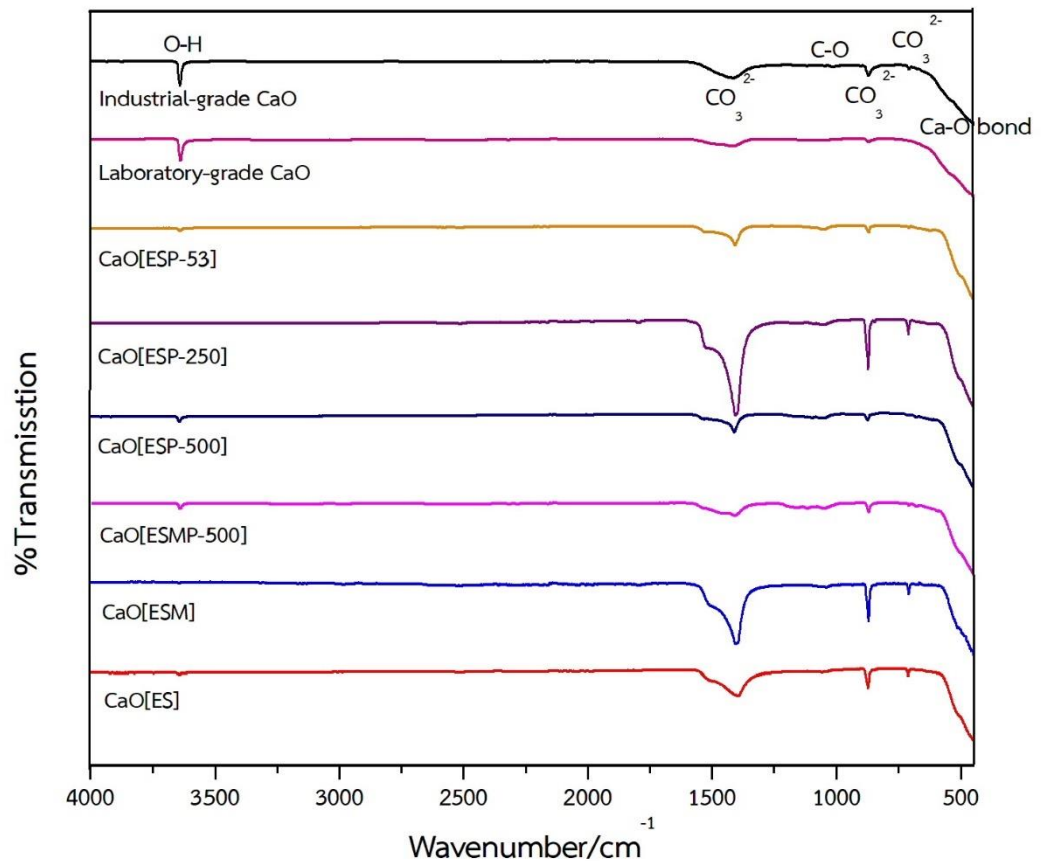
ตารางที่ 26 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

Composition	CaO [ES]	CaO [ESM]	CaO [ESMP -500]	CaO [ESP -500]	CaO [ESP -250]	CaO [ESP -53]	Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	มาตรฐาน มอก. 319 CaO
CaO	97.8±0.3	94.9±0.4	96.7±1.1	97.6±0.3	97.9±0.1	97.3±0.7	94.4±0.0	98.2±0.0	90
MgO	1.27±0.0	1.34±0.1	1.26±0.1	1.12±0.0	1.04±0.0	1.15±0.0	1.49±0.0	0.66±0.0	1.8
P ₂ O ₅	0.39±0.1	0.73±0.1	0.57±0.2	0.38±0.0	0.18±0.2	0.49±0.2	0.02±0.0	0.57±0.0	-
SO ₃	0.17±0.0	2.55±0.2	0.86±0.7	0.38±0.1	0.28±0.0	0.61±0.4	0.27±0.0	0.15±0.0	0.5
SiO ₂	0.11±0.1	0.21±0.0	0.30±0.1	0.25±0.1	0.08±0.0	0.09±0.0	2.89±0.0	0.05±0.0	-
Na ₂ O	0.14±0.0	0.09±0.0	0.15±0.0	0.12±0.0	0.12±0.0	0.12±0.0	-	0.14±0.0	-
SrO	0.04±0.0	0.04±0.0	0.04±0.0	0.04±0.0	0.04±0.0	0.03±0.0	0.17±0.0	0.04±0.0	-
K ₂ O	0.02±0.0	0.02±0.0	0.04±0.0	0.03±0.0	0.03±0.0	0.03±0.0	0.03±0.0	0.08±0.0	-
Fe ₂ O ₃	0.01±0.0	0.02±0.0	0.01±0.0	0.01±0.0	0.02±0.0	0.02±0.0	0.36±0.0	0.03±0.0	0.5
CuO	0.009±0	0.008±0	0.007±0	0.007±0	0.011±0	0.007±0	0.009±0	0.009±0	-
ZnO	0.004±0	0.001±0	-	0.005±0	0.09±0	0.006±0	0.005±0	-	-
ZrO ₂	0.001±0	0.002±0	0.002±0	-	0.002±0	0.001±0	0.005±0	-	-

4.2.2.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของเปลือกไข่ที่มีขนาดแตกต่างกัน 6 ขนาด โดยการวัดการดูดกลืนแสงช่วงเลขคลื่น 4000–450 cm⁻¹ แสดงในภาพที่ 49 ผลการทดสอบพบว่าในช่วงเลขที่คลื่น 1,410 cm⁻¹ 876 cm⁻¹ 719 cm⁻¹ พบหมู่ฟังก์ชัน CO₃²⁻ ของแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างและพบในแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ ในช่วงเลขที่คลื่น 3641 cm⁻¹ พบหมู่ฟังก์ชัน O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESMP-500] แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตร CaO[ESP-500] แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ แต่ไม่พบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บด CaO[ES] แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บด CaO[ESM] แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 250 ไมโครเมตร CaO[ESP-250] และ

53 ไมโครเมตร CaO[ESP-53] ในช่วงเลขที่คลื่น 500 ถึง 580 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน Ca-O พบในแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ สิ่งนี้บ่งชี้ได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีแนวโน้มเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และจากงานวิจัยของ Pornchai และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Pornchai et al., 2016) และงานวิจัยของ Naemchan และคณะ (2008) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 900 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Naemchan, Meejoo, Onreabroy, & Limsuwan, 2008) พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันกับการสังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุนดังแสดงในตารางที่ 27



ภาพที่ 49 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

ตารางที่ 27 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ทั้งหมด 6 ขนาด เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์

CaO [ES]	CaO [ESM]	CaO [ESMP -500]	CaO [ESP-500]	CaO [ESP-250]	CaO [ESP-53]	Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Naemchan et al., 2008)	Assignments
3641	-	3641	3641	-	3641	3641	3641	3642	3432	-O-H
1410	1410	1416	1410	1410	1410	1416	1416	1410	1428	CO ₃ ²⁻
1050	1045	1045	1050	1050	1050	1022	-	1053	-	-C-O
876	876	876	876	876	876	876	876	875	875	CO ₃ ²⁻
719	719	-	-	719	-	713	-	-	712	CO ₃ ²⁻
500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580			Ca-O bonds

4.2.3 ผลของ %Yield ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

%Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ขนาด พบว่า %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ไม่บดและเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ไม่บดจะมี %Yield ที่สูงกว่าผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรและผงเปลือกไข่ขนาด 500, 250, 53 ไมโครเมตร เนื่องจากในกระบวนการเผาเปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ที่บดเป็นผงบางส่วนจะติดอยู่ในเตาเผาขณะที่เคลื่อนตัวไปตามแนวเอียงและความเร็วรอบของเตาเผา ดังนั้น %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ไม่บดสูงกว่า %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ที่บดประมาณ 10% ดังแสดงในตารางที่ 28

ตารางที่ 28 %Yield ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

Samples	% Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่
CaO[ES]	57.9%±0.01
CaO[ESM]	52.8%±0.00
CaO[ESMP 500 Micron]	44.2%±0.00
CaO[ESP 500 Micron]	41.85%±0.02
CaO[ESP 250 Micron]	41.8%±0.00
CaO[ESP 53 Micron]	39.2%±0.00

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วยอบในการหมุนต่อสมบัติแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้

การศึกษานี้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยอบในการหมุนต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์โดยมีความเร็วยอบในการหมุน ได้แก่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที ขนาดเปลือกไข่จากผลการศึกษาที่อิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ในข้อ 4.2 ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ เปลือกไข่, เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ และผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตร จากนั้นทำการแคลไซน์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที แล้วป้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการป้อน 5% โดยคำนวณจากของปริมาณเตา มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา เมื่อทำการแคลไซน์เสร็จนำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาคูณสมบัติทางเคมี โดยมีสัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง ดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง

สัญลักษณ์	ตัวอย่าง	ความเร็วยอบการหมุน (รอบต่อนาที)	อัตราการป้อน (ร้อยละของ ปริมาตรเตา)
CaO[ES-0.5]	Cao from Eggshell	0.5	5% (10.3 กรัม)
CaO[ES-1]		1	
CaO[ES-2]		2	
CaO[ES -4]		4	
CaO[ESM-0.5]	Cao from Eggshell + Eggshell Membrane	0.5	5% (10.3 กรัม)
CaO[ESM-1]		1	
CaO[ESM-2]		2	
CaO[ESM-4]		4	
CaO[ESMP-0.5]	Cao from Eggshell + Eggshell Membrane Powder 500 Micron	0.5	5% (10.3 กรัม)
CaO[ESMP-1]		1	
CaO[ESMP-2]		2	
CaO[ESMP-4]		4	

4.3.1 คุณสมบัติทางเคมี

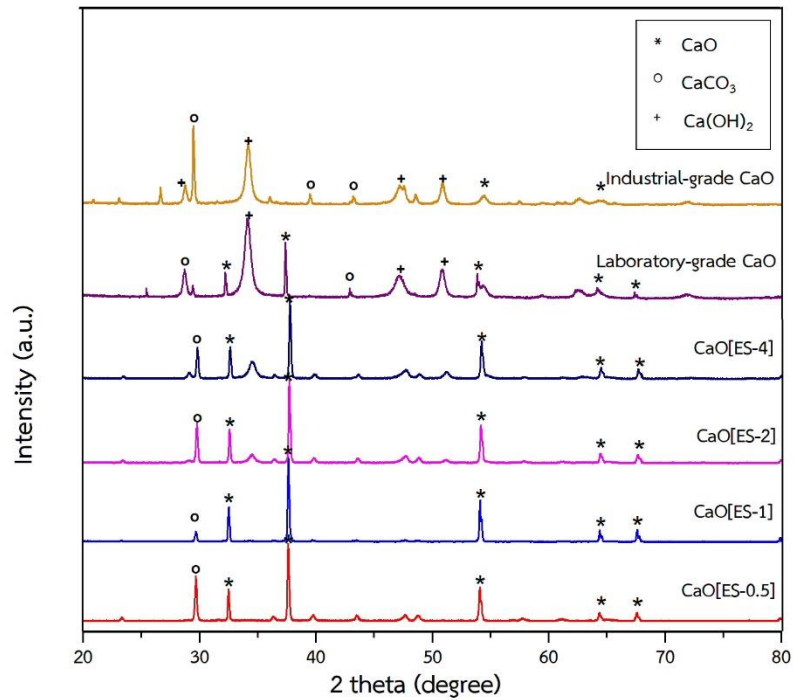
4.3.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่เปลือกไข่ที่มีเยื่อ และผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที พบว่า แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 3 ขนาดและความเร็วรอบ 4 ความเร็วรอบให้พีคไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้พีคเกิดที่ตำแหน่ง 32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° แต่ยังมีพีคแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่พีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.7° ซึ่งมีบางส่วนที่เปลี่ยนรูปไม่หมด เนื่องจากเตาเผาแบบหมุนมีการป้อนวัตถุดิบในปริมาณที่มากกว่าเตาเผาอุณหภูมิสูง ดังแสดงในภาพที่ 50, 51 และ 52 และจากงานวิจัยของ Ayodeji และคณะ (2018) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 850 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตพีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.0° และ 47.5° (Ayodeji et al., 2018) และงานวิจัยของ Mohadi และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตพีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° และมีพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์พีคเกิดที่ตำแหน่ง 28.8° 34.2° 50.9° (Mohadi et al., 2016) และเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) พบว่า มีพีคแคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) เกิดจากโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่ชื้น จึงส่งผลทำให้แคลเซียมออกไซด์เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 30 และภาพที่ 50, 51 และ 52

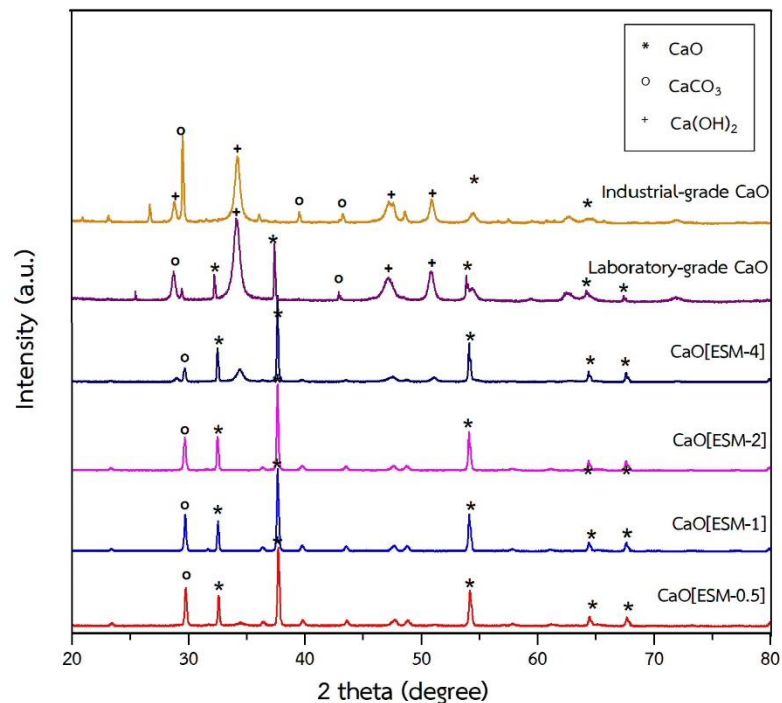
ตารางที่ 30 พีคของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction

Samples	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	2 θ	References
CaO[ES]	0.5	32.5° 37.6° 54.1° 64.4° 67.6° 29.7°	This study
	1	32.5° 37.6° 54.1° 64.4° 67.6° 29.7°	

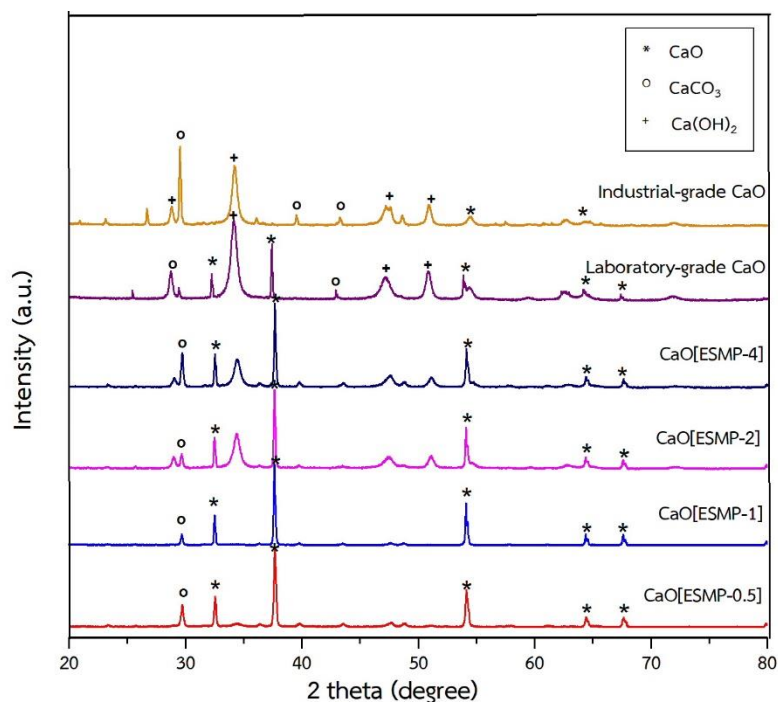
	2	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
	4	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESM]	0.5	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	This study
	1	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
	2	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
	4	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO[ESMP]	0.5	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	This study
	1	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
	2	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
	4	32.5° 37.6° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	
CaO-Eggshell		32.5° - 54.0° - - 29.0° - - 47.5° -	(Ayodeji et al., 2018)
CaO-Eggshell		32.3° 37.5° - 64.3° 67.3° 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° 28.8° 34.2° - 50.9° -	(Mohadi et al., 2016)
JCPDS data (CaO)		32.2° 37.3° 58.3° 64.1° 67.3°	(Lesbani et al., 2013)
JCPDS data (CaCO ₃)		29.4° 39.4° 43.2° 47.4° 48.5°	
JCPDS data Ca(OH) ₂		28.6° 34.1° 47.1° 50.8° -	



ภาพที่ 50 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็รรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)



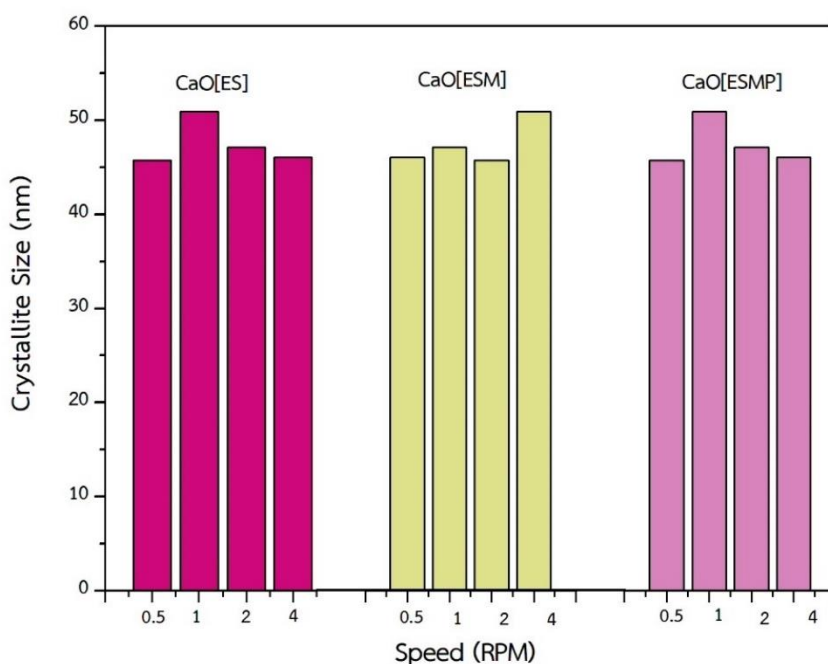
ภาพที่ 51 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็รรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อ นาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)



ภาพที่ 52 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) สามารถคำนวณ Crystallite Size หรือขนาดของผลึกได้ พบว่า แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที มีขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 45.8 - 53.2 นาโนเมตร แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที มีขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 45.8 - 50.9 นาโนเมตร และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที มีขนาดของผลึกเฉลี่ย 40.5 - 54.1 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 53

พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพที่ 53 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

