

การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจากดินขาวตามธรรมชาติ  
ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

SYNTHESIS OF ZEOLITE Y FROM NATURAL KAOLIN VIA HYDROTHERMAL  
METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF ZEOLITE Y FROM NATURAL KAOLIN VIA  
HYDROTHERMAL METHOD



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ




หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาวตามธรรมชาติด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

Special Project Title Synthesis of zeolite Y from natural kaolin via hydrothermal method

นักศึกษา นาย กอบชัย อ้นเพชร  
นาย ธนภัทร วงษ์กิตติคุณ

รหัสประจำตัว 58110003  
58110023

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2561  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง	
ผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรักษ์	
ผศ.ดร. อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)  
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวตามธรรมชาติด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล
นักศึกษา	นาย กอบชัย อ้นเพชร นาย ธนภัทร วงษ์กิติคุณ
รหัสประจำตัว	58110003 58110023
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อภิลักษณ์ เขียดเอื้อ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวตามธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล 2 ครั้ง โดยที่ปราศจากการเผา ซึ่งไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของดินขาว และ มาทำการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง เพื่อเป็นการฟอร์มซีโอไลต์ ซึ่งได้ทำการศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ มีดังนี้ ศึกษาแหล่งของซิลิกาที่มีการใส่เพิ่มเติมมา เนื่องจากซีโอไลต์วายเป็นจำเป็นต้องมีปริมาณซิลิกาที่สูง โดยจะใส่แหล่งซิลิกาที่แตกต่างกัน (โซเดียมซิลิเกต, เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต, ซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว) และยังคงศึกษาปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกันออกไป และ ดินขาวที่นำมาสังเคราะห์โดยจะใช้ดินขาว จ.ลำปาง มาสังเคราะห์ และยังคงศึกษาดินขาวจากจังหวัดอื่น ๆ เพิ่มเติมซึ่งมี จ.นราธิวาส, จ.ปราจีนบุรี, จ.ราชบุรี และ จ.อุดรดิตถ์ โดยจะนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์นำไปตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(SEM), เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD), เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ เครื่อง Raman Spectroscopy ตามลำดับ เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาว จะผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 2 ครั้ง กับ แหล่งของซิลิกาในปริมาณ 1.0 กรัม และ สารละลายเบส หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8 ชั่วโมง และ ไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 48 ชั่วโมง

คำสำคัญ: ซีโอไลต์, ดินขาว, ไฮโดรเทอร์มอล, แหล่งของซิลิกา

Special Project Title	Synthesis of zeolite Y from natural kaolin via hydrothermal method
Student	Kobchai Onpecht Thanapat Wongkitikun
Student ID	58110003 58110023
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-Ua
Special Project Co-Advisor	Prof. Dr. Suttichai Assabumrungrat

## ABSTRACT

Synthesis of zeolite Y from natural kaolin via hydrothermal method without calcination process: the first hydrothermal is to transform structure of kaolin or alkaline activation process and the second hydrothermal is to form zeolite. This project aims to study an effect of the synthesis of zeolite Y from different sources of silicon (Tetraethyl orthosilicate (TEOS), Sodium silicate and silica from rice husk) since zeolite Y may require a high  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio, effect of weight of silicon and different sources of kaolin (Lampang, Narathiwat, Prachinburi, Ratchaburi and Uttaradit). The products were characterized by Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy, respectively. Optimum condition for synthesis of zeolite Y were obtained from 2 times of hydrothermal method with 1 g of silica source and NaOH solution (first hydrothermal at 200°C for 8 h and second hydrothermal at 90°C for 48 h).

**KEYWORD:** Zeolite, Kaolin, Hydrothermal, Sources of silicon

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และคอยช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ สำเร็จอย่างสมบูรณ์และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ผู้วิจัยรู้สึก ซาบซึ้งจึงอยากขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และ ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้ความรู้ตลอดทั้ง 4 ปี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และ เพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และ เป็นที่ปรึกษาตลอดงานวิจัย และ ตลอดการเรียนการศึกษ สำหรับประโยชน์ จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ทุกท่านด้วยความเคารพอย่างยิ่ง หากผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

กอบชัย อันเพชร  
ธนาภัทร วงษ์กิติคุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 สมมุติฐานงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ดิน.....	5
2.2 ดินขาว.....	6
2.2.1 สมบัติต่าง ๆ ของแร่ดินขาว.....	7
2.2.2 ประเภทของดินขาว.....	8
2.2.3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับดินขาว.....	9
2.2.4 แหล่งดินขาวในประเทศไทย.....	10
2.2.5 การประยุกต์ดินขาว.....	12
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	14
2.3.1 การจำแนกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	14
2.3.2 กลไกของปฏิกิริยา.....	16
2.3.3 ลักษณะการเร่งปฏิกิริยา.....	16
2.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยา.....	18
2.3.5 การประยุกต์การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
2.3.6 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.4 ซีโอไลต์.....	25
2.4.1 ชนิดของซีโอไลต์.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ประเภทของซีโอไลต์ตามหน่วยโครงสร้าง.....	26
2.4.3 สมบัติของซีโอไลต์.....	28
2.4.4 วิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	29
2.4.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	31
2.4.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ต่างๆ.....	33
2.4.7 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์.....	36
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.6 เทคนิคในการตรวจวัด.....	41
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	41
2.6.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	42
2.6.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR).....	43
2.6.4 เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	44
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	46
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	46
3.1.1 ดินขาวและการคัดกรองขนาด.....	46
3.1.2 เปลือกข้าว.....	47
3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH).....	47
3.1.4 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl).....	48
3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution).....	49
3.1.6 สารละลายเตตระเอทิลออร์ทอซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate solution).....	49
3.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากดินขาวด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	50
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	50
3.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาว จ.ลำปาง.....	57
3.2.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายโดยการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต .....	57