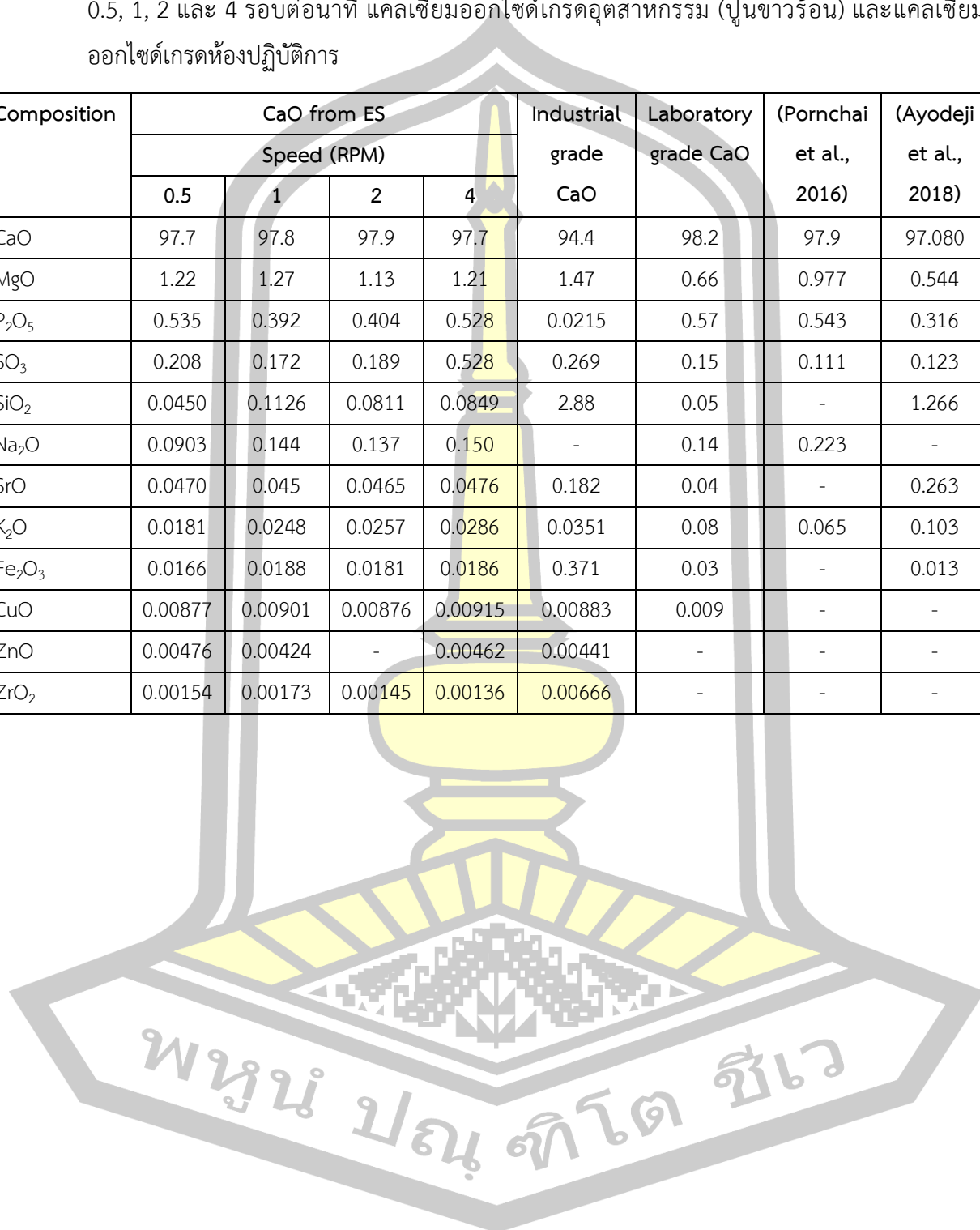
4.3.1.2 การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

ผลการศึกษาร่องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ X-ray fluorescence spectrophotometer (XRF) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จาก เปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที CaO[ES-0.5], 1 รอบต่อนาที CaO[ES-1], 2 รอบต่อนาที CaO[ES-2] และ 4 รอบต่อนาที CaO[ES-4] พบว่า แคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดมีสูงถึงร้อยละ 97.7, 97.8, 97.9 และ 97.7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บดที่ความเร็วต่างกันมีความบริสุทธิ์ไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการสามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่แยกเยื่อออกแบบไม่บดได้ทั้ง 4 ความเร็วรอบ ดังแสดงในตารางที่ 31 ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บดที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที CaO[ESM-0.5], 1 รอบต่อนาที CaO[ESM-1], 2 รอบต่อนาที CaO[ESM-2] และ 4 รอบต่อนาที CaO[ESM-4] พบว่า แคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดมีสูงถึงร้อยละ 96.0, 94.9, 93.5 และ 96.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บดที่ความเร็วต่างกันมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 4 รอบต่อนาทีสูงกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 1, 2 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรด

อุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) สามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อแบบไม่บดได้ ทั้ง 4 ความเร็วรอบ ดังแสดงตารางที่ 32 ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5 รอบต่อนาที CaO[ESMP-0.5], 1 รอบต่อนาที CaO[ESMP-1], 2 รอบต่อนาที CaO[ESMP-2] และ 4 รอบต่อนาที CaO[ESMP-4] พบว่าแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดมีสูงถึงร้อยละ 96.0, 96.7, 95.3 และ 95.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่บดที่ความเร็วต่างกันมีความบริสุทธิ์ไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) สามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่บดได้ทั้ง 4 ความเร็วรอบ ดังแสดงตารางที่ 33 และองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 94.3 และ 98.2 ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Pornchai และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Pornchai et al., 2016) และ Ayodeji และคณะ (2018) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 850 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Ayodeji et al., 2018) พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 97.9 และ 97.08 ตามลำดับ ซึ่งมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับผลการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุน ทั้งยังมีองค์ประกอบของ MgO, P₂O₅, SO₃, Na₂O, SrO, K₂O, Fe₂O₃ และ CuO เหมือนกันอีกด้วย และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่สามารถเทียบได้กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแคลเซียมออกไซด์มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 90 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ ๓๘๘๗, 2552) และเมื่อทำการวิเคราะห์สถิติจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ พบว่าค่า F = 0.316 และค่า sig. = 0.814 นั่นคือ ความเร็วรอบในการหมุนกับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (ค่า sig. = 0.814 มีค่ามากกว่า 0.05) อย่างไรก็ตามอิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนต่อแคลเซียมออกไซด์ที่ได้ พบว่าการที่เพิ่มความเร็วรอบในการหมุนและการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบในเตามากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 20 ของปริมาตรเตาเผา) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการกวนวัสดุที่มากขึ้น และเกิดถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valle (2012) ที่กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบในเตาเผาแบบหมุน (Valle, 2012)

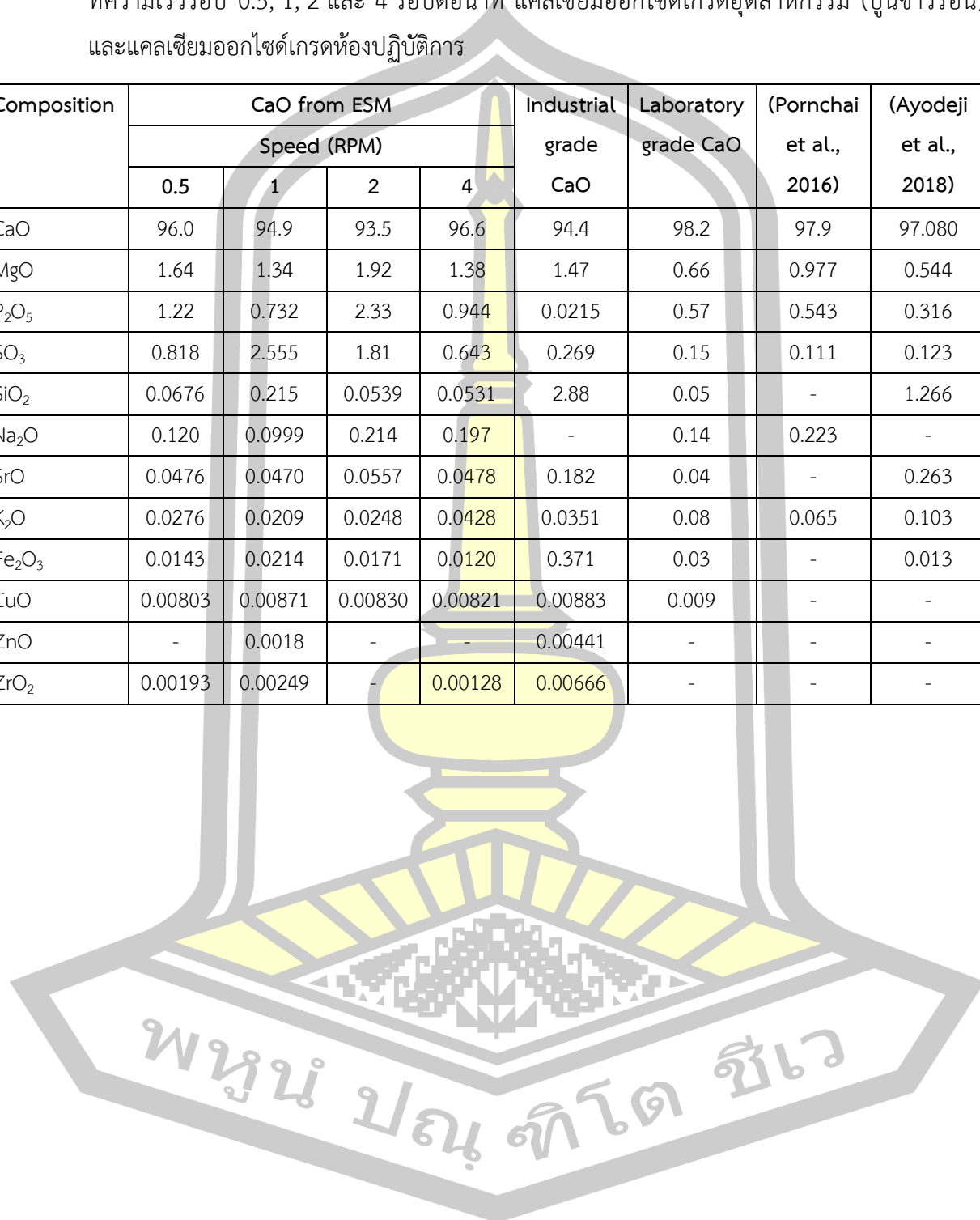
ตารางที่ 31 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

Composition	CaO from ES				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Ayodeji et al., 2018)	มาตรฐาน มอก. 319 CaO
	Speed (RPM)								
	0.5	1	2	4					
CaO	97.7	97.8	97.9	97.7	94.4	98.2	97.9	97.080	90
MgO	1.22	1.27	1.13	1.21	1.47	0.66	0.977	0.544	1.8
P ₂ O ₅	0.535	0.392	0.404	0.528	0.0215	0.57	0.543	0.316	-
SO ₃	0.208	0.172	0.189	0.528	0.269	0.15	0.111	0.123	0.5
SiO ₂	0.0450	0.1126	0.0811	0.0849	2.88	0.05	-	1.266	-
Na ₂ O	0.0903	0.144	0.137	0.150	-	0.14	0.223	-	-
SrO	0.0470	0.045	0.0465	0.0476	0.182	0.04	-	0.263	-
K ₂ O	0.0181	0.0248	0.0257	0.0286	0.0351	0.08	0.065	0.103	-
Fe ₂ O ₃	0.0166	0.0188	0.0181	0.0186	0.371	0.03	-	0.013	0.5
CuO	0.00877	0.00901	0.00876	0.00915	0.00883	0.009	-	-	-
ZnO	0.00476	0.00424	-	0.00462	0.00441	-	-	-	-
ZrO ₂	0.00154	0.00173	0.00145	0.00136	0.00666	-	-	-	-



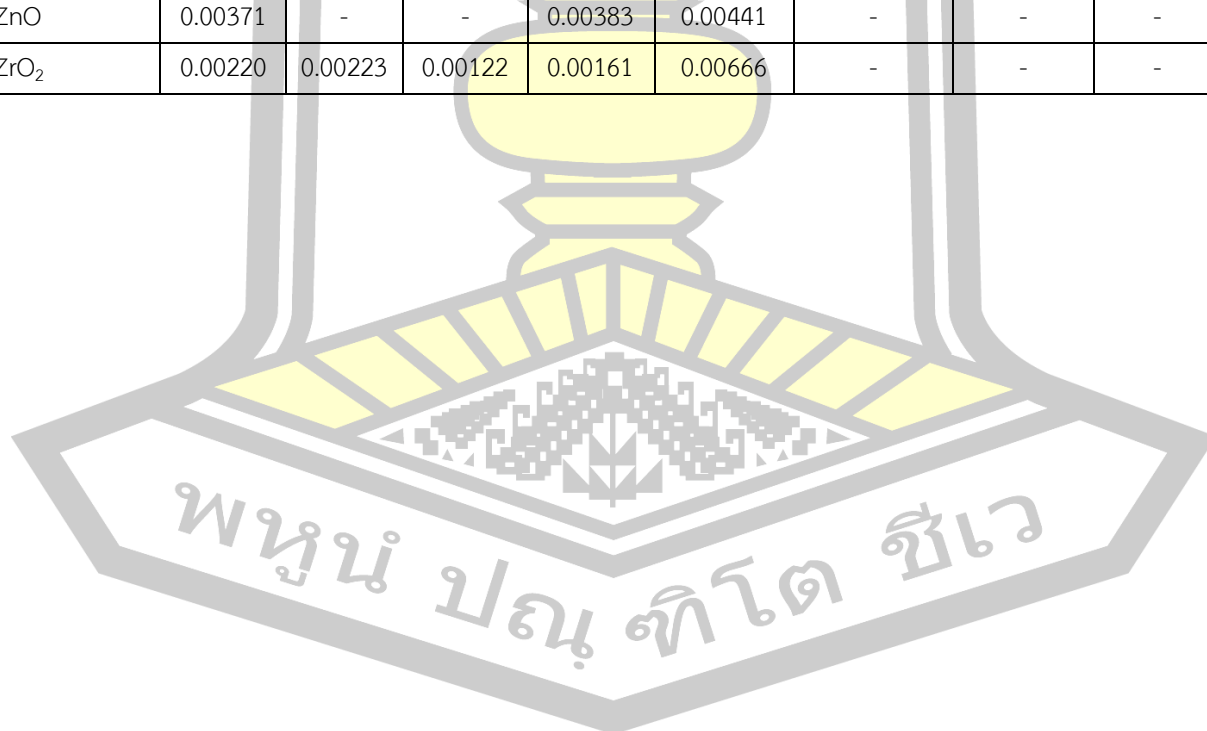
ตารางที่ 32 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

Composition	CaO from ESM				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Ayodeji et al., 2018)	มาตรฐาน มอก. 319 CaO
	Speed (RPM)								
	0.5	1	2	4					
CaO	96.0	94.9	93.5	96.6	94.4	98.2	97.9	97.080	90
MgO	1.64	1.34	1.92	1.38	1.47	0.66	0.977	0.544	1.8
P ₂ O ₅	1.22	0.732	2.33	0.944	0.0215	0.57	0.543	0.316	-
SO ₃	0.818	2.555	1.81	0.643	0.269	0.15	0.111	0.123	0.5
SiO ₂	0.0676	0.215	0.0539	0.0531	2.88	0.05	-	1.266	-
Na ₂ O	0.120	0.0999	0.214	0.197	-	0.14	0.223	-	-
SrO	0.0476	0.0470	0.0557	0.0478	0.182	0.04	-	0.263	-
K ₂ O	0.0276	0.0209	0.0248	0.0428	0.0351	0.08	0.065	0.103	-
Fe ₂ O ₃	0.0143	0.0214	0.0171	0.0120	0.371	0.03	-	0.013	0.5
CuO	0.00803	0.00871	0.00830	0.00821	0.00883	0.009	-	-	-
ZnO	-	0.0018	-	-	0.00441	-	-	-	-
ZrO ₂	0.00193	0.00249	-	0.00128	0.00666	-	-	-	-



ตารางที่ 33 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

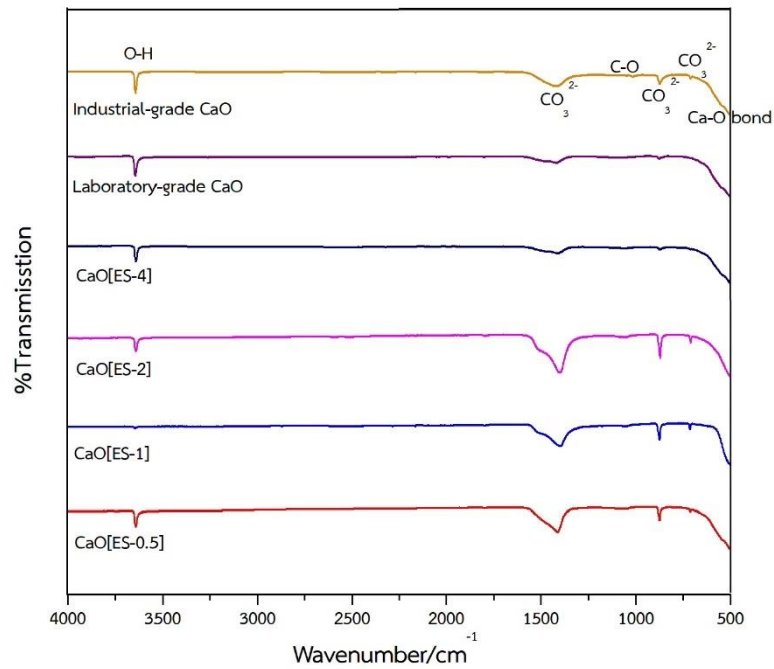
Composition	CaO from ESMP				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Ayodeji et al., 2018)	มาตรฐาน มอก. 319 CaO
	Speed (RPM)								
	0.5	1	2	4					
CaO	96.0	96.7	95.3	95.5	94.4	98.2	97.9	97.080	90
MgO	1.29	1.26	1.32	1.38	1.47	0.66	0.977	0.544	1.8
P ₂ O ₅	0.757	0.579	0.794	0.894	0.0215	0.57	0.543	0.316	-
SO ₃	1.46	0.862	1.89	1.51	0.269	0.15	0.111	0.123	0.5
SiO ₂	0.137	0.309	0.174	0.140	2.88	0.05	-	1.266	-
Na ₂ O	0.176	0.151	0.200	0.250	-	0.14	0.223	-	-
SrO	0.0431	0.0439	0.0468	0.0481	0.182	0.04	-	0.263	-
K ₂ O	0.0721	0.04045	0.0706	0.0752	0.0351	0.08	0.065	0.103	-
Fe ₂ O ₃	0.0157	0.0186	0.0200	0.0237	0.371	0.03	-	0.013	0.5
CuO	0.00695	0.00798	0.00793	0.00771	0.00883	0.009	-	-	-
ZnO	0.00371	-	-	0.00383	0.00441	-	-	-	-
ZrO ₂	0.00220	0.00223	0.00122	0.00161	0.00666	-	-	-	-



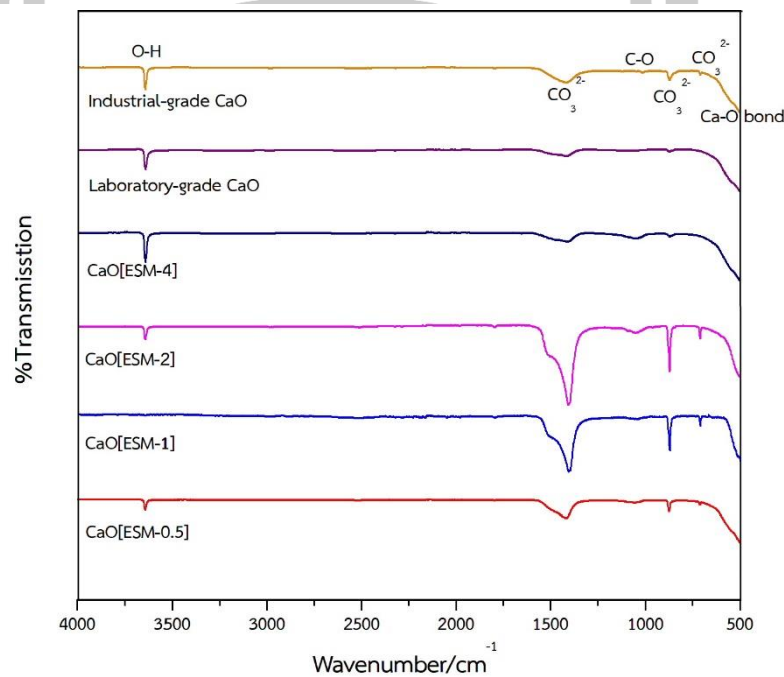
4.3.1.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบแตกต่างกัน 4 ความเร็วรอบ ได้แก่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที และขนาดเปลือกไข่ 3 ขนาด ได้แก่ เปลือกไข่, เปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ และผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตร โดยการวัดการดูดกลืนแสงช่วงเลขคลื่น 4000–450 cm^{-1} ผลการทดสอบพบว่า ในช่วงเลขที่คลื่น 1,410 cm^{-1} 876 cm^{-1} 719 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} ของแคลเซียมคาร์บอเนต ในตัวอย่างและพบในแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ ในช่วงเลขที่คลื่น 3641 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 2, 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 2, 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2, 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ แต่ไม่พบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที CaO[ES-1] และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที CaO[ESM-1] ในช่วงเลขที่คลื่น 500 ถึง 580 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน Ca-O พบในแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 3 ขนาด 4 ความเร็วรอบ แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ สิ่งนี้บ่งชี้ได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีแนวโน้มเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และจากงานวิจัยของ Pornchai และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Pornchai et al., 2016) และงานวิจัยของ Naemchan และคณะ (2008) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 900 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Naemchan et al., 2008) พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันกับการสังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุน ดังแสดงในภาพที่ 54, 55, 56 และตารางที่ 34, 35, 36 ตามลำดับ

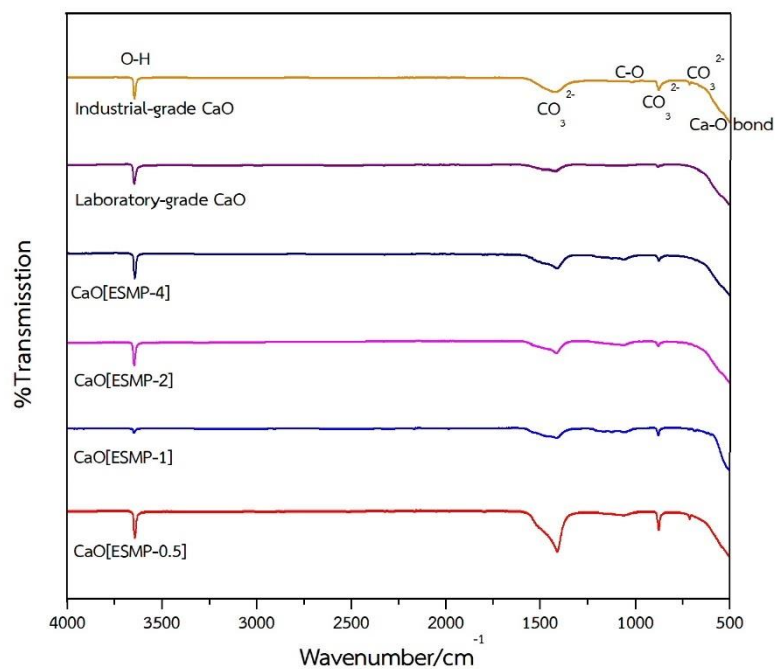
พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพที่ 54 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)



ภาพที่ 55 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)



ภาพที่ 56 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มีเนื้อขนาด 500 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

ตารางที่ 34 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์

CaO from ES				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Naemchan et al., 2008)	Assignments
Speed (RPM)								
0.5	1	2	4					
3641	3641	3641	3641	3641	3641	3642	3641	-O-H
1411	1410	1411	1411	1416	1416	1410	1428	CO ₃ ²⁻
1050	1050	1050	1050	1022	-	1053	-	-C-O
874	876	874	874	876	876	875	875	CO ₃ ²⁻
713	719	713	-	713	-	-	712	CO ₃ ²⁻
500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580			Ca-O bonds

ตารางที่ 35 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์

CaO from ESM				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Naemchan et al., 2008)	Assignments
Speed (RPM)								
0.5	1	2	4					
3641	-	3642	3641	3641	3641	3642	3641	-O-H
1415	1410	1411	1414	1416	1416	1410	1428	CO ₃ ²⁻
1050	1050	1050	1050	1022	-	1053	-	-C-O
875	876	874	874	876	876	875	875	CO ₃ ²⁻
712	719	712	-	713	-	-	712	CO ₃ ²⁻
500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580			Ca-O bonds

ตารางที่ 36 แสดงช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) ของแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาทีเทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์

CaO from ESMP				Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Naemchan et al., 2008)	Assignments
Speed (RPM)								
0.5	1	2	4					
3641	3641	3641	3641	3641	3641	3642	3641	-O-H
1411	1416	1411	1411	1416	1416	1410	1428	CO ₃ ²⁻
1052	1045	1052	1053	1022	-	1053	-	-C-O
874	876	874	874	876	876	875	875	CO ₃ ²⁻
712	-	-	-	713	-	-	712	CO ₃ ²⁻
500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580			Ca-O bonds

4.3.2 ผลของ %Yield ของความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกัน

%Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ของความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 ความเร็วรอบ พบว่า %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ที่ไม่บดที่ความเร็วรอบที่ 0.5 รอบต่อนาทีของทั้งเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่มี %Yield ที่สูงกว่าความเร็วรอบอื่น และมี %Yield ที่สูงกว่าเปลือกไข่ที่บดของทุกความเร็วรอบอีกด้วย เนื่องจากในกระบวนการเผาเปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ที่บดเป็นผงบางส่วนจะติดอยู่ในเตาเผา ดังนั้น %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ไม่บดสูงกว่า %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ที่บดประมาณ 10% - 20% ดังแสดงในตารางที่ 37

ตารางที่ 37 %Yield ของความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกัน

Samples	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	% Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ จากเปลือกไข่
CaO[ES]	0.5	64.70%±0.01
	1	57.90%±0.01
	2	61.50%±0.01
	4	54.65%±0.03
CaO[ESM]	0.5	65.40%±0.01
	1	52.80%±0.00
	2	60.45%±0.00
	4	51.55%±0.00
CaO[ESMP-500]	0.5	41.85%±0.01
	1	44.20%±0.00
	2	38.30%±0.00
	4	38.50%±0.00

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนต่อสมบัติแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้

การศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนต่อสมบัติของแคลเซียมออกไซด์โดยมีอัตราการป้อนเปลือกไข่ ได้แก่ 5%, 10% และ 15% (คิดจากปริมาตรเตาเผา) ขนาดเปลือกไข่จากผลการศึกษาที่อิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ในข้อ 4.2 ทำการศึกษาทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ เปลือกไข่ และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ ความเร็วรอบในการหมุนจากผลการศึกษาที่อิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนในข้อ 4.3 ทำการศึกษาทั้งหมด 1 ความเร็วรอบ คือ ความเร็วรอบ 1 รอบต่อนาที จากนั้นทำการแคลไซน์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 50 °C ต่อนาที แล้วป้อนเปลือกไข่เข้าด้านทางเข้าของเตาที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% โดยคำนวณจากปริมาตรเตา มุมเอียงของเตาเผาที่ 5 องศา เมื่อทำการแคลไซน์เสร็จนำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยมีสัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง ดังตารางที่ 38

ตารางที่ 38 สัญลักษณ์แทนชื่อตัวอย่าง

สัญลักษณ์	ตัวอย่าง	อัตราการป้อน	ความเร็วรอบในการหมุน
CaO[ES- 5%]	Cao from Eggshell	5% (10.3 กรัม)	1 รอบต่อนาที
CaO[ES-10%]		10% (20.6 กรัม)	
CaO[ES-15%]		15% (30.9 กรัม)	
CaO[ESM-5%]	Cao from Eggshell + Eggshell Membrane	5% (10.3 กรัม)	1 รอบต่อนาที
CaO[ESM-10%]		10% (20.6 กรัม)	
CaO[ESM-15%]		15% (30.9 กรัม)	

พหุ ประถมศึกษา

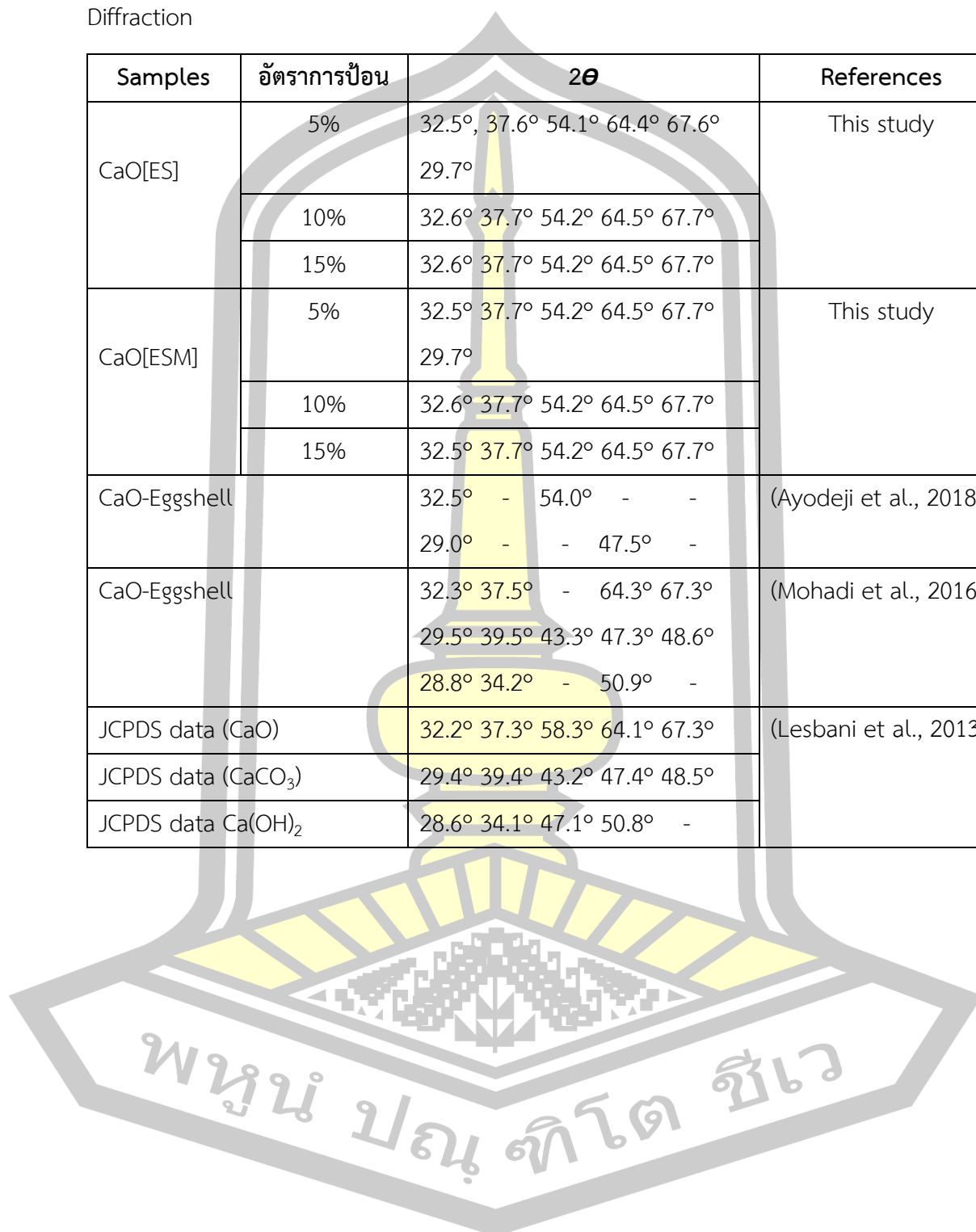
4.4.1 คุณสมบัติทางเคมี

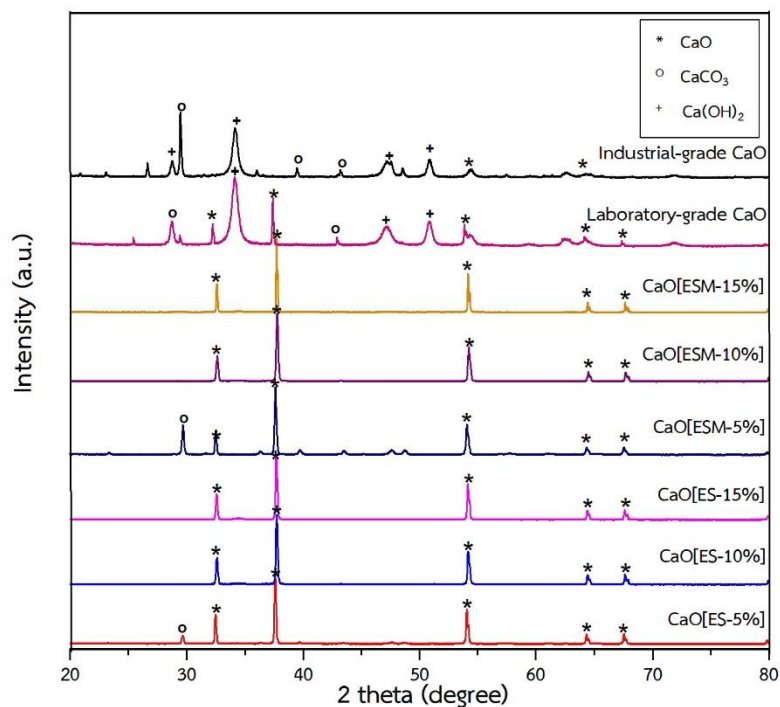
4.4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ และเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% พบว่า แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ทั้ง 2 ขนาดและ 3 อัตราการป้อน ให้พีคไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ที่ผ่านกระบวนการ Calcination ที่อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาแบบหมุนทำให้เปลือกไข่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้พีคเกิดที่ตำแหน่ง 32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° แต่ยังมีพีคแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่พีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.7° ซึ่งมีบางส่วนที่เปลี่ยนรูปไม่หมดของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ CaO[ES-5%] และเปลือกไข่ที่มีเยื่อ CaO[ESM-5%] ที่อัตราการป้อนที่ 5% (10.3 กรัม) เนื่องจากเตาเผาแบบหมุนมีการป้อนวัตถุดิบในปริมาณที่มากกว่าเตาเผาอุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ CaO[ES-10%] เปลือกไข่ที่มีเยื่อ CaO[ESM-10%] ที่อัตราการป้อนที่ 10% (20.6 กรัม) และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ CaO[ES-15%] เปลือกไข่ที่มีเยื่อ CaO[ESM-15%] ที่อัตราการป้อนที่ 15% (30.9 กรัม) ไม่มีพีคแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ เนื่องจากอัตราการป้อนที่เหมาะสมในเตาเผาแบบหมุนอยู่ประมาณ 10%-20% ของปริมาตรเตาเผา (Wübben, 2012) (Niessen & Walter R., 2010) และจากงานวิจัยของ Ayodeji และคณะ (2018) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 850 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตพีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.0° และ 47.5° (Ayodeji et al., 2018) และงานวิจัยของ Mohadi และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่า มีพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตพีคเกิดที่ตำแหน่ง 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° และมีพีคแคลเซียมไฮดรอกไซด์พีคเกิดที่ตำแหน่ง 28.8° 34.2° 50.9° (Mohadi et al., 2016) และเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) พบว่า มีพีคแคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) เกิดจากโมเลกุลของแคลเซียมออกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่ชื้น จึงส่งผลทำให้แคลเซียมออกไซด์เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 39 และภาพที่ 57

ตารางที่ 39 พีคของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction

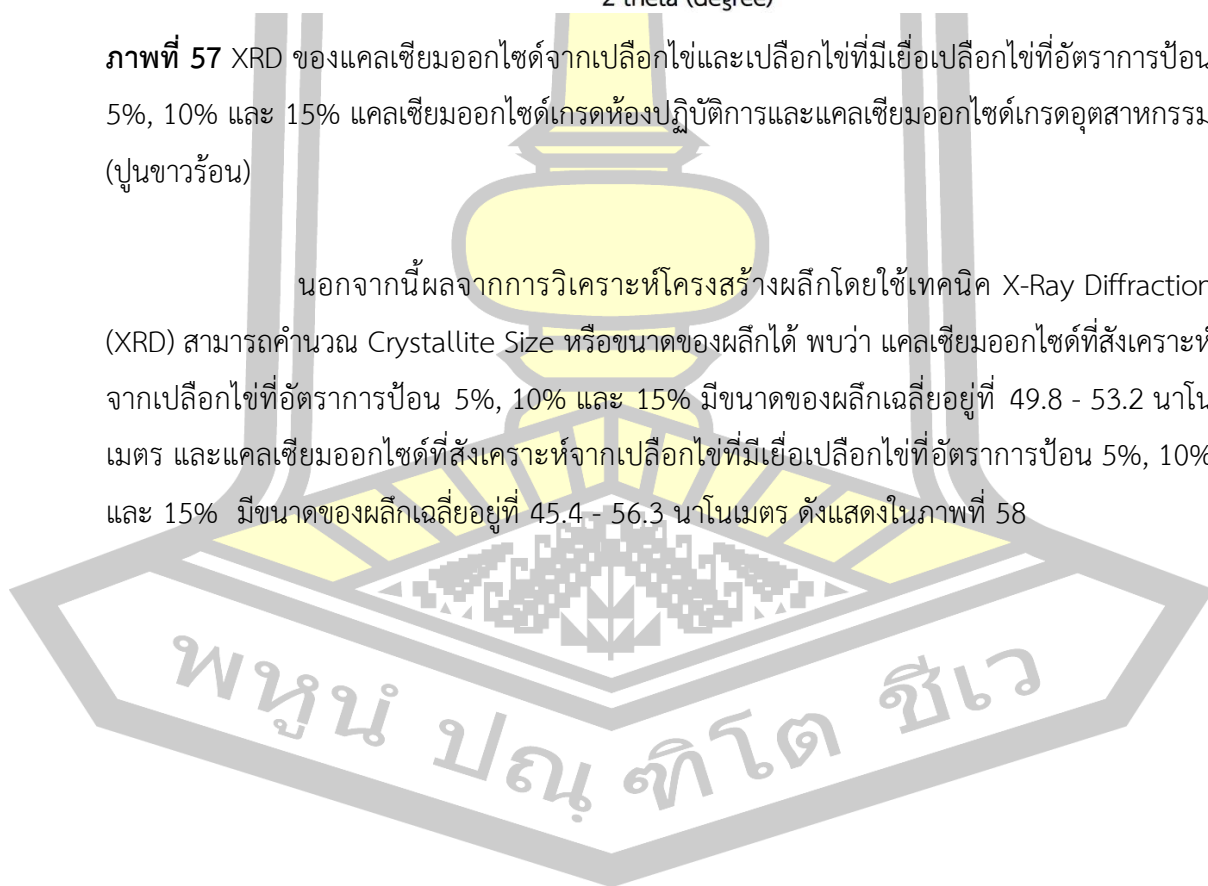
Samples	อัตราการป้อน	2 θ	References
CaO[ES]	5%	32.5°, 37.6° 54.1° 64.4° 67.6° 29.7°	This study
	10%	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7°	
	15%	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7°	
CaO[ESM]	5%	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7° 29.7°	This study
	10%	32.6° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7°	
	15%	32.5° 37.7° 54.2° 64.5° 67.7°	
CaO-Eggshell		32.5° - 54.0° - - 29.0° - - 47.5° -	(Ayodeji et al., 2018)
CaO-Eggshell		32.3° 37.5° - 64.3° 67.3° 29.5° 39.5° 43.3° 47.3° 48.6° 28.8° 34.2° - 50.9° -	(Mohadi et al., 2016)
JCPDS data (CaO)		32.2° 37.3° 58.3° 64.1° 67.3°	(Lesbani et al., 2013)
JCPDS data (CaCO ₃)		29.4° 39.4° 43.2° 47.4° 48.5°	
JCPDS data Ca(OH) ₂		28.6° 34.1° 47.1° 50.8° -	