## สารบัญ (ต่อ)

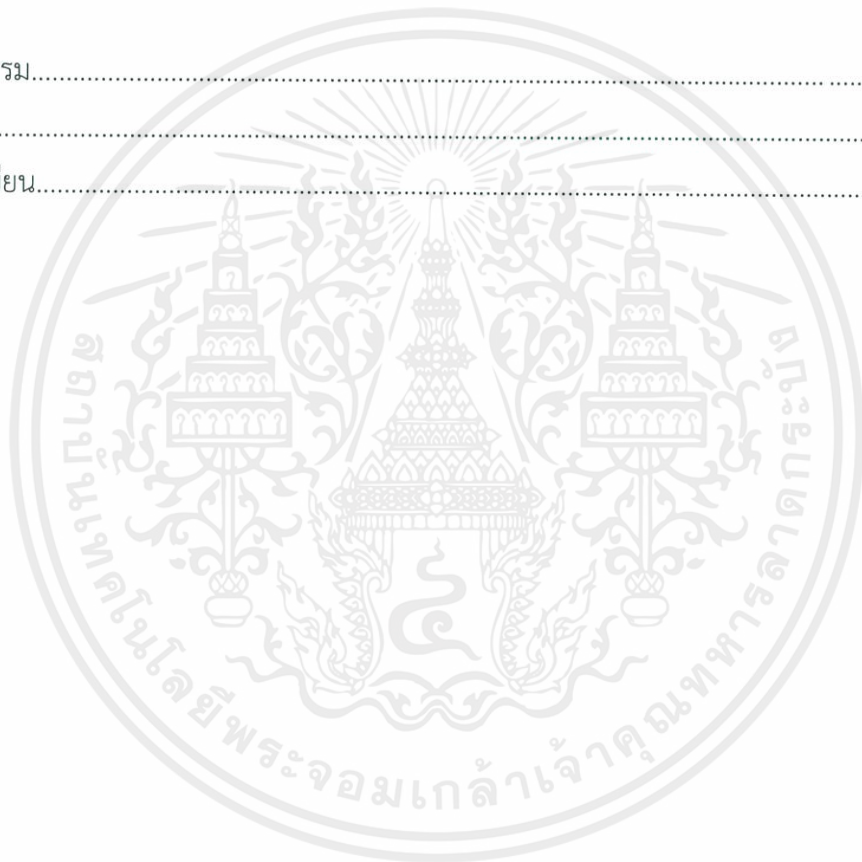
หน้า

3.2.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายโดยการเติมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต.....	58
3.2.2.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายโดยการเติมซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าว.....	58
3.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว.....	59
3.2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวแหล่งอื่นๆ.....	60
3.2.4.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวแหล่งอื่นๆโดยการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	60
3.2.2.5 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวแหล่งอื่นๆโดยการเติมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต.....	61
3.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ.....	62
3.3.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	62
3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR).....	62
3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกผ่านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	63
3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามาน สเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	64
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	65
4.1 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง.....	65
4.2 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง.....	68
4.3 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง.....	72
4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว.....	76
4.5 การศึกษาผลของดินขาวในพื้นที่อื่นๆที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวโดยมีการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate.....	77

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 การศึกษาผลของดินขาวในพื้นที่อื่นๆที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอโลต์วาย จากดินขาวโดยมีการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate (TEOS).....	80
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	95



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์.....	15
2.2 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดของรูพรุน (Guisnet and Gilson, 2002).....	25
2.3 อัตราส่วน Si/Al ของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ.....	32
4.1 % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่าง ๆ.....	67
4.2 % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่าง ๆ.....	71
4.3 % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติมซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณต่าง ๆ.....	75
4.4 % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม.....	80
4.5 % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม.....	83

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ดินขาว.....	6
2.2 โครงสร้างของแร่คาโอลิไนต์ของชั้นซิลิกา (ซ้าย), ชั้นกิบไซต์ (ขวา).....	6
2.3 แสดงโครงสร้างของแร่ kaolinite ที่มีการจัดเรียงตัวซ้อนกันของชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์.....	7
2.4 กระบวนการดีลามีเนชัน (delamination).....	9
2.5 แผนที่แสดงถึงที่ตั้งแหล่งดินขาวภายในประเทศไทย.....	10
2.6 การดำเนินไปของการเกิดปฏิกิริยา.....	14
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์-เอกพันธุ์ (Hydrogenized homogeneous catalyst).....	16
2.8 การเร่งปฏิกิริยาโดยตรง.....	17
2.9 การเร่งปฏิกิริยาโดยทางอ้อม.....	18
2.10 การเปลี่ยนโครงสร้างของซิลิกา และ อะลูมินา ทำให้สมบัติเป็นกรดบรอนสเตด และ ลิวอิส.....	21
2.11 การทำปฏิกิริยาของตำแหน่งกรดบรอนสเตด.....	21
2.12 การทำปฏิกิริยาของตำแหน่งกรดลิวอิส.....	21
2.13 โครงสร้างความเป็นกรดของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (ซีโอไลต์) a) กรดลิวอิส b) กรดบรอนสเตด.....	23
2.14 โครงสร้างปฐมภูมิของ ซิลิกา (ซ้าย) และ อะลูมินา (ขวา).....	27
2.15 โครงสร้างทุติยภูมิ.....	27
2.16 โครงสร้างตติยภูมิ.....	28
2.17 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบ LTA (Zeolite A).....	34
2.18 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบฟูจาไซต์ (Zeolite X).....	34
2.19 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบฟูจาไซต์ (Zeolite Y).....	35
2.20 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	42
2.22 องค์ประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	43
2.23 การสั่นของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ.....	44
2.24 หลักการของ Raman Spectroscopy.....	45
2.25 การเกิด scattering แบบต่างๆ.....	45
2.26 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนพลังงานระดับพลังงานของ electron.....	45
3.1 ขั้นตอนในการแยกขนาดดินขาวและดินขาวที่แยกได้.....	47
3.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	48
3.3 กรดไฮโดรคลอริก.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	49
3.5 สารละลายเตตระเอทิลอโทซิลิเกต.....	50
3.6 a) ออโต้เคลปขนาด 100 ml b) ออโต้เคลปขนาด 500 ml.....	50
3.7 a) เทฟลอนไลน์ขนาด 100 ml b) เทฟลอนไลน์ขนาด 500 ml.....	50
3.8 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Oven).....	51
3.9 ชุดเมมเบรนกรองสารระบบสุญญากาศ.....	51
3.10 เยื่อกรองไนลอน.....	52
3.11 เครื่องเขย่าคัตแยกอนุภาคด้วยตะแกรง.....	52
3.12 บั้มสุญญากาศ.....	52
3.13 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ววาย โดยใช้แหล่งซิลิกาที่แตกต่างกัน.....	54
3.14 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ววาย โดยใช้ดินขาวที่แตกต่างกัน.....	55
3.15 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกาที่ได้จากเปลือกข้าว.....	56
3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	62
3.17 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	63
3.18 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกผ่านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	64
3.19 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี.....	64
4.1 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ.....	65
4.2 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, H=Hydrosodalite).....	66
4.3 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring).....	67
4.4 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ.....	69
4.5 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite).....	70
4.6 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring).....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ.....	72
4.8 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, H=Hydrosodalite).....	73
4.9 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring).....	74
4.10 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	76
4.11 กราฟ Raman Spectroscopy ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	76
4.12 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม.....	77
4.13 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite).....	78
4.14 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (DR=Double ring).....	79
4.15 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม.....	81
4.16 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite).....	82
4.17 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (DR=Double ring).....	82