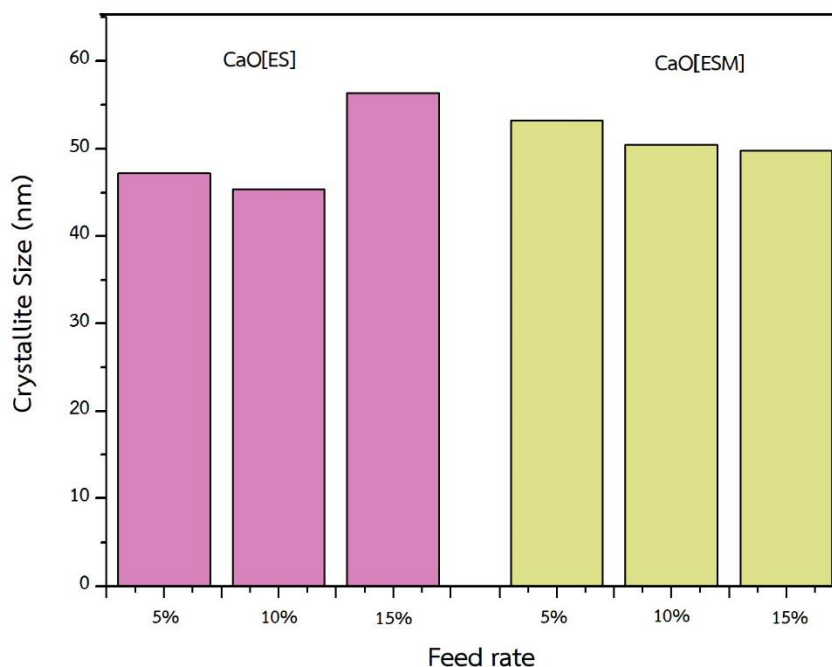




ภาพที่ 57 XRD ของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) สามารถคำนวณ Crystallite Size หรือขนาดของผลึกได้ พบว่า แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% มีขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 49.8 - 53.2 นาโนเมตร และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% มีขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 45.4 - 56.3 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 58





ภาพที่ 58 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%

4.4.2.2 การวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

ผลการศึกษาร่องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ X-ray fluorescence spectrophotometer (XRF) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5% CaO[ES-5%], 10% CaO[ES-10%], และ 15% CaO[ES-15%] พบว่า แคลเซียมออกไซด์เป็นร่องค์ประกอบที่มีมากที่สุดมีสูงถึงร้อยละ 97.8, 97.7 และ 97.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไม่บดที่อัตราการป้อนต่างกันมีความบริสุทธิ์ ไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการสามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่แยกเยื่อแบบไม่บดได้ทั้ง 3 อัตราการป้อน ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5% CaO[ESM-5%], 10% CaO[ESM-10%], และ 15% CaO[ESM-15%] พบว่า แคลเซียมออกไซด์เป็นร่องค์ประกอบที่มีมากที่สุดมีสูงถึงร้อยละ 94.9, 96.8 และ 96.8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อไม่บดที่อัตราการป้อนต่างกันมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 10% และ 15% มีความบริสุทธิ์สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5% เมื่อเปรียบเทียบกับ

แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) สามารถสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อแบบไม่บดได้ทั้ง 3 อัตราการป้อน ดังแสดงในตารางที่ 40 และองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 94.3 และ 98.2 ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Pornchai และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 800 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Pornchai et al., 2016) และ Ayodeji และคณะ (2018) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ 850 °C ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Ayodeji et al., 2018) พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 97.9 และ 97.08 ตามลำดับ ซึ่งมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับผลการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุน ทั้งยังมีองค์ประกอบของ MgO, P₂O₅, SO₃, Na₂O, SrO, K₂O, Fe₂O₃ และ CuO เหมือนกันอีกด้วย และแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่สามารถเทียบได้กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแคลเซียมออกไซด์มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 90 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ ๓๘๘๗, 2552) และเมื่อทำการวิเคราะห์สถิติจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ระหว่างอัตราการป้อนเปลือกไข่กับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ พบว่า ค่า F = 0.311 และค่า sig. = 0.754 นั่นคือ อัตราการป้อนเปลือกไข่กับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (ค่า sig. = 0.754 มีค่ามากกว่า 0.05) อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความเร็รรอบในการหมุนต่อแคลเซียมออกไซด์ที่ได้ พบว่า การที่เพิ่มความเร็รรอบในการหมุนและการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบในเตามากขึ้น (ไม่เกินร้อยละ 20 ของปริมาตรเตาเผา) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการกวนวัสดุที่มากขึ้น และเกิดถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valle (2012) ที่กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบในเตาเผาแบบหมุน (Valle, 2012)



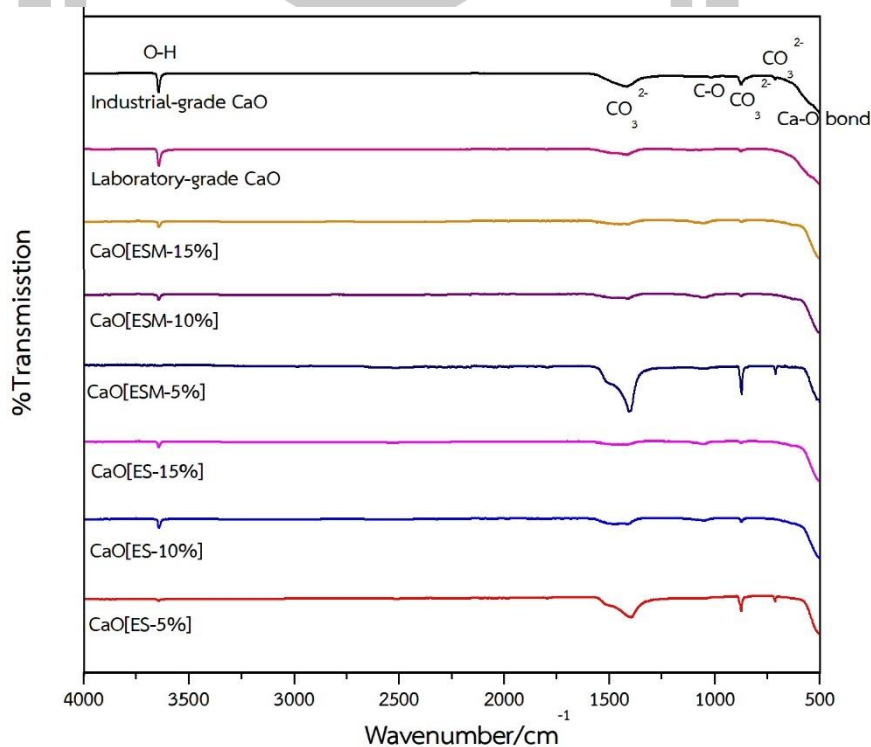
ตารางที่ 40 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

Composition	CaO from ES			CaO from ESM			Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	มาตรฐาน มอก. 319 CaO
	Feed			Feed					
	5%	10%	15%	5%	10%	15%			
CaO	97.8	97.7	97.6	94.9	96.8	96.8	94.4	98.2	90
MgO	1.27	1.31	1.36	1.34	1.48	1.48	1.47	0.66	1.8
P ₂ O ₅	0.392	0.458	0.537	0.732	0.963	0.955	0.0215	0.57	-
SO ₃	0.172	0.138	0.156	2.555	0.232	0.327	0.269	0.15	0.5
SiO ₂	0.1126	0.115	0.0359	0.215	0.168	0.0693	2.88	0.05	-
Na ₂ O	0.144	0.133	0.146	0.0999	0.151	0.173	-	0.14	-
SrO	0.045	0.0445	0.0469	0.0470	0.0449	0.0441	0.182	0.04	-
K ₂ O	0.0248	0.0251	0.0322	0.0209	0.0366	0.0456	0.0351	0.08	-
Fe ₂ O ₃	0.0188	0.0149	0.0154	0.0214	0.0151	0.0415	0.371	0.03	0.5
CuO	0.00901	0.00644	0.00786	0.00871	0.00813	0.00849	0.00883	0.009	-
ZnO	0.00424	0.00392	0.00211	0.0018	0.00540	0.00484	0.00441	-	-
ZrO ₂	0.00173	0.00150	0.00187	0.00249	0.00233	0.00300	0.00666	-	-

4.4.2.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

ผลการทดลองด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของเปลือกไข่ที่อัตราการป้อนที่แตกต่างกันโดยการวัดการดูดกลืนแสงช่วงเลขคลื่น 4000–450 cm⁻¹ ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5% CaO[ES-5%], 10% CaO[ES-10%], และ 15% CaO[ES-15%] ผลการทดสอบพบว่าในช่วงเลขที่คลื่น 1,410 cm⁻¹ 876 cm⁻¹ 719 cm⁻¹ พบหมู่ฟังก์ชัน CO₃²⁻ ของแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างและพบในแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ ในช่วงเลขที่คลื่น 3641 cm⁻¹ พบหมู่ฟังก์ชัน O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 10% 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ แต่ไม่พบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5% ในช่วงเลขที่คลื่น 500 ถึง 580 cm⁻¹ พบหมู่ฟังก์ชัน Ca-O พบในแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10%, 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ ส่วนแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5% CaO[ESM-5%], 10%

CaO[ESM-10%], และ 15% CaO[ESM-15%] ผลการทดสอบพบว่าในช่วงเลขที่คลื่น $1,410\text{ cm}^{-1}$ 876 cm^{-1} 719 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} ของแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างและพบในแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ ในช่วงเลขที่คลื่น 3641 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน O-H ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 10% 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ แต่ไม่พบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5% ในช่วงเลขที่คลื่น 500 ถึง 580 cm^{-1} พบหมู่ฟังก์ชัน Ca-O พบในแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อที่อัตราการป้อน 5%, 10%, 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ สิ่งนี้บ่งชี้ได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีแนวโน้มเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ และจากงานวิจัยของ Pornchai และคณะ (2016) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Pornchai et al., 2016) และงานวิจัยของ Naemchan และคณะ (2008) สังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Naemchan et al., 2008) พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันกับการสังเคราะห์เปลือกไข่โดยใช้เตาเผาแบบหมุน ดังแสดงในภาพที่ 59 และตารางที่ 41



ภาพที่ 59 FTIR ของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% แคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการและแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

ตารางที่ 41 แสดงช่วงที่คลื่น Infrared (IR) ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15% เทียบกับหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์

CaO[ES]			CaO[ESM]			Industrial grade CaO	Laboratory grade CaO	(Pornchai et al., 2016)	(Naemchan et al., 2008)	Assignments
Feed			Feed							
5%	10%	15%	5%	10%	15%					
3641	3642	3642	-	3642	3642	3641	3641	3642	3641	-O-H
1410	1412	1411	1410	1412	1411	1416	1416	1410	1428	CO ₃ ²⁻
1050	1055	1055	1050	1055	1055	1022	-	1053	-	-C-O
876	874	874	876	874	874	876	876	875	875	CO ₃ ²⁻
719	-	-	719	-	-	713	-	713	712	CO ₃ ²⁻
500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580	500-580			Ca-O bonds

4.4.2 ผลของ %Yield ของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

%Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่ของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 อัตราการป้อน พบว่า %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ของทุกอัตราการป้อนมี %Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ประมาณ 50% ดังแสดงในตารางที่ 42

ตารางที่ 42 % Yield ของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

Samples	อัตราการป้อน	% Yield ของแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้จากเปลือกไข่
CaO[ES]	5%	57.90%±0.01
	10%	55.60%±0.01
	15%	57.85%±0.03
CaO[ESM]	5%	52.80%±0.00
	10%	55.20%±0.01
	15%	55.75%±0.02

4.5 ค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม

นำข้อมูลที่เหมาะสมในการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่มาสรุปเป็นค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรมโรงฟักไข่สูงเนินมีปริมาณเปลือกไข่ที่ต้องการกำจัด 1 - 1.5 ตันต่อวัน โดยจากการทดลองการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่โดยเตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า ขนาดเปลือกไข่ที่เหมาะสมสามารถเผาเปลือกไข่แบบไม่บดหากแยกเยื่อจะมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์เทียบได้กับเกรดห้องปฏิบัติการ และเผาเปลือกไข่แบบไม่บดที่ไม่แยกเยื่อจะมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์เทียบได้กับเกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) อุณหภูมิในการเผาเปลือกไข่อยู่ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเผาที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ชั่วโมง (ระยะเวลาจะขึ้นอยู่กับความยาวของเตาเผา ความเร็วรอบในการหมุน และมุมเอียง) ความเร็วรอบของเตาเผาอยู่ในช่วง 1 - 2 รอบต่อนาที (ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการเผา ลดลง) มุมเอียงของเตาเผาที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 - 5 องศา (ถ้ามุมเอียงเตาเผาเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการเผา ลดลง) อัตราการป้อนเปลือกไข่อยู่ที่ 5 - 20 % ของปริมาตรเตาเผา (อัตราการป้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณเปลือกไข่ที่เกิดขึ้นต่อวัน) สำหรับการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรมของโรงฟักไข่สูงเนิน จะนำค่าที่ได้จากการทดลองจากเตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการมาเป็นค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 43 ค่าพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาระดับอุตสาหกรรม

ค่าพื้นฐานในการออกแบบ	
	1) อุณหภูมิในการเผา ≥ 800 °C
	2) ระยะเวลาในการเผา (Residence time) ≥ 1 ชั่วโมง
	3) ความหนาแน่นของเปลือกไข่ 2.05 g/cm^3
	4) ความเร็วรอบของการหมุนเตา 1-2 RPM
	5) มุมเอียงของเตา 3-5 องศา
	6) อัตราการป้อนเปลือกไข่ 5-20 % ของปริมาตรเตาเผา
	7) สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผา L/D 8-14

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ระบบเตาเผาแบบหมุนขนาดต้นแบบ

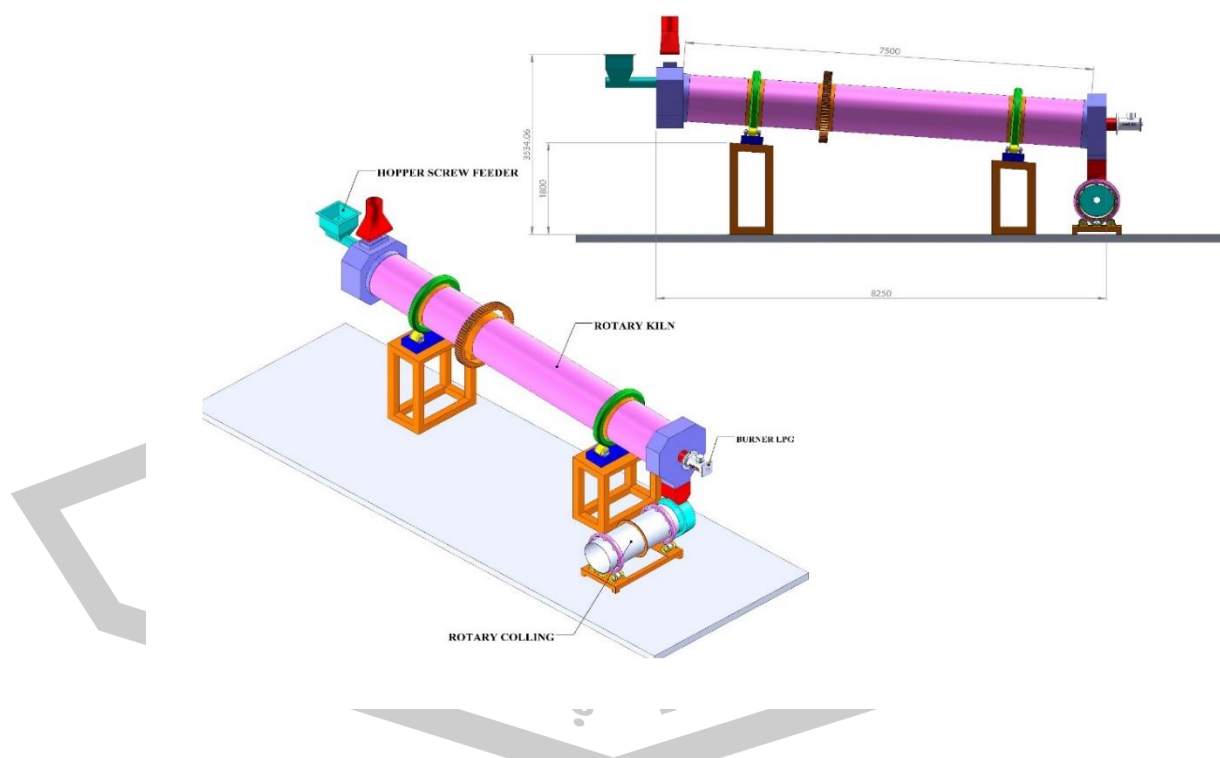
ระบบเตาเผาแบบหมุนขนาดต้นแบบ ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1) ระบบลำเลียงวัสดุ ประกอบด้วยสายพานลำเลียงนำเปลือกไข่เข้าสู่กรวย (ฮอปเปอร์) ขนาด 50*50 cm และใช้เกลียวลำเลียง (conveyor screw) ป้อนเปลือกไข่เข้าสู่เตาเผาได้อย่างต่อเนื่อง อัตราการป้อนในช่วง 90-200 kg/ชั่วโมง

2) ระบบเตาเผาแบบหมุน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร โดยเป็นโซนให้ความร้อน 8 เมตร ทำจากเหล็กแผ่นรีดร้อน SS400 หนา 8 มม. ภายในเตาสร้างจากอิฐหรือคอนกรีตทนไฟ เตาเผามีมุมเอียง 3 - 5 องศา ความเร็วรอบ 1 - 2 RPM

3) ระบบให้ความร้อน ให้ความร้อนโดยตรง (Direct fired rotary kiln) โดยใช้หัวเผาแก๊ส LPG

4) ระบบลดความร้อนและรวมรวมผลิตภัณฑ์ เป็นระบบลดความร้อนผลิตภัณฑ์แบบหมุน (Rotary Cooler) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร ยาว 6 เมตร หนา 6 มม. ลำเลียงไปยังส่วนเก็บผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 60 ระบบเตาเผาแบบหมุนขนาดต้นแบบ

4.6 ผลของการประเมินต้นทุนการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

กรณีเปลือกไข่ที่ไม่แยกเยื่อ

- 1) ต้นทุนในการก่อสร้างระบบ ได้แก่ ค่าก่อสร้างเตาเผา และอาคาร เท่ากับ 2,500,000 บาท
 - 2) ค่าดำเนินการ
 - 2.1) ค่าแรงงานคิดเป็น (2 คนต่อเดือน) เดือนละ 25,000 และ 10,000 บาท เท่ากับ 35,000 บาทต่อเดือน
 - 2.2) ค่าไฟฟ้า 60,000 บาทต่อปี
 - 2.3) ค่าบำรุงรักษา ร้อยละ 10 ของงบลงทุน คิดปีที่ 2 เป็นต้นไป
 - 2.4) ค่ากระสอบและค่าขนส่งไข่ 50,000 บาทต่อปี
 - 2.5) ค่าก๊าซ 200,000 บาทต่อปี
 - 3) ผลตอบแทน
 - 3.1) ลดค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ 300,000 บาทต่อปี
 - 3.2) มูลค่าจากการขาย (ขายกิโลกรัมละ 25 บาท คิดวันทำงาน คือ 241 วัน) เท่ากับ 3,012,500 บาทต่อปี
- Payback period เท่ากับ 1.314 หรือประมาณ 1 ปี 4 เดือน
- NPV เท่ากับ 5,717,219 บาท