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ดินขาว (Kaolin) เป็นองค์ประกอบของแร่คาโอลิไนต์ (Kaolinite) ในกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมีโครงสร้างมีการจับกันของแผ่นซิลิกาในรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และ แผ่นอะลูมินาในรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างไตรคลินิค (Triclinic) โดยลักษณะของดินขาวมักพบในรูปผลึกสี่ขา [1] นอกจากนี้ยังอาจพบในสีอื่น ๆ เช่น สีส้ม และแดง ซึ่งเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของโลหะอื่น ๆ ดินขาวโดยทั่วไปประกอบด้วยซิลิกา 46% อะลูมินา 43% และธาตุเจือปนอื่น ๆ ซึ่งขึ้นกับพื้นที่ที่พบดินขาวนั้น ๆ โดยในประเทศไทยพบดินขาวได้ในหลายบริเวณของประเทศ เช่น จังหวัดลำปาง, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดเชียงใหม่, จังหวัดระยอง, จังหวัดระนอง, จังหวัดสุราษฎร์ธานี, จังหวัดนราธิวาส, จังหวัดราชบุรี และอุตรดิตถ์ เป็นต้น [2] ซึ่งดินขาวก็สามารถนำมาใช้ประยุกต์ได้ในอุตสาหกรรมอีกหลากหลายด้าน เช่น ใช้ผสมในเซรามิกเพื่อที่จะเพิ่มความแข็งแรง, เพิ่มความขาวในอุตสาหกรรมกระดาษ, ใช้ในอุตสาหกรรมสี, อุตสาหกรรมยาง, ใช้ในอุตสาหกรรมปุ๋ยและยาฆ่าแมลง รวมไปถึงยังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น

เนื่องจากดินขาวมีองค์ประกอบของอะลูมิโนซิลิเกตในปริมาณสูง จึงเหมาะต่อการเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งเพื่อใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา โดยงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วาย (Zeolite Y) เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรม โดยที่ซีโอไลต์วาย (Zeolite Y) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งประกอบด้วย  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  ที่มีโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) และ (Octahedral) ตามลำดับทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกแข็งที่มีรูพรุนเชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งนอกจากซีโอไลต์วาย (Zeolite Y) แล้วยังมีซีโอไลต์ชนิดอื่น ๆ ที่มีรูปร่างและสมบัติต่างกัน เช่น ซีโอไลต์เอ็กซ์ (Zeolite X), ซีโอไลต์เอ (Zeolite A), ZSM-5 เป็นต้น โดยองค์ประกอบหลักที่ทำให้ซีโอไลต์มีรูปร่างและสมบัติที่แตกต่างกัน คือ อัตราส่วนของ Si/Al ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Si/Al ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะมีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา, ความเป็นกรด และ ชนิดของซีโอไลต์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ โดยโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นโพรงต่อเนื่อง และ มีความเป็นกรด จึงนิยมในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3, 4] เช่น สามารถใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพได้ ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวแตกสลายโดยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ซึ่งเป็นการแตกโมเลกุล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการทำให้องค์ประกอบที่มีออกซิเจนอยู่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีเลขออกเทนที่สูง ซึ่งก็คือกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จากไขมันสัตว์หรือพืช โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันและเมทานอลเนื่องจากไขมันสัตว์และพืชมีความหนืดสูงและ อัตราการเผาไหม้ที่ต่ำจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในการเพิ่มค่าออกเทนให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถให้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้ และ ข้อดีของซีโอไลต์ช่วยในการทำงานก็คือสามารถใช้งานได้ง่ายเนื่องจาก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็งจะมีสถานะที่แตกต่างจากน้ำมันชีวภาพที่เป็นของเหลว แล้วจะส่งผลให้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำมันชีวภาพได้ง่าย และยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยานำมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตลงไปได้

ซึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้น มีหลากหลายวิธีที่ใช้กันในอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นวิธีของการใช้แม่แบบมาใส่ในกระบวนการสังเคราะห์ จะส่งผลให้ซีโอไลต์ที่ทำการสังเคราะห์มีขนาดโครงสร้างรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ แต่จะเกิดปัญหาในขั้นตอนที่ทำการแยกแม่แบบออกจากซีโอไลต์ ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เกิดการบิดเบี้ยวและทำให้ความเป็นผลึกต่ำลง [4] โดยวิธีที่ได้รับความนิยมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในอุตสาหกรรม ก็คือ วิธีการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งจะแบ่งได้อีก 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกนั้นจะเป็น กระบวนการเผา (Calcination) โดยจะเป็นการนำดินขาวมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อที่จะเป็นการทำลายโครงสร้างของดินขาวและนำมาไฮโดรเทอร์มอลเพื่อเป็นการฟอร์มเป็นซีโอไลต์ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่จะมีข้อเสียที่ว่า เมื่อผ่านกระบวนการเผาดินขาวที่ได้ยังพบสิ่งเจือปนที่ยังหลงเหลือในดินขาว ทำให้ซีโอไลต์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ มีความบริสุทธิ์ที่ต่ำลง อีกทั้งใช้พลังงานในการเผาไหม้สูง ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ [5, 6, 7] และ อีกวิธีจะเป็นกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแบบใหม่ก็คือทำการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกในสารละลายเบส เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของดินขาว หรือเรียกว่า กระบวนการ Alkaline activation แล้วทำการชะด้วยกรด เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในดินขาวออก แล้วนำไปไฮโดรเทอร์มอลอีกครั้งเพื่อที่จะฟอร์มเป็นซีโอไลต์ ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อดีที่ว่า ใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่ต่ำ ไม่เป็นมลพิษทางอากาศและง่ายต่อการควบคุมสารละลาย [4, 8] ซึ่งวิธีการไฮโดรเทอร์มอล 2 ครั้ง เป็นวิธีใหม่ที่ได้รับการสนใจในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทางด้านอุตสาหกรรม