กรณีเปลือกไข่ที่ทำการแยกเยื่อด้วยสารเคมี

- 1) ต้นทุนในการก่อสร้างระบบ ได้แก่ ค่าก่อสร้างเตาเผา ค่าถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อ และอาคาร และถังปฏิกรณ์สำหรับแยกเยื่อเปลือกไข่ เท่ากับ 2,520,000 บาท
- 2) ค่าดำเนินการ
 - 2.1) ค่าแรงงานคิดเป็น (2 คนต่อเดือน) เดือนละ 25,000 และ 10,000 บาท เท่ากับ 35,000 บาทต่อเดือน
 - 2.2) ค่าไฟฟ้า 60,000 บาทต่อปี
 - 2.3) ค่าบำรุงรักษา ร้อยละ 10 ของงบลงทุน คิดปีที่ 2 เป็นต้นไป
 - 2.4) ค่ากระสอบและค่าขนส่งไข่ 50,000 บาทต่อปี
 - 2.5) ค่าก๊าซ 200,000 บาทต่อปี
 - 2.6) ค่าสารเคมีที่ใช้สำหรับแยกเยื่อเปลือกไข่ 22,000 บาทต่อปี
 - 2.7) ค่าน้ำสำหรับล้างเปลือกไข่ 8,000 บาทต่อปี

3) ผลตอบแทน

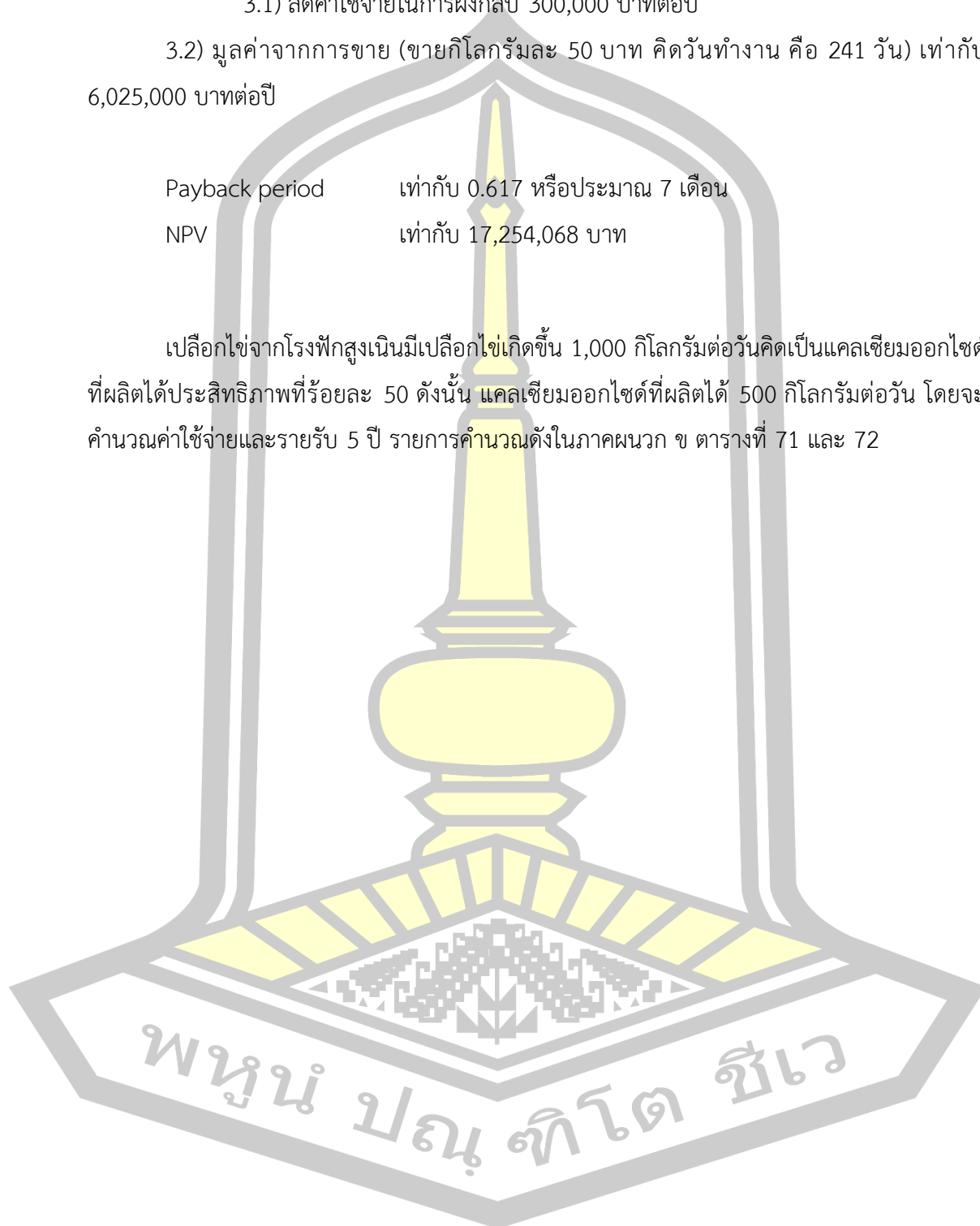
3.1) ลดค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ 300,000 บาทต่อปี

3.2) มูลค่าจากการขาย (ขายกิโกรัมละ 50 บาท คิดวันทำงาน คือ 241 วัน) เท่ากับ 6,025,000 บาทต่อปี

Payback period เท่ากับ 0.617 หรือประมาณ 7 เดือน

NPV เท่ากับ 17,254,068 บาท

เปลือกไข่จากโรงฟักสูงเนินมีเปลือกไข่เกิดขึ้น 1,000 กิโลกรัมต่อวันคิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ประสิทธิภาพที่ร้อยละ 50 ดังนั้น แคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตได้ 500 กิโลกรัมต่อวัน โดยจะคำนวณค่าใช้จ่ายและรายรับ 5 ปี รายการคำนวณดังในภาคผนวก ข ตารางที่ 71 และ 72



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ลักษณะและสมบัติของเปลือกไข่

5.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพด้วยการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ XRD ของเปลือกไข่ พบว่า การใช้สารเคมีในการแยกเยื่อไม่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและโครงสร้างผลึกของเปลือกไข่

5.1.2 อิทธิพลของขนาดของเปลือกไข่

5.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพลักษณะสัณฐานวิทยาของแคลเซียมออกไซด์เป็นรูปทรงกระบอกคล้ายแท่งดัมเบลล์

5.1.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

1) ทำการแยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บด มีความบริสุทธิ์สูง เทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

2) หากไม่แยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บดมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ลดลง เทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

3) หากไม่แยกเยื่อเปลือกไข่แบบบดมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบบไม่บด เนื่องจากการบดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากขึ้น

4) ทำการแยกเยื่อเปลือกไข่แบบบดที่ขนาดต่างกัน สามารถเทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

5) เมื่อทำการวิเคราะห์อิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันทั้ง 6 ขนาดโดยใช้ t-test พบว่า ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ทั้ง 6 ขนาดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และเมื่อทำการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็นกลุ่ม 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เปลือกไข่ที่ไม่บด กลุ่มที่ 2 เปลือกไข่ที่บดขนาดเดียวกัน และกลุ่มที่ 3 เปลือกไข่ที่บดขนาดต่างกันโดยใช้ t-test พบว่า ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่ไม่บดของเปลือกไข่กับเปลือกไข่ที่มีเยื่อมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%, ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์กับขนาดเปลือกไข่ที่บดที่มีขนาด 500 ไมโครเมตรของเปลือกไข่กับเปลือกไข่ที่มีเยื่อมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์

กับขนาดเปลือกไข่ที่ีบดขนาดต่างกันของเปลือกไข่ขนาด 500 250 และ 53 ไมโครเมตรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

5.1.3 อิทธิพลของความเร็รรอบในการหมน

5.1.3.1 คุณสมบัติทางเคมี

1) ทำการแยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บด ความเร็รรอบที่ต่างกันมีความบริสุทธิ์ไม่แตกต่างกัน เทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

2) หากไม่แยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บด ความเร็รรอบที่ต่างกันมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ลดลงเมื่อเทียบกับแบบแยกเยื่อ สามารถเทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน)

3) หากไม่แยกเยื่อเปลือกไข่แบบบดขนาด 500 ไมโครเมตรมีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบไม่บด เนื่องจากการบดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากขึ้น

4) เมื่อทำการวิเคราะห์อิทธิพลของความเร็รรอบในการหมนที่แตกต่างกันโดยใช้ ANOVA พบว่า ความเร็รรอบในการหมนที่ต่างกับกับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

5.1.4 อิทธิพลของอัตราการป้อนเปลือกไข่

5.1.4.1 คุณสมบัติทางเคมี

1) ทำการแยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บด อัตราการป้อนที่ต่างกันมีความบริสุทธิ์แคลเซียมออกไซด์ไม่แตกต่างกัน เทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดห้องปฏิบัติการ

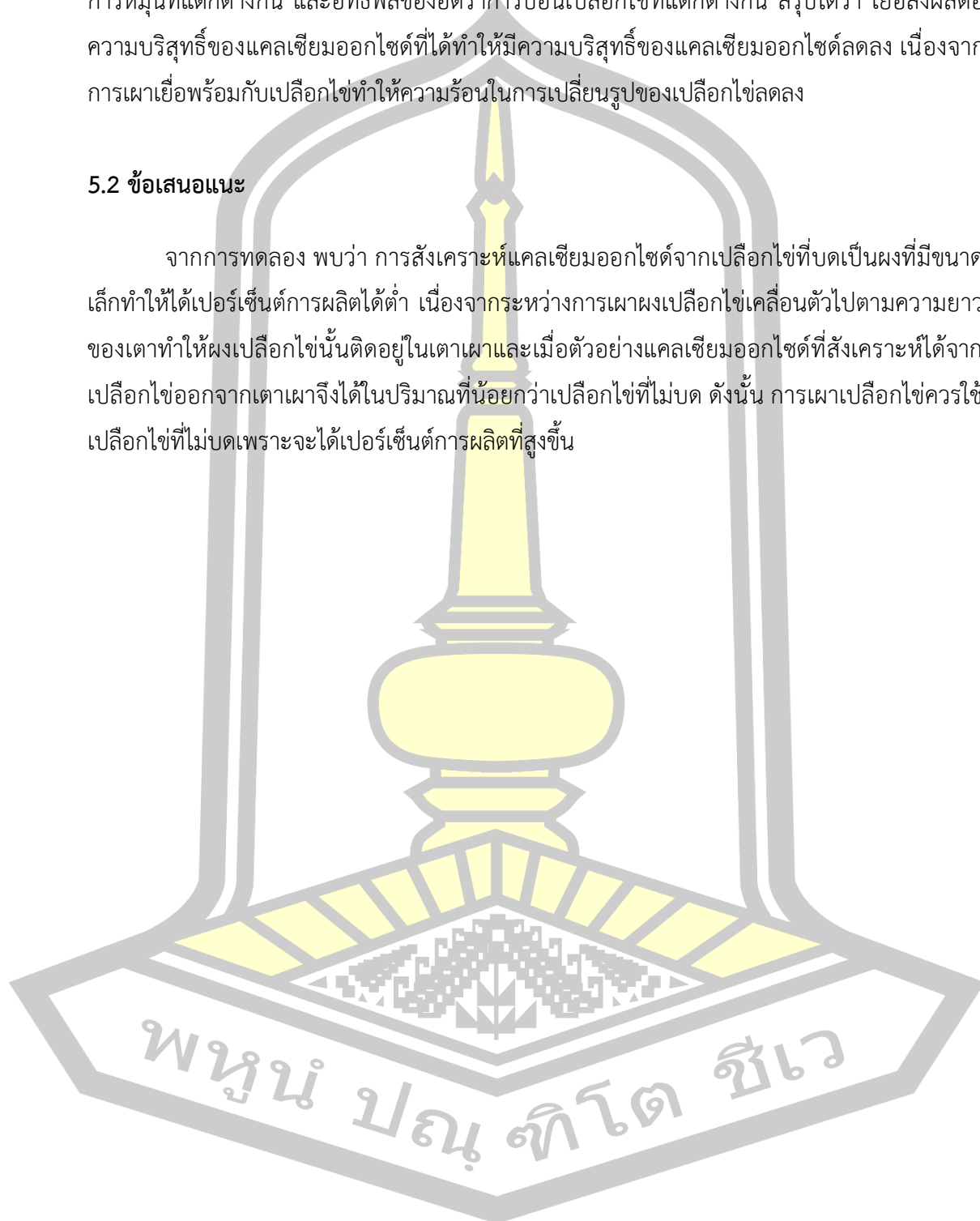
2) หากไม่แยกเยื่อเปลือกไข่แบบไม่บด มีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ลดลงเมื่อเทียบกับแบบแยกเยื่อ แต่สามารถเทียบเท่ากับแคลเซียมออกไซด์เกรดอุตสาหกรรม (ปูนขาวร้อน) และที่อัตราการป้อนที่ 10% 15% มีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าที่ 5% เนื่องจากอัตราการป้อนของเตาเผาที่เหมาะสมอยู่ที่ 10-20%

3) เมื่อทำการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราการป้อนที่ต่างกันโดยใช้ ANOVA พบว่า อัตราการป้อนที่ต่างกับกับความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

จากการศึกษาอิทธิพลของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน อิทธิพลของความเร็รรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน และอิทธิพลของอัตราการป้อนเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน สรุปได้ว่า เยื่อส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้ทำให้มีความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ลดลง เนื่องจากการเผาเยื่อพร้อมกับเปลือกไข่ทำให้ความร้อนในการเปลี่ยนรูปของเปลือกไข่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง พบว่า การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่บดเป็นผงที่มีขนาดเล็กทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การผลิตได้ต่ำ เนื่องจากระหว่างการเผาผงเปลือกไข่เคลื่อนตัวไปตามความยาวของเตาทำให้ผงเปลือกไข่นั้นติดอยู่ในเตาเผาและเมื่อตัวอย่างแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ออกจากเตาเผาจึงได้ในปริมาณที่น้อยกว่าเปลือกไข่ที่ไม่บด ดังนั้น การเผาเปลือกไข่ควรใช้เปลือกไข่ที่ไม่บดเพราะจะได้เปอร์เซ็นต์การผลิตที่สูงขึ้น



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 6.*

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2559). *ตำราระบบการจัดการมลพิษทางอากาศอุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม).* กรุงเทพฯ ฯ.

กฤษ มณีรัตน์. (2542). *การออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพของเตาเผาแบบ Rotary Kiln.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย สำนักเหมืองแร่และสัมประทาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2545). *เอกสารวิชาการ เรื่องแคลเซียมคาร์บอเนต.*

เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต, & อัญชิสา ยี่สุนแซม. (2554). การศึกษาการวางมุมเหมาะสมของหัวเผาที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาปูนขาวโดยวิธีไฟในตัวอย่างกลุ่ม. *วารสารวิจัย มช.*, 225-239.

ทีปกร พรไชย. (2561). *การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจากเศษเปลือกไข่ไก่.* มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ธนภรณ์ ปวงแก้ว. (2555). *การเตรียมแคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์สูงจากเปลือกหอยแครงเพื่อการผลิตผงไฮดรอกไซด์อะพาไทต์.* มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นราธิป วิทยากร. (2557). *การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากวัสดุเหลือทิ้งเพื่อเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเซรามิกขั้นสูงสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Study on the possible use of calcium carbonate (CaCO₃) from waste as starting material to fabricate advanced ceramic in the electronic industry).* สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

บริษัทซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน). (2561).

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ ๓๘๘๗, พ. ศ. ๒๕๕๒ (2552). *ปูนไลม์อุตสาหกรรม.*

ไพรัช รุ่งอุทัย, & ชาญชัย จุลโกลบ. (2553). *การใช้สารทำความสะอาดและฆ่าเชื้อในฟาร์มมาตรฐานไก่เนื้อ ในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ปี 2553.*

มงคล จิ่งสถาปัตยกรรมชัย, สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, & สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2546). การศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการเผาทำลายของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ ในระบบเตาเผาแบบหมุน. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17.*

ฤมล ลากแก้ว. (2540). *การศึกษาพารามิเตอร์และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบความร้อนของเตาเผาขยะแบบหมุน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.*

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. (2558). เครื่องมือในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ. Retrieved November 1, 2020, from 2558 website: <https://www.stou.ac.th/stouonline/lom/data/sec/Lom14/04-01.html>

วิชัย ดำรงโภคภัณฑ์. (2555). เทคโนโลยีการนำเปลือกไข่มาใช้ประโยชน์ (Eggshell Utilization Technology). *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 11, 75–83.

สุกิจ นามพิชญ์, ชุศักดิ์ ศิริรัตน์, เอกรัตน์ รวยรวย, ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิวะสถิตย์, & สุธี ปิยะพิพัฒน์. (2549). *คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics Laboratory).*

อัจฉรา อิ่มคำ พุฒคำ, & อภิพงษ์ พุฒคำ. (2557). การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล (Synthesis and Characteristics of Calcium Oxide as a Catalyst in Biodiesel Production). *วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(3), 29–46.

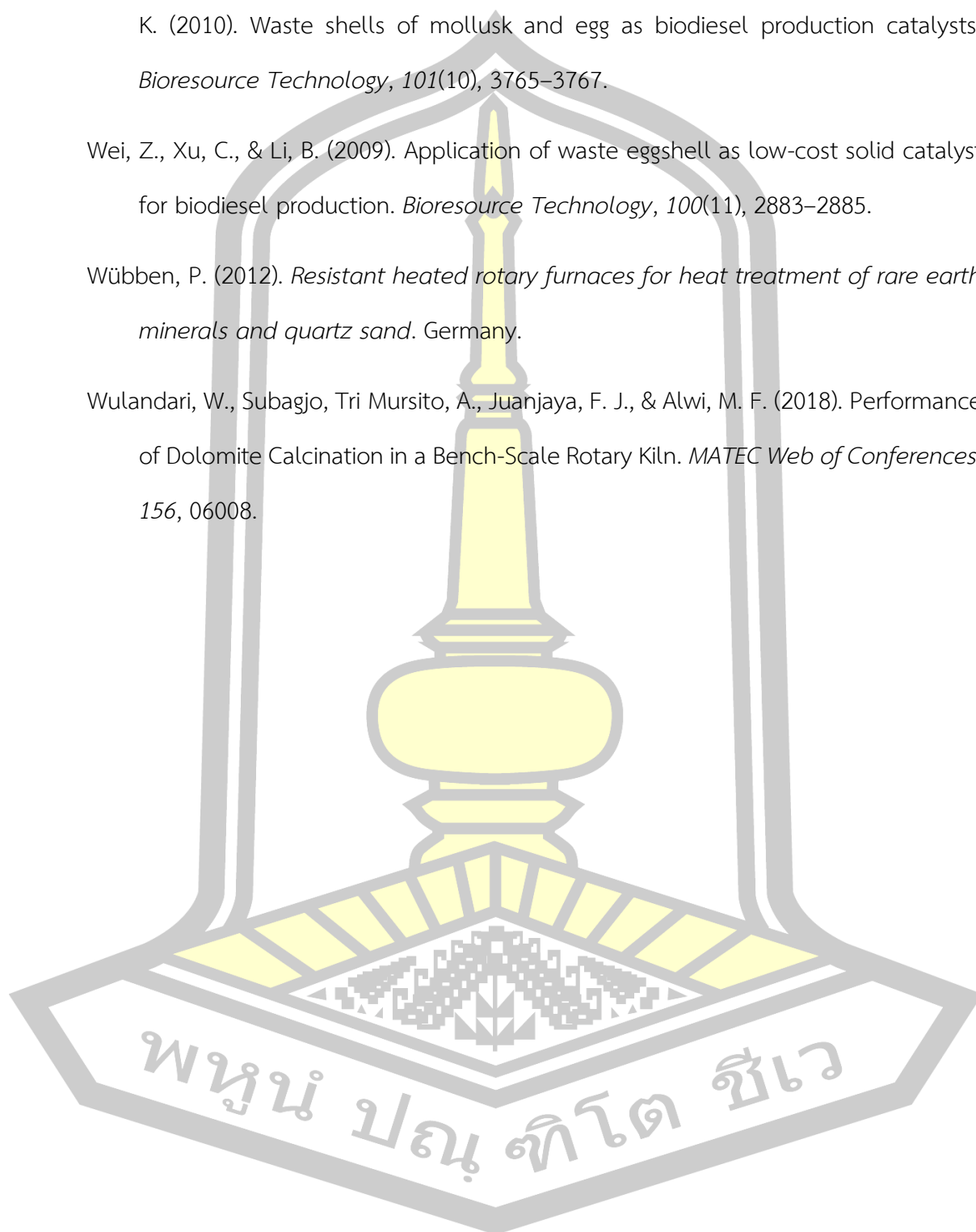
Ayodeji, A. A., Ojewumi, M. E., Rasheed, B., & Ayodele, J. M. (2018). Data on CaO and eggshell catalysts used for biodiesel production. *Data in Brief*, 19, 1466–1473.

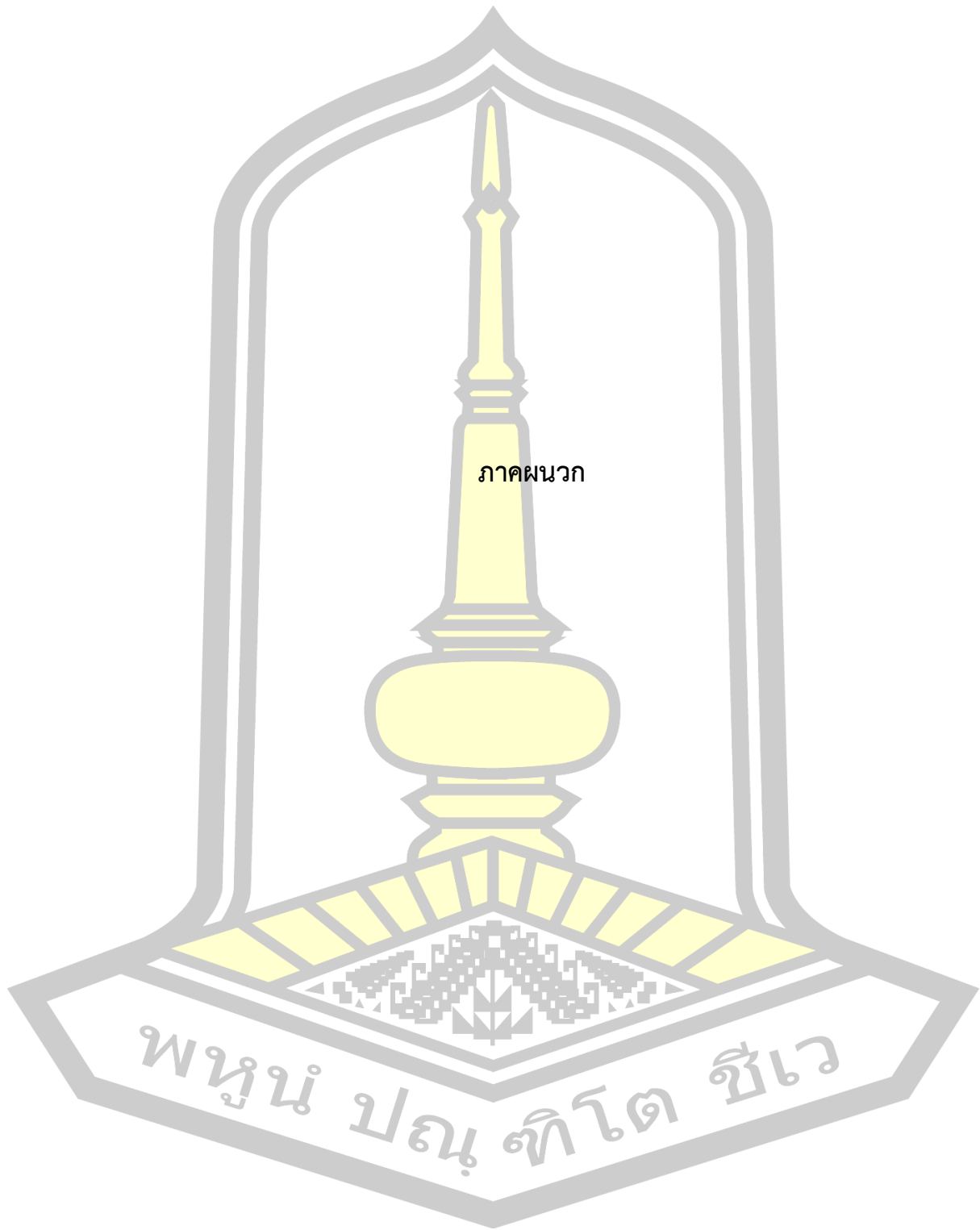
Bongo Njeng, A. S., Vitu, S., Clause, M., Dirion, J. L., & Debacq, M. (2015). Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln: Part I. Experimental RTD and axial dispersion study. *Powder Technology*, 269, 554–565.

- Cree, D., & Rutter, A. (2015). Sustainable Bio-Inspired Limestone Eggshell Powder for Potential Industrialized Applications. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3(5), 941–949.
- Eeom, M., Hahn, T., Lee, H., & Choi, S. (2013). *Performance Analysis Modeling for Design of Rotary Kiln Reactors*. 18(3), 9–23.
- Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & Al., M. D. M. et. (2012). The eggshell: structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience*, 17(1), 1266–1280.
- Lee, H., & Choi, S. (2013). Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(10), 3191–3197.
- Lesbani, A., Tamba, P., Mohadi, R., & Fahmariyanti. (2013). Preparation of calcium oxide from *Achatina fulica* as catalyst for production of biodiesel from waste cooking oil. *Indonesian Journal of Chemistry*, 13(2), 176–180.
- Mirghiasi, Z., Bakhtiari, F., & Darezereshki, E. (2014). Preparation and characterization of CaO nanoparticles from $\text{Ca}(\text{OH})_2$ by direct thermal decomposition method. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(1), 113–117.
- Mohadi, R., Anggraini, K., Riyanti, F., & Lesbani, A. (2016). Preparation Calcium Oxide From Chicken Eggshells. *Sriwijaya Journal of Environment*, 1(2), 32–35.
- Mohammadi, Z., Shalavi, S., & Yazdizadeh, M. (2012). Antimicrobial Activity of Calcium Hydroxide in Endodontics: A Review. *Chonnam Medical Journal*, Vol. 48, p. 133.
- Naemchan, K., Meejoo, S., Onreabroy, W., & Limsuwan, P. (2008). *Temperature Effect on Chicken Egg Shell Investigated by XRD, TGA and FTIR*. 333–336.

- Niessen, & Walter R. (2010). Combustion and incineration processes: applications in environmental engineering. In *Chemical Processes for Environmental Engineering*.
- Okonkwo, P. C., Adefila, S. S., & Beecroft, G. A. (2012). Fundamental Approach To the Design of Single Vertical Shaft Lime Kiln. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(2), 70–78.
- Oliveira, D. A., Benelli, P., & Amante, E. R. (2013). A literature review on adding value to solid residues: Egg shells. *Journal of Cleaner Production*, 46, 42–47.
- Owuamanam, S., & Cree, D. (2020). Progress of Bio-Calcium Carbonate Waste Eggshell and Seashell Fillers in Polymer Composites: A Review. *Journal of Composites Science*, 4(2), 70.
- Pornchai, T., Putkham, A. I., & Putkham, A. (2016). Effect of Calcination Time on Physical and Chemical Properties of CaO- catalyst Derived from Industrial-eggshell Wastes. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 35(6), 693–273.
- Putkham, A. I., Ladhan, S., & Putkham, A. (2018). Factors Affecting the Particle Size of Bio-Calcium Carbonate Synthesized from Industrial Eggshell Waste. *Materials Transactions*, 59(8), 1220–1224.
- The Rotary kiln Handbook. Retrieved October 10, 2019, from FEECO.com
- Trinks, W., & Mawhinney, M. H. (2004). *Industrial furnaces: Design and construction*.
- Valle, M. A. R. (2012). *Numerical Modelling of Granular Beds in Rotary Kilns*. Delft University of Technology.
- Vijayan, S. N., & Sendhilkumar, S. (2014). Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3(3), 342–345.

- Viriya-empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N., & Faungnawakij, K. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3765–3767.
- Wei, Z., Xu, C., & Li, B. (2009). Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresource Technology*, *100*(11), 2883–2885.
- Wübben, P. (2012). *Resistant heated rotary furnaces for heat treatment of rare earth minerals and quartz sand*. Germany.
- Wulandari, W., Subagjo, Tri Mursito, A., Juanjaya, F. J., & Alwi, M. F. (2018). Performance of Dolomite Calcination in a Bench-Scale Rotary Kiln. *MATEC Web of Conferences*, *156*, 06008.



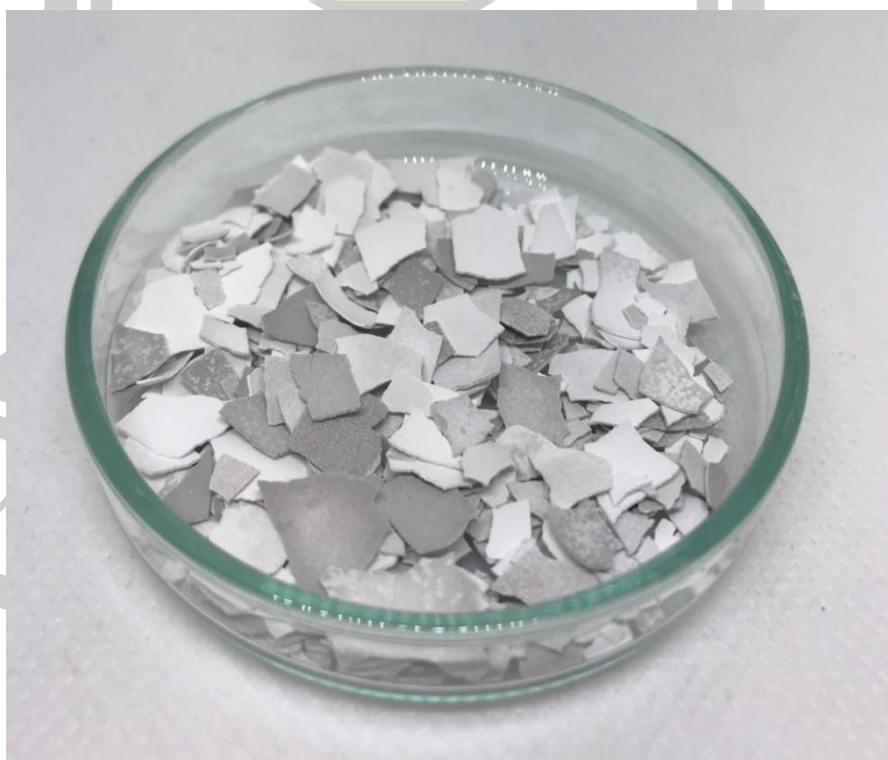


ภาคผนวก

พหุ ประทีป ชัยเว



ภาพที่ 61 ลักษณะตัวอย่างเปลือกไข่หลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน



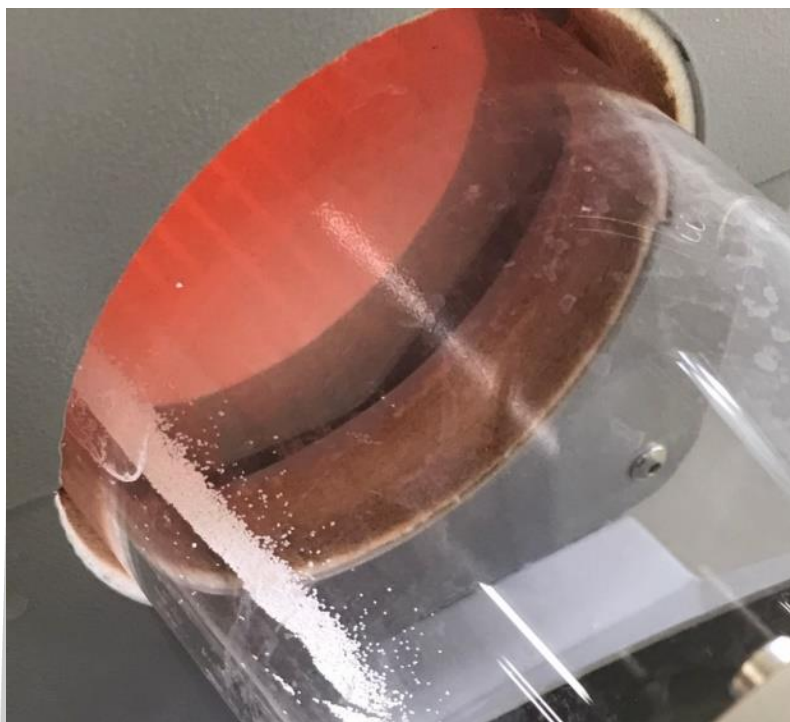
ภาพที่ 62 ลักษณะตัวอย่างเปลือกไข่ที่มีเชื้อเปลือกไข่หลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน



ภาพที่ 63 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ขนาดไม่เกิน 500 ไมโครเมตรหลังจากการเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน



ภาพที่ 64 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ทางเข้า



ภาพที่ 65 ลักษณะตัวอย่างผงเปลือกไข่ทางออก

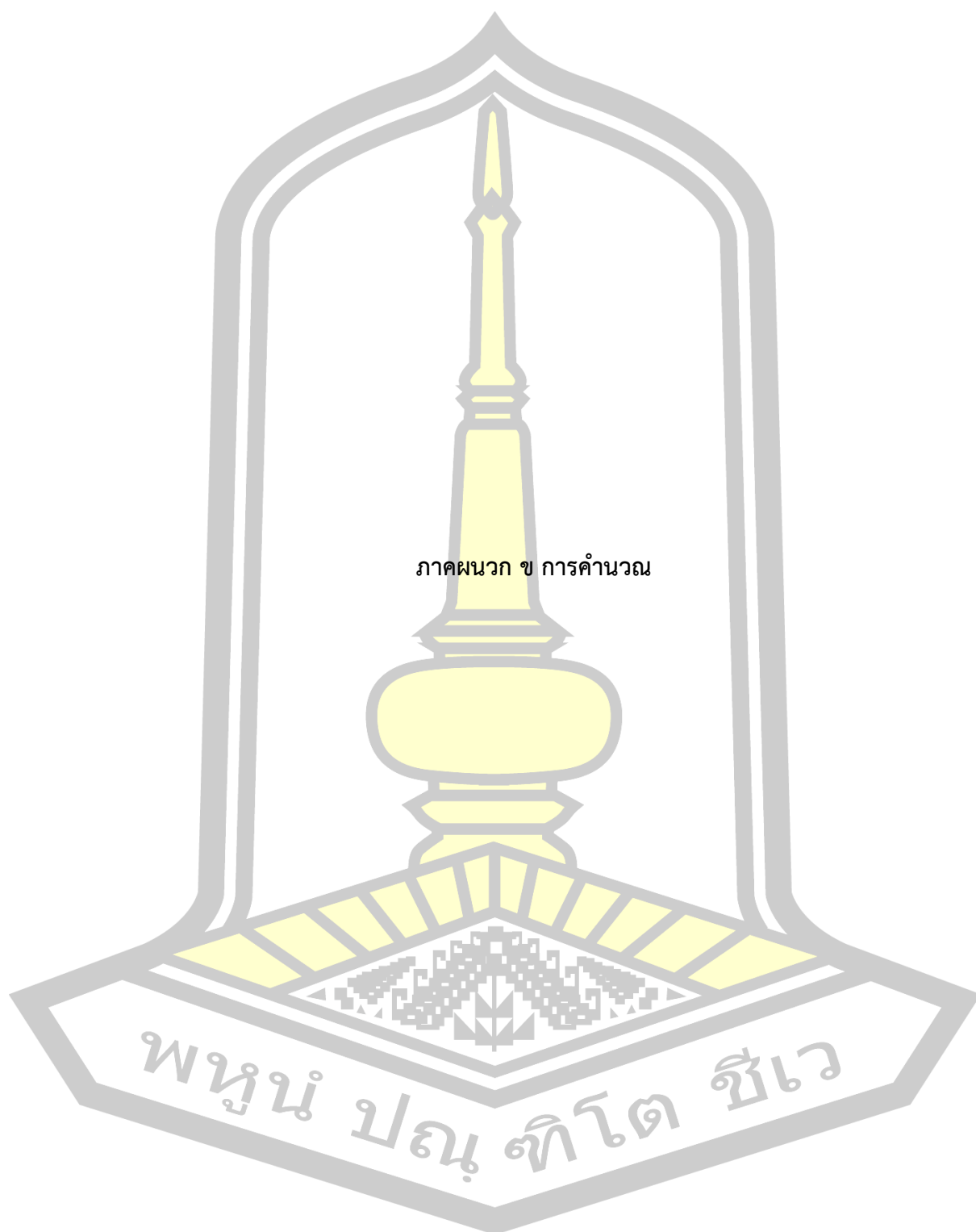


ภาพที่ 66 ตั้งอุปกรณ์สำหรับแยกเยื่อออกจากเปลือกไข่



ภาพที่ 67 เตาเผาแบบหมุนระดับห้องปฏิบัติการ





ตารางที่ 44 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ชั้นที่ 1

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (1) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	3/8 in	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	9.5	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	4.2 = 4.2
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง %		$= \frac{4.2}{500} \times 100 = 0.84$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม %		0.84 = 0.84
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %		$= 100 - 0.84 = 99.16$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (2) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	4	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	4.75	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	72.9 = 72.9
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง %		$= \frac{72.9}{500} \times 100 = 14.58$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม %		$= 0.84 + 14.58 = 15.42$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %		$= 100 - 15.42 = 84.58$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (3) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	8	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	2.36	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	233.4 = 233.4
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง %		$= \frac{233.4}{500} \times 100 = 46.68$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม %		$= 15.42 + 46.68 = 62.10$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %		$= 100 - 62.10 = 37.90$

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (4) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	16	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	1.18	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	147.8 = 147.8
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง %	29.56	$= \frac{147.8}{500} \times 100 = 29.56$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม %	91.66	$= 62.10 + 29.56 = 91.66$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %	8.34	$= 100 - 91.66 = 8.34$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (5) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	PAN	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	-	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	41.7 = 41.7
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง %	8.34	$= \frac{41.7}{500} \times 100 = 8.34$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม %	100	$= 91.66 + 8.34 = 100$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %	0	$= 100 - 100 = 0$

ตารางที่ 45 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ซ้ำที่ 2

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (1) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	3/8 in	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	9.5	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	4.5 = 4.5
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง %	0.90	$= \frac{4.5}{500} \times 100 = 0.90$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม %	0.90	$= 0.90$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %	99.10	$= 100 - 0.90 = 99.10$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (2) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	4	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	4.75	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	61.2 = 61.2