จากที่กล่าวในข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้ดินขาวเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ช่วยเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุดิบที่มีราคาถูกและสามารถพบได้ปริมาณมากในประเทศไทย ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ช่วยจากดินขาว และนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น ในกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพโดยทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และ ใช้ในกระบวนการแครกกิง (Cracking) ในกระบวนการปิโตรเลียม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวในจังหวัดลำปาง และ จังหวัดอื่นๆ ในประเทศไทย โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการปรับปริมาณซิลิกาในกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นโดยการเติม Sodium silicate, Tetraethyl orthosilicate และ ซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาเปลือกข้าว ในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว

## 1.3 สมมติฐานงานวิจัย

การเปลี่ยนแปลงของซิลิกาในกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาว ในจังหวัดลำปางโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะส่งผลต่อซีโอไลต์วายเป็นที่สังเคราะห์ได้โดยปริมาณซิลิกาที่มากขึ้นจะทำให้การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นได้ดีขึ้น และ ชนิดของซิลิกาที่ทำการเติมในกระบวนการสังเคราะห์จะให้ผลการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน และ ความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นจังหวัดอื่นๆในประเทศไทย

## 1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้จำกัดขอบเขตของงานในส่วนการวิจัยพัฒนาการทดลอง เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวในจังหวัดลำปางโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล โดยการปรับปริมาณของซิลิกาที่ทำการเติมในกระบวนการสังเคราะห์ในปริมาณ 0.2 ถึง 1.4 กรัม ซึ่งใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 2 ครั้งด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ในการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก และความเข้มข้น 1 โมลาร์ในการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง โดยใช้อุณหภูมิในการไฮโดรเทอร์มอล 200°C และ 90°C ตามลำดับ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวจากจังหวัดลำปางได้
- 1.5.2 สามารถปรับปริมาณซิลิกาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นและพบปริมาณที่เหมาะสม
- 1.5.3 ทำการเพิ่มมูลค่าให้แก่ดินขาว ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและมีปริมาณมากในประเทศไทย และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 ดิน (Clay)

ดินเป็นวัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะที่เป็นเนื้อละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 2  $\mu\text{m}$  ซึ่งดินในแต่ละแหล่งจะมีโครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในดินจะประกอบไปด้วย

1. แร่ดิน เป็นกลุ่มแร่ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicates) ที่มีพื้นฐานการรวมตัวของโครงสร้างซิลิกา (Tetrahedron) และ อะลูมินา (Octahedron) จะแบ่งแร่ดินออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มแร่คาโอลิไนต์ (Kaolinite)

เป็นแร่ดินที่พบมากที่สุด ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ เรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เบียดอัดกันแน่น เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง แร่อื่นไม่สามารถเข้าไปแทรกในโครงสร้างของผลึกได้ ดังนั้น แร่คาโอลิไนต์จึงมีความบริสุทธิ์มาก เช่น ดินขาว ระบายน้ำ

2. กลุ่มฮอลลอยไซต์ (Halloysite)

มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากแร่คาโอลิไนต์ โดยผลึกที่เป็นแผ่นจะเกิดการม้วนตัวเป็นหลอด หรือ กลายเป็นรูปร่าง ทำให้โครงสร้างเกิดการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นดินที่มีความเหนียว และมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าคาโอลิไนต์

3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite)

มีโครงสร้างต่างกับคาโอลิไนต์โดยสิ้นเชิง โครงสร้างไม่ได้เรียงตัวซ้อนกันด้วยแร่ชนิดเดียวกัน แต่มีผลึกของแร่อื่นเข้ามาแทรกระหว่างผลึกได้ ซึ่งมีความเป็นผลึกที่หยابกว่าแร่เซอร์ไซท์ เป็นแร่ดินขาวที่มีโมกกาสูงจึงมีจุดหลอมละลายต่ำกว่า ดินขาวบริสุทธิ์

4. กลุ่มมอนท์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

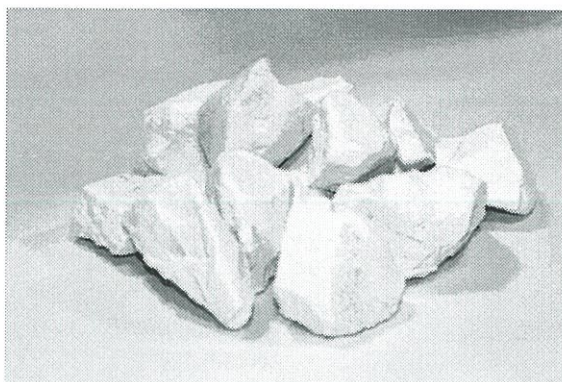
มีโครงสร้างผลึกที่ไม่แน่นอน เม็ดของผลึกมีความละเอียดมาก โครงสร้างของผลึกจึงมีการรวมตัวกันอย่างหลวม ๆ โดยจะมีปริมาณของแร่ธาตุอื่น ๆ เข้ามาในดินอยู่มาก ทำให้ดินไม่มีความบริสุทธิ์แต่มีความเหนียวสูง เช่น ดินเบนโตไนต์

2. สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น แร่ฟอสฟอรัส, คิวตซ์, ซีโอไลต์, แคลไซต์