น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง	%	12.24	$= \frac{61.2 \times 100}{500} = 12.24$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม	%	13.14	$= 0.90 + 12.24 = 13.14$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	86.86	$= 100 - 13.14 = 86.86$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (3) กรัม		500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		8	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	2.36	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	215.3	$= 215.3$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง	%	43.06	$= \frac{215.3 \times 100}{500} = 43.06$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม	%	56.20	$= 13.14 + 43.06 = 56.20$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	43.80	$= 100 - 56.20 = 43.80$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (4) กรัม		500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		16	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	1.18	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	167.8	$= 167.8$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง	%	33.56	$= \frac{167.8 \times 100}{500} = 33.56$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม	%	89.76	$= 56.20 + 33.56 = 89.76$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	10.24	$= 100 - 89.76 = 10.24$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (5) กรัม		500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		PAN	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	-	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	51.2	$= 51.2$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง	%	10.24	$= \frac{51.2 \times 100}{500} = 10.24$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม	%	100	$= 89.76 + 10.24 = 100$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	0	$= 100 - 100 = 0$

ตารางที่ 46 การบันทึกและการคำนวณข้อมูลของเปลือกไข่ Sieve Analysis ชั้นที่ 3

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (1) กรัม		500		จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		3/8 in		จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	9.5		จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	5.0	= 5.0	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง	%	1.00	$= \frac{5.0 \times 100}{500} = 1.00$	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม	%	1.00	= 1.00	
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	99.00	= $100 - 1.00 = 99.00$	
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (2) กรัม		500		จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		4		จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	4.75		จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	87.8	= 87.8	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง	%	17.56	$= \frac{87.8 \times 100}{500} = 17.56$	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม	%	18.56	= $1.00 + 17.56 = 18.56$	
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	81.44	= $100 - 18.56 = 81.44$	
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (3) กรัม		500		จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์		8		จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง	มม.	2.36		จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้าง	กรัม	235.1	= 235.1	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างตะแกรง	%	47.02	$= \frac{235.1 \times 100}{500} = 47.02$	
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้างสะสม	%	65.58	= $18.56 + 47.02 = 65.58$	
ส่วนที่ผ่านตะแกรง	%	31.42	= $100 - 65.58 = 31.42$	

น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (4) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	16	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	1.18	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	137.4 = 137.4
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง %	27.48	$= \frac{137.4 \times 100}{500} = 27.48$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม %	93.06	$= 65.58 + 27.48 = 93.06$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %	6.94	$= 100 - 93.06 = 6.94$
น้ำหนักเปลือกไข่ที่ใช้ในการทดลอง (5) กรัม	500	จากการชั่งน้ำหนัก
ตะแกรงขนาด เบอร์	PAN	จากการบันทึกข้อมูล
ช่องเปิดของตะแกรง มม.	-	จากการบันทึกข้อมูล
น้ำหนักของเปลือกไข่ที่ค้ำ	กรัม	34.7 = 34.7
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำตะแกรง %	6.94	$= \frac{51.2 \times 100}{500} = 6.94$
น้ำหนักของเปลือกไข่ค้ำสะสม %	100	$= 93.06 + 6.94 = 100$
ส่วนที่ผ่านตะแกรง %	0	$= 100 - 100 = 0$

ตารางที่ 47 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	57.4	54.1	42.4	37	49.7	48.12	8.3778
O	35.1	37.7	48.2	51.4	38.4	42.16	7.1717
C	7.1	7.9	9.1	11.1	11.7	9.38	1.9880
Mg	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3	0.36	0.1140

ตารางที่ 48 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	35.5	42	43.2	40.4	34.3	39.08	3.9657
O	54	48.8	47	49.4	53.8	50.6	3.1401
C	10.2	8.9	9.4	9.6	11.2	9.86	0.8820
Mg	0.3	0.4	0.4	0.6	0.6	0.46	0.1342

ตารางที่ 49 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	31.4	32.2	38.8	30.7	34.6	33.54	3.2876
O	53.8	51.1	42.9	52.6	45.7	49.22	4.6976
C	14.8	16.7	18.3	16.6	19.6	17.2	1.8262

ตารางที่ 50 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไข่ขนาด 500 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	37.5	41.5	35.5	39.1	36.8	38.08	2.3113
O	51.3	47.9	51.8	46.8	50.6	49.68	2.2039
C	10.9	10	12.3	13.7	12.2	11.82	1.4202
Mg	0.3	0.6	0.4	0.4	0.4	0.42	0.1095

ตารางที่ 51 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไซขนาด 250 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	34.7	30.3	32.9	44.4	70.9	42.64	16.6727
O	52.7	55.8	53.6	44.9	20.9	45.58	14.3964
C	12.6	13.9	13.5	10.7	8.3	11.8	2.3130

ตารางที่ 52 แสดงธาตุประกอบในแคลเซียมออกไซด์จากผงเปลือกไซขนาด 53 ไมโครเมตรด้วยวิธี EDS

ธาตุองค์ประกอบ	Wt%					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5		
Ca	34.9	28.9	36.6	24.3	41.6	33.26	6.7582
O	50.8	50	46.5	48.5	44.1	47.98	2.7179
C	14.3	21.1	16.8	27.1	14.3	18.72	5.4463

ตารางที่ 53 พีคของแคลเซียมออกไซด์ขนาดเปลือกไซที่แตกต่างกันโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction ซ้ำที่ 1

Samples	2 θ
CaO[ES]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ESM]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ESMP 500 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 500 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 250 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 53 Micron]	32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°

ตารางที่ 54 พีคของแคลเซียมออกไซด์ขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกันโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction **ซ้ำที่ 2**

Samples	2 θ
CaO[ES]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ESM]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ESMP 500 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 500 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 250 Micron]	29.7°, 32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°
CaO[ES 53 Micron]	32.5°, 37.7°, 54.2°, 64.5°, 67.7°

ตารางที่ 55 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ **ซ้ำที่ 1**

Composition	CaO from ES	CaO from ESM	CaO from ESMP [500 μ m]	CaO from ESP [500 μ m]	CaO from ESP [250 μ m]	CaO from ESP [53 μ m]
CaO	98.0	95.2	97.5	97.8	98.0	96.7
MgO	1.21	1.20	1.18	1.07	1.02	1.20
P ₂ O ₅	0.310	0.627	0.367	0.353	0.336	0.634
SO ₃	0.142	2.41	0.324	0.284	0.229	0.972
SiO ₂	0.0392	0.268	0.402	0.175	0.0712	0.128
Na ₂ O	0.163	0.118	-	0.127	0.134	0.107
SrO	0.0410	0.0474	0.0423	0.0409	0.0426	0.0420
K ₂ O	0.0253	0.0302	0.0256	0.0425	0.0369	0.0405
Fe ₂ O ₃	0.0190	0.0223	0.0179	0.0208	0.0224	0.0211
CuO	0.0101	0.00884	0.00816	0.00834	0.0103	0.00835
ZnO	-	-	-	0.00477	0.00597	-
ZrO ₂	0.00175	0.00249	-	-	-	0.00172
Al ₂ O ₃	-	0.0264	-	-	0.0252	-
Cl	-	-	-	-	-	0.0273

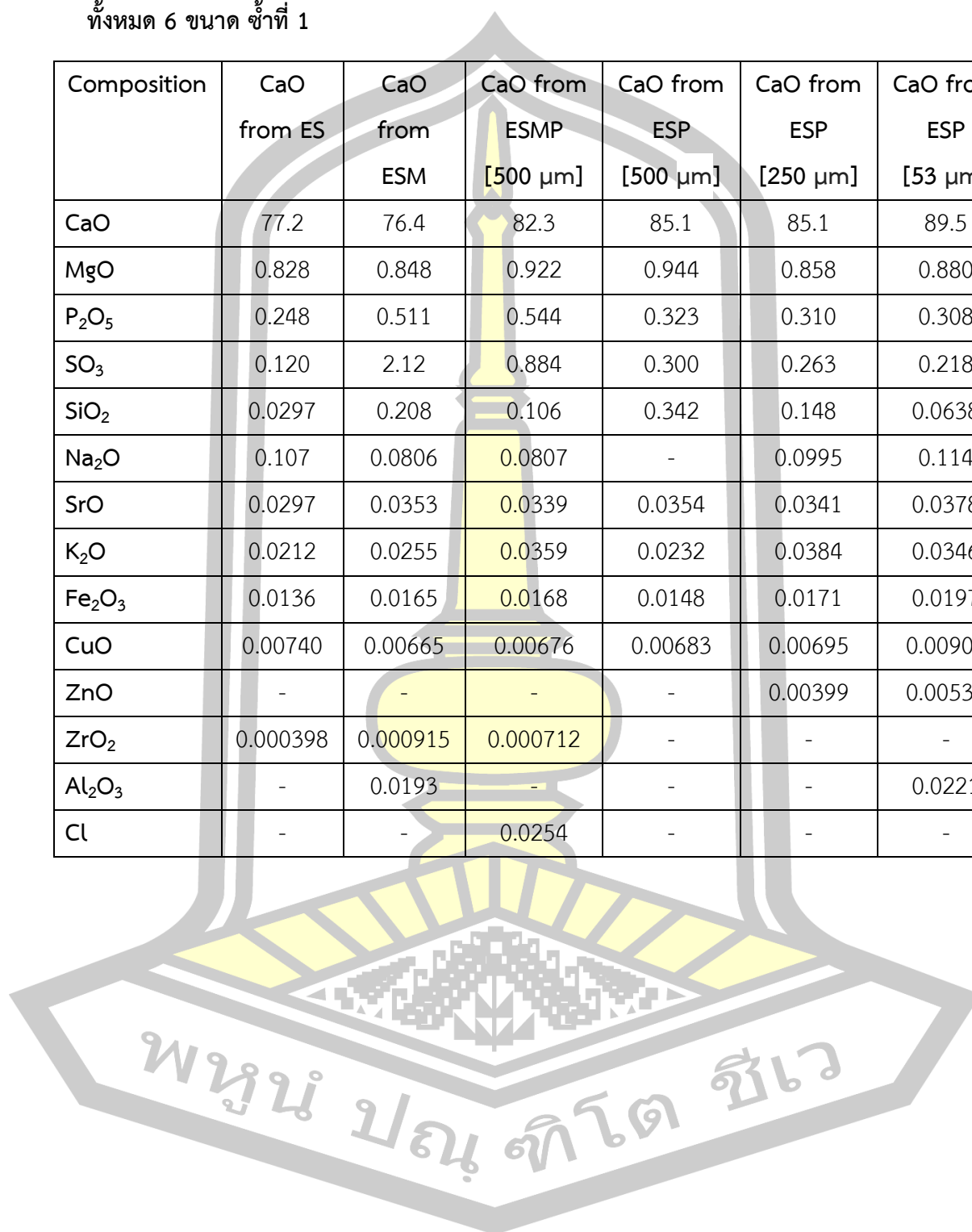
ตารางที่ 56 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ ชั้นที่ 2

Composition	CaO from ES	CaO from ESM	CaO from ESMP [500 μm]	CaO from ESP [500 μm]	CaO from ESP [250 μm]	CaO from ESP [53 μm]
CaO	97.5	94.6	95.9	97.3	97.8	97.8
MgO	1.32	1.48	1.33	1.17	1.06	1.10
P ₂ O ₅	0.473	0.836	0.790	0.422	0.0374	0.349
SO ₃	0.202	2.70	1.40	0.477	0.344	0.265
SiO ₂	0.186	0.162	0.215	0.341	0.0964	0.0571
Na ₂ O	0.124	0.0817	0.151	0.116	0.112	0.140
SrO	0.0480	0.0466	0.0454	0.0407	0.0406	0.0331
K ₂ O	0.0243	0.0116	0.0553	0.0349	0.0373	0.0383
Fe ₂ O ₃	0.0185	0.0205	0.0193	0.0180	0.0188	0.0193
CuO	0.00791	0.00858	0.00779	0.00748	0.0136	0.00690
ZnO	0.00424	0.00180	-	0.00531	0.0133	0.00688
ZrO ₂	0.00171	-	0.00223	-	0.00209	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.0297	-	-
Cl	-	-	0.0404	0.0101	0.0120	0.0113



ตารางที่ 57 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่
ทั้งหมด 6 ขนาด ชั้นที่ 1

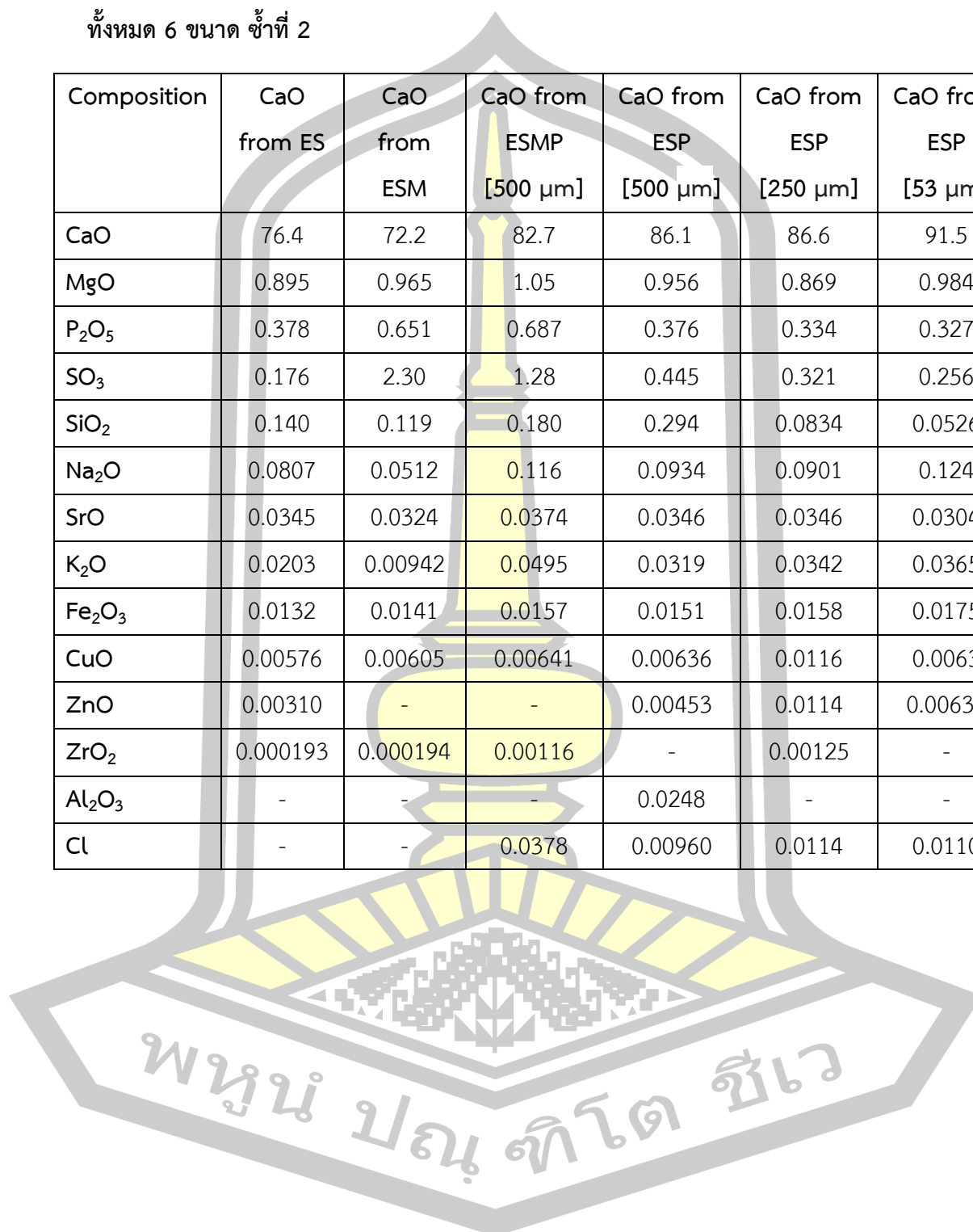
Composition	CaO from ES	CaO from ESM	CaO from ESMP [500 μm]	CaO from ESP [500 μm]	CaO from ESP [250 μm]	CaO from ESP [53 μm]
CaO	77.2	76.4	82.3	85.1	85.1	89.5
MgO	0.828	0.848	0.922	0.944	0.858	0.880
P ₂ O ₅	0.248	0.511	0.544	0.323	0.310	0.308
SO ₃	0.120	2.12	0.884	0.300	0.263	0.218
SiO ₂	0.0297	0.208	0.106	0.342	0.148	0.0638
Na ₂ O	0.107	0.0806	0.0807	-	0.0995	0.114
SrO	0.0297	0.0353	0.0339	0.0354	0.0341	0.0378
K ₂ O	0.0212	0.0255	0.0359	0.0232	0.0384	0.0346
Fe ₂ O ₃	0.0136	0.0165	0.0168	0.0148	0.0171	0.0197
CuO	0.00740	0.00665	0.00676	0.00683	0.00695	0.00909
ZnO	-	-	-	-	0.00399	0.00531
ZrO ₂	0.000398	0.000915	0.000712	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	0.0193	-	-	-	0.0221
Cl	-	-	0.0254	-	-	-



ตารางที่ 58 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่

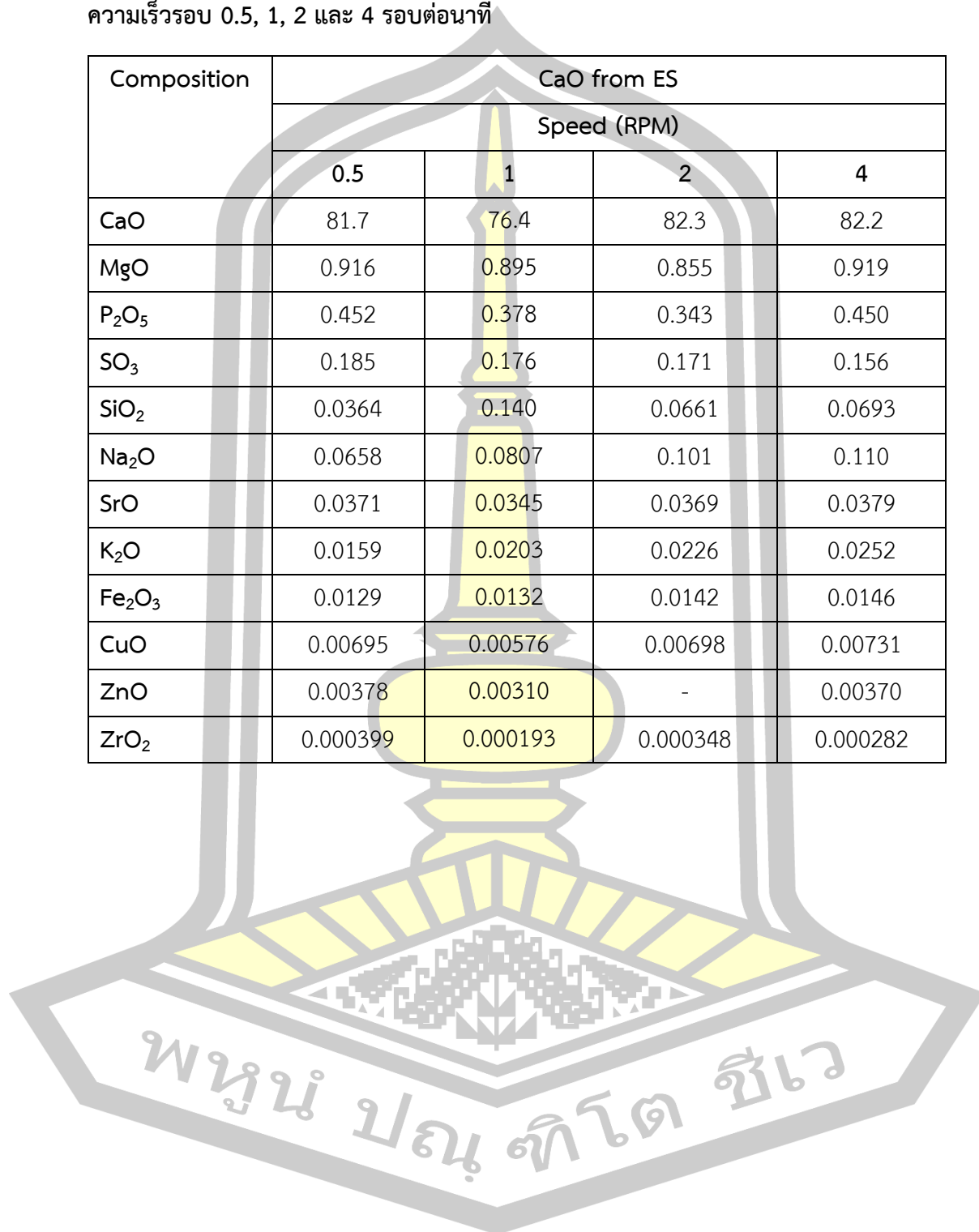
ทั้งหมด 6 ขนาด ซ้ำที่ 2

Composition	CaO from ES	CaO from ESM	CaO from ESMP [500 μm]	CaO from ESP [500 μm]	CaO from ESP [250 μm]	CaO from ESP [53 μm]
CaO	76.4	72.2	82.7	86.1	86.6	91.5
MgO	0.895	0.965	1.05	0.956	0.869	0.984
P ₂ O ₅	0.378	0.651	0.687	0.376	0.334	0.327
SO ₃	0.176	2.30	1.28	0.445	0.321	0.256
SiO ₂	0.140	0.119	0.180	0.294	0.0834	0.0526
Na ₂ O	0.0807	0.0512	0.116	0.0934	0.0901	0.124
SrO	0.0345	0.0324	0.0374	0.0346	0.0346	0.0304
K ₂ O	0.0203	0.00942	0.0495	0.0319	0.0342	0.0365
Fe ₂ O ₃	0.0132	0.0141	0.0157	0.0151	0.0158	0.0175
CuO	0.00576	0.00605	0.00641	0.00636	0.0116	0.0063
ZnO	0.00310	-	-	0.00453	0.0114	0.00631
ZrO ₂	0.000193	0.000194	0.00116	-	0.00125	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	0.0248	-	-
Cl	-	-	0.0378	0.00960	0.0114	0.0110