3. น้ำที่อยู่ภายในดิน

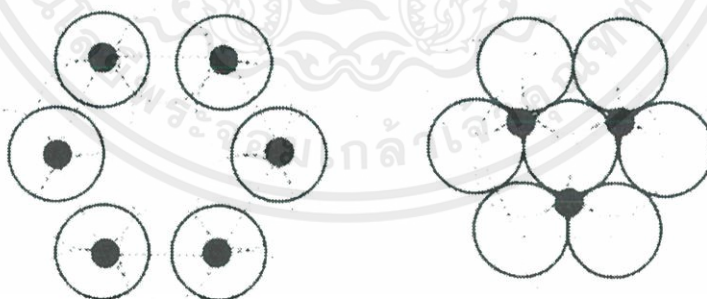
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ดินขาว (Kaolin)



รูปที่ 2.1 ดินขาว [9]

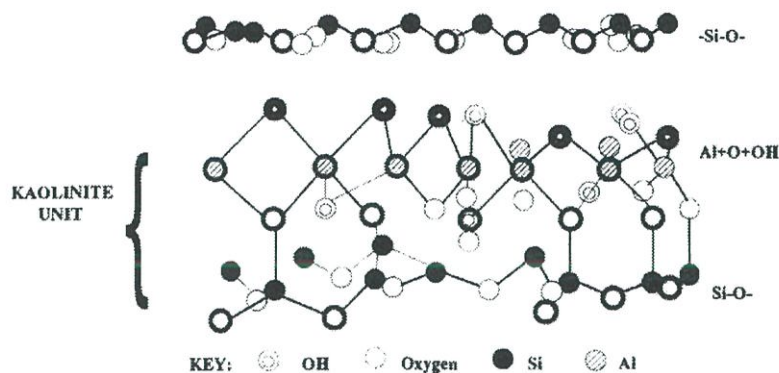
ซึ่งดินขาวจากรูปที่ 2.1 เป็นดินที่ประกอบไปด้วยแร่คาโอลิไนต์ (Kaolinite) เป็นชื่อที่ได้มาจากภาษาจีนที่เรียกว่าเคาลิง (Kauling) คือสันเขาสูง ซึ่งดินขาวมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความเหนียวต่ำ ทนอุณหภูมิได้สูงมีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  46.5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  39.5% และ  $\text{H}_2\text{O}$  13.96% ซึ่งโครงสร้างจะประกอบไปด้วยแผ่นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) แบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) จับยึดกับแผ่นอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) วางซ้อนทับกัน เป็นโครงสร้างแบบ Triclinic จะมีลักษณะเป็นผลึกซูดเฮกซะโกนอล (Pseudo-hexagonal) การจัดเรียงตัวของอะตอมในแร่คาโอลิไนต์ชั้นของซิลิกา จะเห็นได้จากภาพที่ 2.2 (ซ้าย) อะตอมของ Si กับ O เชื่อมกันเพื่อที่จะฟอร์มเป็นวงหกเหลี่ยม ซึ่งเหมือนกับแร่คริสโตบาไลต์และแร่ไตรดาไมต์ และรูปที่ 2.2 ขวา แสดงภาพของอะตอม Al ที่ทำการ coordinate กับ O หรือ OH ในชั้นกิบไซต์ [1]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแร่คาโอลิไนต์ของชั้นซิลิกา (ซ้าย), ชั้นกิบไซต์ (ขวา) [1]

ซึ่งถ้าชั้นของซิลิกาซ้อนทับกับชั้นของกิบไซต์จะทำให้เกิดชั้นของสารประกอบโดยมีอะตอมออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมระหว่าง 2 ชั้น จะเห็นได้จากภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแร่ kaolinite ที่มีการจัดเรียงตัวซ้อนกันของชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์ [1]

## 2.2.1 สมบัติต่าง ๆ ของแร่ดินขาว

### สมบัติทางกายภาพ

#### - ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคจะส่งต่อความเหนียวของดินและการหดตัวเมื่อแห้งของดิน ซึ่งดินเม็ดละเอียดจะมีความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าดินเม็ดหยาบ

#### - รูปร่างของอนุภาค

เป็นแผ่นหกเหลี่ยมทั่วไป มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 0.05 - 10 ไมครอน เฉลี่ยขนาดอยู่ที่ 0.5 ไมครอน

#### - ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล

ซึ่งในดินขาว kaolinite มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนน้อยมาก เพราะมีการแทนที่ของพวกอนุมูลบวกในโครงสร้างน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูงจะไม่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล สามารถแลกเปลี่ยนได้ เมื่อผลึกไม่มีความบริสุทธิ์

#### - คุณสมบัติเมื่อแห้ง

ดินขาวเม็ดละเอียดจะมีความหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าดินเม็ดหยาบ

#### - ความแข็งก่อนเผา

จะมีความสำคัญสำหรับการนำดินขาวไปใช้งาน เพราะว่าดินขาวนั้นเป็นตัวช่วยให้มีความแข็งแรง

#### - คุณสมบัติหลังการเผา

ดินขาวจะมีการหดตัวสูงหลังจากการเผา หดตัวประมาณ 20 % ดินขาวที่ผ่านการเผาควรจะมีลักษณะเป็นสีขาว ถ้าเป็นสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีสิ่งเจือปนอยู่สูง

[10, 11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สมบัติทางเคมี

ดินขาวจะมีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผา ดังนี้



### 2.2.2 ประเภทของดินขาว

ดินขาวจะเกิดขึ้นได้จากการผุพังของหิน ที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น แร่ฟันม้า หรือ แร่ feldspar ซึ่งแร่ในหินเดิมจะได้รับปฏิกิริยาทางเคมีของน้ำ ออกซิเจน คาร์บอน ไดออกไซด์ จะส่งผลให้เกิดการแตกสลายของแร่เดิม หรือ มีการรวมตัวจนเกิดแร่ใหม่ ซึ่งจะแบ่งประเภทได้ 2 ประเภท คือ

#### 1. ดินขาวปฐมภูมิ

หรือ ดินขาวแหล่งต้นกำเนิด (Residual deposits) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากภูเขาที่มีแร่ฟันม้า (Feldspar) ที่เกิดการแปรสภาพและผุพังของแร่และหิน ซึ่งเนื่องมาจากการชะล้างทางเคมี ด้วยน้ำฝน หรือ น้ำบาดาล แล้วส่งผลให้เกิดการทับถมอยู่กับที่ และไม่ถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิม ซึ่งดินประเภทนี้จะมี เหล็กออกไซด์น้อยกว่าดินทุติยภูมิ โดยจะมีกระบวนการในการเกิดดินขาว (Kaolinization) ดังนี้



โดยที่  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  คือ แร่ฟันม้า และ  $(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  คือ แร่ kaolinite

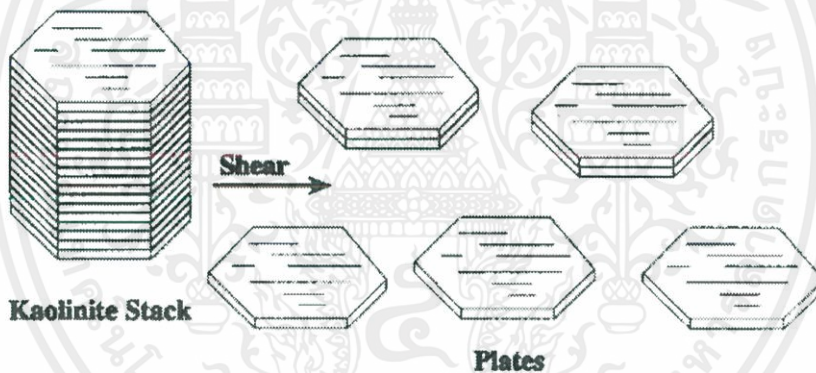
## 2. ดินขาวทุติยภูมิ

หรือ แหล่งสะสมที่ลุ่ม (Sedimentary deposits) เป็นดินขาวที่เกิดจากการสะสมตามธรรมชาติของดินขาวปฐมภูมิที่ถูกกัดเซาะ ผุพัง และ ถูกพัดพาด้วยลม, น้ำ ทำให้เกิดเศษฝุ่น, เศษหินมาทับถมกัน ซึ่งดินขาวทุติยภูมิจะความบริสุทธิ์กว่าดินขาวปฐมภูมิ [12]

### 2.2.3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับดินขาว

#### กระบวนการตีลามิเนชัน (Delamination)

ซึ่งในดินขาวจะมีแร่คาโอลิไนต์เป็นส่วนใหญ่ จะมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมวางซ้อนๆกัน ซึ่งแต่ละแผ่นยึดเกาะกันโดยแรงเชื่อมแน่น (Cohesive forces) ซึ่งถ้าแผ่น ๆ ยึดกันมากจะทำให้ดินขาวมีลักษณะหยาบ ซึ่งในกระบวนการนี้จะเป็นการทำให้แผ่นที่ยึดกันหลุดออกมาเป็นแผ่นเดี่ยว ๆ โดยจะให้แรงเฉือนกับดินขาว ซึ่งจะทำให้ได้นาดินขาวที่เป็นของเหลวลงหม้อบด แล้วทำการบดทำให้เกิดแรงเฉือนกับผลึกดินขาว ซึ่งในกระบวนการนี้จะส่งผลให้ดินขาวมีความขาวมากขึ้น จึงมีความเหมาะสมในการเคลือบลงบนกระดาษ



รูปที่ 2.4 กระบวนการตีลามิเนชัน (delamination) [1]

#### กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination)

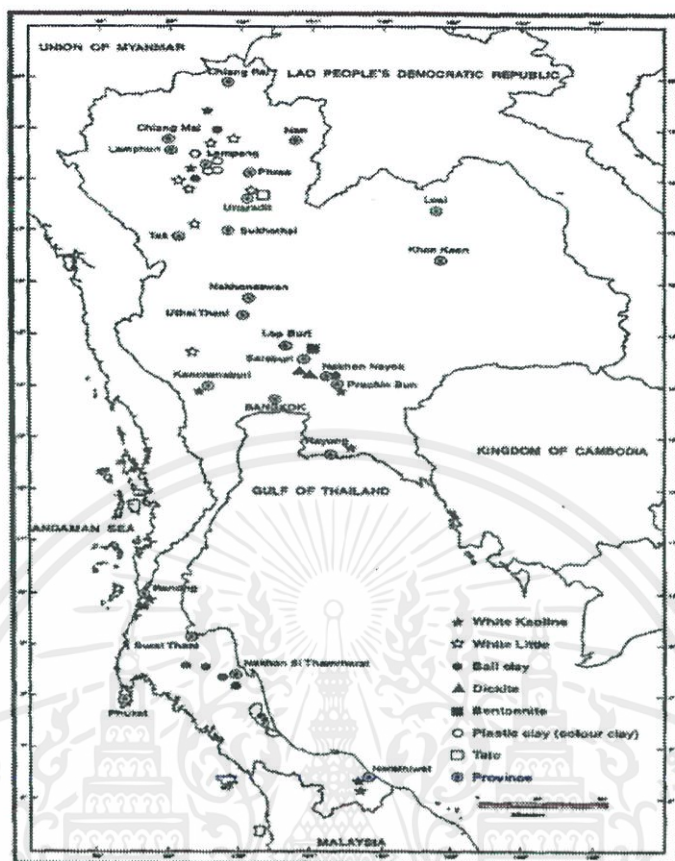
หรือ วิธีการเผา ถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้กันมากในการปรับปรุงสมบัติของดินขาว โดยอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 650 – 700 °C ซึ่งเผาในช่วงนี้เป็นการไล่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และเอาน้ำในดินออก ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มสมบัติทางด้านความยืดหยุ่นและความทึบแสงของดินขาว ซึ่งถ้าเผาในช่วงอุณหภูมิ 1000 – 1050 °C ยังช่วยเพิ่มความสว่างของดินขาว แต่จะทำให้ดินมีความแข็งแรงที่ต่ำลง

#### กระบวนการปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment)

จะสามารถปรับปรุงพื้นผิวของดินขาวให้เป็นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือ ออกาโนฟิลิก (Organophilic) โดยใช้กระบวนการทางเคมีโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 แหล่งดินขาวในประเทศไทย



รูปที่ 2.5 แผนที่แสดงถึงที่ตั้งแหล่งดินขาวภายในประเทศไทย [13]

### ดินขาว จ.ลำปาง

เป็นจังหวัดแรกที่ทำการค้าค้นพบและผลิตดินขาว เป็นดินขาวปฐมภูมิ ที่เกิดจากการสลายของแร่ Feldspars ที่อยู่ในหินไรโอไลต์ มักจะมีควอตซ์ปนอยู่มาก ลักษณะเนื้อดินแน่นและละเอียดถึง 200 mesh ซึ่งดินขาวนี้เหมาะแก่การไปทำถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์