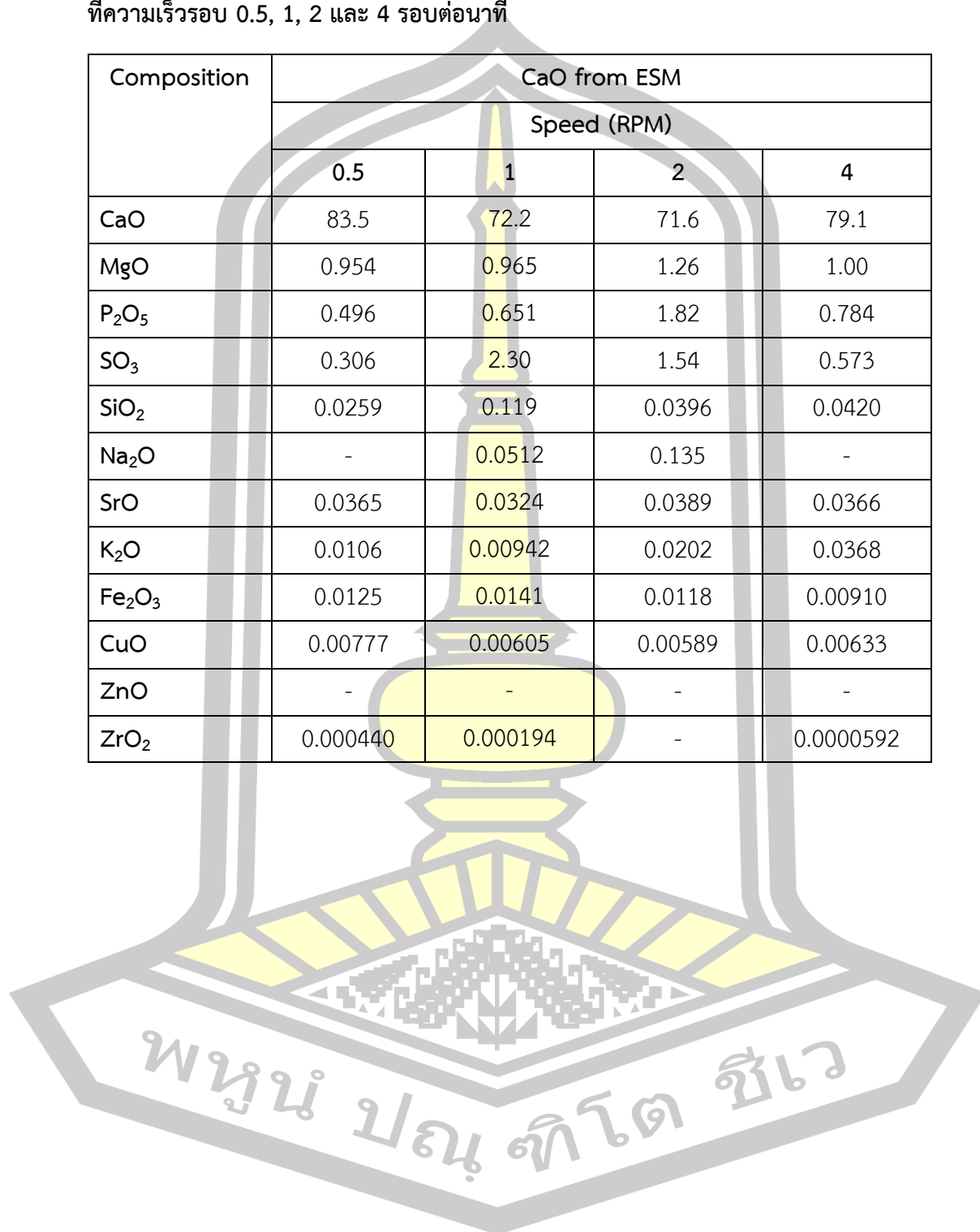
ตารางที่ 59 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่
ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

Composition	CaO from ES			
	Speed (RPM)			
	0.5	1	2	4
CaO	81.7	76.4	82.3	82.2
MgO	0.916	0.895	0.855	0.919
P ₂ O ₅	0.452	0.378	0.343	0.450
SO ₃	0.185	0.176	0.171	0.156
SiO ₂	0.0364	0.140	0.0661	0.0693
Na ₂ O	0.0658	0.0807	0.101	0.110
SrO	0.0371	0.0345	0.0369	0.0379
K ₂ O	0.0159	0.0203	0.0226	0.0252
Fe ₂ O ₃	0.0129	0.0132	0.0142	0.0146
CuO	0.00695	0.00576	0.00698	0.00731
ZnO	0.00378	0.00310	-	0.00370
ZrO ₂	0.000399	0.000193	0.000348	0.000282



ตารางที่ 60 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ที่มีเยื่อ
ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

Composition	CaO from ESM			
	Speed (RPM)			
	0.5	1	2	4
CaO	83.5	72.2	71.6	79.1
MgO	0.954	0.965	1.26	1.00
P ₂ O ₅	0.496	0.651	1.82	0.784
SO ₃	0.306	2.30	1.54	0.573
SiO ₂	0.0259	0.119	0.0396	0.0420
Na ₂ O	-	0.0512	0.135	-
SrO	0.0365	0.0324	0.0389	0.0366
K ₂ O	0.0106	0.00942	0.0202	0.0368
Fe ₂ O ₃	0.0125	0.0141	0.0118	0.00910
CuO	0.00777	0.00605	0.00589	0.00633
ZnO	-	-	-	-
ZrO ₂	0.000440	0.000194	-	0.0000592



ตารางที่ 61 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากผงเปลือกไข่ที่มี
เยื่อขนาด 500 ไมโครเมตรที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

Composition	CaO from ESMP			
	Speed (RPM)			
	0.5	1	2	4
CaO	83.2	82.7	84.0	81.8
MgO	0.976	1.05	1.08	1.07
P ₂ O ₅	0.458	0.687	0.705	0.772
SO ₃	0.597	1.28	1.76	1.38
SiO ₂	0.0828	0.180	0.150	0.116
Na ₂ O	-	0.116	-	0.190
SrO	0.0353	0.0374	0.0397	0.0392
K ₂ O	0.0381	0.0495	0.0642	0.0669
Fe ₂ O ₃	0.0135	0.0157	0.0168	0.0190
CuO	0.00724	0.00641	0.00673	0.00630
ZnO	-	-	-	0.00313
ZrO ₂	0.000368	0.00116	0.000422	0.000560



ตารางที่ 62 องค์ประกอบทางเคมี (LOI) ของแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%

Composition	CaO from ES			CaO from ESM		
	Feed			Feed		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
CaO	76.4	87.4	85.6	72.2	85.6	86.2
MgO	0.895	1.09	1.10	0.965	1.21	1.23
P ₂ O ₅	0.378	0.412	0.474	0.651	0.856	0.855
SO ₃	0.176	0.129	0.145	2.30	0.216	0.306
SiO ₂	0.140	0.100	0.0307	0.119	0.145	0.0603
Na ₂ O	0.0807	0.109	0.116	0.0512	0.121	0.141
SrO	0.0345	0.0384	0.0394	0.0324	0.0382	0.0379
K ₂ O	0.0203	0.0232	0.0292	0.00942	0.0334	0.0419
Fe ₂ O ₃	0.0132	0.0127	0.0128	0.0141	0.0127	0.0123
CuO	0.00576	0.00557	0.00662	0.00605	0.00692	0.00730
ZnO	0.00310	0.00339	0.00151	-	0.00461	0.00417
ZrO ₂	0.000193	0.000766	0.000919	0.000194	0.00138	0.00203

ตารางที่ 63 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ทั้ง 6 ขนาด

Sample	Crystallite Size (nm)	%Crystallinity	%Amorphous
CaO[ES]	53.2±0.8485	89.7%±0.1414	10.3%±0.1414
CaO[ESM]	47.15±3.4648	89.35%±0.4950	10.65%±0.4950
CaO[ESMP-500]	54.1±0.0000	85.5%±0.0000	14.5%±0.0000
CaO[ESP-500]	51.55±0.9192	83.45%±3.6062	16.55%±3.6062
CaO[ESP-250]	48.4±1.2728	87.9%±1.1314	12.1%±1.1314
CaO[ESP-53]	54.45±1.3435	55.55±0.2121	88.45±0.3536

ตารางที่ 64 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 0.5, 1, 2 และ 4 รอบต่อนาที

Sample	Speed (RPM)	Crystallite Size (nm)	%Crystallinity	%Amorphous
CaO[ES]	0.5	51.2	74.2%	25.8%
	1	53.2	89.7%	10.3%
	2	46.9	81.4%	18.6%
	4	45.8	78.0%	22.0%
CaO[ESM]	0.5	46.1	80.8%	19.2%
	1	47.2	89.4%	10.6%
	2	45.8	88.0%	12.0%
	4	50.9	80.2%	19.8%
CaO[ESMP]	0.5	40.5	78.7%	21.3%
	1	54.1	85.5%	14.5%
	2	48.9	80.7%	19.3%
	4	47.3	79.4%	20.6%

ตารางที่ 65 Crystallite Size ของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่และเปลือกไข่ที่มีเยื่อเปลือกไข่ที่อัตราการป้อน 5%, 10% และ 15%

Sample	Feed	Crystallite Size (nm)	%Crystallinity	%Amorphous
CaO[ES]	5%	53.2	89.7%	10.3%
	10%	50.5	86.0%	14.0%
	15%	49.8	84.9%	15.1%
CaO[ESM]	5%	47.2	89.4%	10.6%
	10%	45.4	86.4%	13.6%
	15%	56.3	85.3%	14.7%

ตารางที่ 66 ช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่
ไก่ทั้ง 6 ขนาด ชั้นที่ 1

CaO [ES]	CaO [ESM]	CaO [ESMP 500 Micron]	CaO [ESP 500 Micron]	CaO [ESP 250 Micron]	CaO [ESP 53 Micron]	Industrial grad CaO	Commercial CaO	Assignments
3641	-	3641	3641	-	3641	3641	3641	O-H
1410	1410	1416	1410	1410	1410	1416	1416	-C-H
1050	1045	1045	1050	1050	1050	1022	-	-C-O
876	876	876	876	876	876	876	876	=C-H
719	719	-	-	719	-	713	-	CO ₃ ²⁻

ตารางที่ 67 ช่วงเลขที่คลื่น Infrared (IR) เทียบหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่
ไก่ทั้ง 6 ขนาด ชั้นที่ 2

CaO [ES]	CaO [ESM]	CaO [ESMP 500 Micron]	CaO [ESP 500 Micron]	CaO [ESP 250 Micron]	CaO [ESP 53 Micron]	Industrial grad CaO	Commercial CaO	Assignments
3641	-	3641	3641	-	3641	3641	3641	O-H
1410	1410	1416	1410	1410	1410	1416	1416	-C-H
1050	1045	1045	1050	1050	1050	1022	-	-C-O
876	876	876	876	876	876	876	876	=C-H
719	719	-	-	719	-	713	-	CO ₃ ²⁻



ตารางที่ 68 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของขนาดเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

Samples	ซ้ำที่	Time	
		Heating Zone	ตัวอย่างออกมาจากเตาทั้งหมด
CaO[ES]	1	30 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
	2	35 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
CaO[ESM]	1	45 นาที	2 ชั่วโมง
	2	40 นาที	2 ชั่วโมง
CaO[ESMP 500 Micron]	1	50 นาที	2 ชั่วโมง
	2	50 นาที	2 ชั่วโมง
CaO[ESP 500 Micron]	1	45 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
	2	45 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
CaO[ESP 250 Micron]	1	40 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
	2	40 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
CaO[ESP 53 Micron]	1	60 นาที	3 ชั่วโมง
	2	55 นาที	3 ชั่วโมง

ตารางที่ 69 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของความเร็วรอบในการหมุนที่แตกต่างกัน

Samples	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ซ้ำที่	Time	
			Heating Zone	ตัวอย่างออกมาจากเตาทั้งหมด
CaO[ES]	0.5	1	60 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
		2	60 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
	1	1	30 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
		2	35 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
	2	1	20 นาที	1 ชั่วโมง 10 นาที
		2	20 นาที	1 ชั่วโมง
	4	1	10 นาที	40 นาที
		2	10 นาที	40 นาที
CaO[ESM]	0.5	1	60 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
		2	60 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที

	1	1	45 นาที	2 ชั่วโมง
		2	40 นาที	2 ชั่วโมง
	2	1	20 นาที	1 ชั่วโมง 10 นาที
		2	20 นาที	1 ชั่วโมง
	4	1	10 นาที	40 นาที
		2	10 นาที	40 นาที
CaO[ESMP 500 Micron]	0.5	1	1 ชั่วโมง 10 นาที	2 ชั่วโมง 50 นาที
		2	1 ชั่วโมง 10 นาที	2 ชั่วโมง 50 นาที
	1	1	50 นาที	2 ชั่วโมง
		2	50 นาที	2 ชั่วโมง
	2	1	35 นาที	2 ชั่วโมง
		2	40 นาที	2 ชั่วโมง
	4	1	15 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
		2	20 นาที	1 ชั่วโมง 40 นาที

ตารางที่ 70 เวลาที่ใช้ในการแคลไซน์ของอัตราการบินเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน

Samples	อัตราการบินเปลือกไข่	ซ้ำที่	Time	
			Heating Zone	ตัวอย่างออกมาจากเตาทั้งหมด
CaO[ES]	5%	1	30 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
		2	35 นาที	1 ชั่วโมง 30 นาที
	10%	1	35 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
		2	35 นาที	2 ชั่วโมง 30 นาที
	15%	1	35 นาที	3 ชั่วโมง
		2	35 นาที	3 ชั่วโมง
CaO[ESM]	5%	1	45 นาที	2 ชั่วโมง
		2	40 นาที	2 ชั่วโมง
	10%	1	35 นาที	2 ชั่วโมง 40 นาที
		2	35 นาที	2 ชั่วโมง 40 นาที
	15%	1	35 นาที	3 ชั่วโมง
		2	35 นาที	3 ชั่วโมง

ตารางที่ 71 แสดงการคำนวณรายรับรายจ่ายในการก่อสร้างเตาเผากรณีไม่มีการแยกเชื้อ

รายจ่าย	ปีที่				
	1	2	3	4	5
ค่าก่อสร้าง- งบลงทุน เตาและอาคาร	2,500,000	-	-	-	-
ค่าแรงงาน (2 คนต่อเดือน เดือนละ 25,000 และ 10,000 บาท รวม 35,000 บาทต่อเดือน)	-	420,000	462,000	508,200	559,020
ค่าไฟฟ้า ต่อเดือน 5,000 บาท	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
ค่าบำรุงรักษาร้อยละ10 งบลงทุน		250,000	325,000	347,500	354,250
ค่ากระสอบ+ขนส่งไข่	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
ค่าก๊าซ	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000
รวมรายจ่าย	2,810,000	980,000	1,097,000	1,165,700	1,223,270
รายรับ	ปีที่				
	1	2	3	4	5
ลดค่าใช้จ่ายฝั่งกลบ ต่อปี	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
มูลค่าจากการขาย(คิดวันทำงาน 241 วัน และCaO กิโลกรัมละ 25 บาท)	3,012,500	3,012,500	3,012,500	3,012,500	3,012,500
รวมรายรับ	-	3,312,500	3,312,500	3,312,500	3,312,500
รับจ่ายสุทธิ	-2,810,000	2,332,500	2,215,500	2,146,800	2,089,230



ตารางที่ 72 แสดงการคำนวณรายรับรายจ่ายในการก่อสร้างเตาเผากรณีมีการแยกเชื้อ

รายจ่าย	ปีที่				
	1	2	3	4	5
ค่าก่อสร้าง- งบลงทุน เตาและอาคาร และถึงปฏิบัติการสำหรับแยกเชื้อเปลือกไข่	2,520,000	-	-	-	-
ค่าแรงงาน (2 คนต่อเดือน เดือนละ 25,000 และ 10,000 บาท รวม 35,000 บาทต่อเดือน)	-	420,000	462,000	508,200	559,020
ค่าไฟฟ้า ต่อเดือน 5,000 บาท	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
ค่าบำรุงรักษาร้อยละ10 งบลงทุน		252,000	327,600	350,280	357,084
ค่ากระสอบ+ขนส่งไข่	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
ค่าก๊าซ	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000
ค่าสารเคมี	22,000	22,000	22,000	22,000	22,000
ค่าน้ำประปา	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
รวมรายจ่าย	2,860,000	1,012,000	1,129,600	1,198,480	1,256,104
รายรับ	ปีที่				
	1	2	3	4	5
ลดค่าใช้จ่ายฝั่งกลบ ต่อปี	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
มูลค่าจากการขาย(คิดวันทำงาน 241 วัน และCaO กิโลกรัมละ 50 บาท)	6,025,000	6,025,000	6,025,000	6,025,000	6,025,000
รวมรายรับ	-	6,325,000	6,325,000	6,325,000	6,325,000
รับจ่ายสุทธิ	-2,860,000	5,313,000	5,195,400	5,126,520	5,068,896

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุนันท์ เจือคำ
วันเกิด	วันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด	อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 128/1 หมู่ 12 ตำบลโคกสะอาด อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36110
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนภูเขียว อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2560 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ) สาขาวิชาเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม พ.ศ. 2563 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม) สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม
ทุนวิจัย	ปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท

พูนันท์ ปณฺ ทิโต ชีเว