### ดินขาว จ.อุดรดิตถ์

เป็นดินขาวปฐมภูมิ ประกอบไปด้วย แร่ kaolinite, แร่ Illite และควอตซ์ มีลักษณะคล้ายดินลำปาง แต่จะแตกต่างกันที่ดินขาวอุดรดิตถ์มีเหล็กออกไซด์ 2-3 % ซึ่งดินขาวมีความคมและความละเอียดไม่ได้มาตรฐาน จึงเหมาะแก่ทำเนื้อสีทาบ้าน หรือ ผสมทำยาฆ่าแมลง และเมื่อนำไปเผาจะได้ออกมาเป็นสีเทาแก่ จึงไม่เหมาะกับการนำไปเคลือบลงบนกระดาดหรือเคลือบดินเผาที่ต้องการความขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ดินขาว จ.ปราจีนบุรี

เป็นดินขาวทุติยภูมิ สอดคล้องที่ราบน้ำท่วมถึง ส่งผลให้มีความหนาของชั้นดินที่ไม่สม่ำเสมอ ประกอบด้วยแร่ kaolinite และ ควอตซ์ ลักษณะดินมีความละเอียดและมีความเหนียวมากเท่ากับดินขาวจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งจะเหมาะแก่การไปทำเซรามิกที่ทนความร้อนได้สูง ทำเครื่องสุขภัณฑ์ ถ้วยชาม

### ดินขาว จ.ราชบุรี

เป็นดินขาวทุติยภูมิจนิตดินตะกอน ซึ่งมีทั้งลักษณะที่ผุเป็นดินขาวและชนิดที่ค่อนข้างแข็ง (ผุเล็กน้อย) แต่สามารถนำไปบดใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบได้ สามารถพบได้ในทางตะวันตกของจังหวัดกาญจนบุรี, ราชบุรี และ เพชรบุรี

### ดินขาว จ.นครราชสีมา

เป็นดินขาวปฐมภูมิ ที่ปนกับดินที่เกิดลักษณะทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิต ซึ่งจะประกอบไปด้วยแร่ kaolinite เป็นส่วนใหญ่ ลักษณะเนื้อดินมีความคล้ายกับจังหวัดระนอง ซึ่งจะมีความละเอียดและความขาวกว่าจังหวัดระนอง และ เนื้อดินมีความละเอียดปานกลาง มีความทนไฟสูง เหมาะแก่การไปทำเครื่องปั้นดินเผาหรือใช้เป็นฟิลเลอร์กระดาษได้

### ดินขาว จ.ระนอง

เป็นดินขาวปฐมภูมิ เกิดจากการผุพังของหินแกรนิต ประกอบไปด้วยแร่ kaolinite เป็นส่วนใหญ่ อาจมีแร่ Illite และ ควอตซ์ปะปน ลักษณะเนื้อดินร่วน และ มีความเหนียวน้อย มีความทนไฟสูง เหมาะแก่การไปทำเป็นเครื่องปั้นดินเผาที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมสูง และ สามารถใช้เป็นฟิลเลอร์กระดาษ

### ดินขาว จ.ระยอง

เป็นดินขาวทุติยภูมิที่ได้จากการสลายตัวของหินแกรนิต ซึ่งจะประกอบไปด้วยแร่ kaolinite เป็นส่วนใหญ่ มีความหนากว่า 3 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ของอะลูมินาสูง และ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กต่ำ สีของดินเป็นสีขาวแกมเขียวอ่อน โดยจะนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิกได้ดี

### ดินขาว จ.เชียงราย

เป็นดินขาวทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการผุพังของหินแกรนิต มีความหนาประมาณ 2.5 เมตร ซึ่งประกอบด้วยแร่ kaolinite เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสีของดินเป็นสีขาวเป็นส่วนใหญ่ สามารถใช้ประโยชน์ทำเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความขาว และใช้ทำฟิลเลอร์กระดาษได้ [13, 14]

## 2.2.5 การประยุกต์ดินขาว

ดินขาวสามารถนำไปใช้ได้หลาย ๆ อุตสาหกรรมซึ่งจะนิยมไปใช้ทางด้านอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งจะมีดังนี้ [10, 15, 16]

### อุตสาหกรรมกระดาษ

ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ดินขาวมากที่สุด ซึ่งดินขาวนั้นจะไปเป็นส่วนช่วย ดูดซับหมึกได้ดี ทำให้กระดาษมีความสว่างมากขึ้น และ ยังทำให้เยื่อกระดาษมีความเรียบมากขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีการใช้ประโยชน์ของดินขาวใน 2 ส่วน ก็คือ

1. ใช้เป็นตัวเติม (Filler) ซึ่งจะไปผสมกับเยื่อกระดาษ ซึ่งดินขาวจะเข้าไปแทรกระหว่างเยื่อกระดาษจะส่งผลให้กระดาษมีความทึบแสงมากขึ้น และ ยังเพิ่มน้ำหนักของกระดาษ และความเรียบของกระดาษ ซึ่งจะนิยมมาใช้ทดแทนเยื่อกระดาษเนื่องจากมีราคาที่แพงกว่า
2. ใช้เป็นตัวเคลือบ (Coating) โดยนำดินขาวไปผสมน้ำ, ตัวประสาน (Binder) และตัวเติมอื่น ๆ แล้วทำการเคลือบลงบนกระดาษจะส่งผลให้กระดาษมีความขาว, เรียบ และ เป็นเงามันของกระดาษ

### อุตสาหกรรมเซรามิก

โดยนำดินขาวไปใช้ทางด้านเซรามิกนั้นได้ เนื่องจาก ดินขาวจะมีสมบัติที่เมื่อทำการเผาแล้วได้สีขาว มีความเหนียว มีความแข็งแรง มีค่าการหดตัวเชิงเส้นที่ต่ำ ค่าการนำความร้อนที่ต่ำ จึงเหมาะแก่การไปทำเป็นเซรามิก ซึ่งในทางด้านอุตสาหกรรมทำเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ก็คือ

1. ทำในส่วนของเครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องคุณภาพสูง หม้อ (Pottery) และ จำพวกภาชนะที่ใช้ในเตาเผา หรือ เตาอบ
2. เป็นผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องผนังหลังคา

### อุตสาหกรรมสิ่งทอไฟ

ซึ่งดินขาวจะมีสมบัติที่ มีความทนไฟได้สูง จึงเหมาะแก่การมาทำเป็น อิฐทนไฟ เข้าดินสำหรับหลอมโลหะและถลุงเหล็ก ภาชนะที่ไว้สำหรับหลอมแก้ว

### อุตสาหกรรมยาง

ซึ่งดินขาวจะถูกนำมาใช้เป็นตัวเติม (Filler) และ ตัวขยาย (Extender) ทั้งในยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติ จะส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น ช่วยเสริมแรงลดความเปราะ เพิ่มประสิทธิภาพของยาง ยางมีความทนทานต่อการขัดสี และยังเป็นลดต้นทุนด้วย เนื่องจาก มีการใช้ดินขาวแทนที่ตัวเติมอื่น ๆ เช่น พวกอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) จะส่งผลให้มีราคาที่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุตสาหกรรมสี

ทำการเติมดินขาวลงไปจะส่งผลให้ เพิ่มน้ำหนักของสี ทำให้เนื้อสีและน้ำสีผสมเข้ากันได้ดี เมื่อทิ้งสีไว้จะเกิดการตกตะกอนได้ช้า และยังทำให้สีมีราคาถูกลง เนื่องจากว่า ได้ทำการเติมดินขาว แทนที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีราคาแพง จึงเป็นการลดต้นทุน เช่น สีทาบ้าน สีน้ำ สีน้ำมัน

## อุตสาหกรรมพลาสติก

ซึ่งจะใช้ดินขาวเป็นตัวเติมในเนื้อพลาสติก ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผิวเรียบ ลustrous และการหดตัวในระหว่างการอบ ช่วงบ่งชี้รอยเส้นในเนื้อพลาสติก เพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ และยัง สามารถลดต้นทุนได้เนื่องจากการใช้แทนที่เรซิน เพราะเรซินมีราคาแพง นอกจากนี้ถ้าใส่ดินขาวลงใน Polythene film จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและยังช่วยเก็บความร้อนไว้ในภายในเรือนกระจกให้กับพืชผลทางเกษตรกรรมได้

## อุตสาหกรรมกระดาษ

จะนำดินขาวไปใช้เป็นตัวพาและตัวเจือจางในยาฆ่าแมลงและปุ๋ยที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากดินขาวนั้นมีคุณสมบัติในการดูดซึมที่ดี มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมี ไม่เป็นฝุ่นง่าย กระจายตัวได้ดี และยังเพิ่มการยึดติระหว่างยาฆ่าแมลงกับพืชอีกด้วยและดินขาวที่ใช้ต้องไม่มีโลหะหนักที่เป็นอันตรายกับผู้ใช้งานและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงทำให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้งาน

## อุตสาหกรรมเภสัชกรรม

มีการนำดินขาวมาผสมกับยารักษาโรคกระเพาะและลำไส้ เนื่องจากดินขาวมีความสามารถในการดูดซับเชื้อโรคและสิ่งมีพิษได้ นอกจากนี้ยังเป็นตัวที่ผสมกับยาที่ใช้ภายนอกไว้สำหรับ ลดอาการระคายเคืองจากไฟไหม้และน้ำร้อนลวก

## อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

นำเครื่องสำอางผสมกับดินขาวเพื่อที่จะทำให้เกิดความละเอียดนุ่มเนียนของผลิตภัณฑ์ สามารถกลมกลืนกับสารเคมีอื่นในเครื่องสำอางเป็นอย่างดี

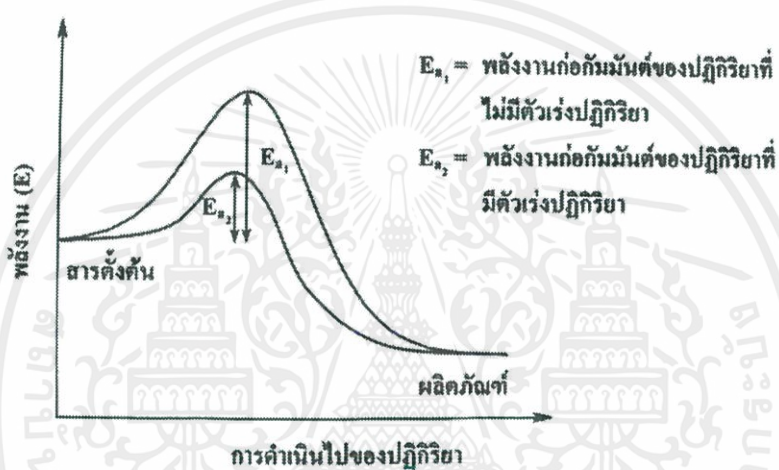
## อุตสาหกรรมอื่น ๆ

- ใช้ทำเครื่องกรองน้ำ
- ใช้ทำฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันได้สูง
- ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น เบ้าหลอม, เซรามิกกึ่งตัวนำ
- เป็นตัวพอกสีและตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม
- ใช้ผสมลงในของเหลวที่ใช้ในงานเจาะสำหรับน้ำมันปิโตรเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ซึ่งการตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นส่วนที่จะไปช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น โดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาไป ซึ่งวัตถุที่ทำการใส่ลงไปนั้นมีหลายชนิด ถ้าเป็นทางด้านเคมี ก็จะเป็นโลหะ ส่วนถ้าเป็นทางด้านชีวภาพก็จะเป็นพวกเอนไซม์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะไม่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ก็คือมีปริมาณที่เท่าเดิมและมีสมบัติเหมือนเดิม เนื่องจากมาจากผลของพลังงานก่อกัมมันต์ ซึ่งจะมีพลังงานก่อกัมมันต์ที่ลดลงจะทำให้ มีโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์จำนวนมากขึ้น จึงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น ซึ่งจะเป็นไปตามคำนิยามของ เฮนส์ ยาคอบ แบร์ซีเลียส ได้ทำการจำกัดความเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา ในปี ค.ศ. 1835 ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การดำเนินไปของการเกิดปฏิกิริยา [17]

### 2.3.1 การจำแนกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถจำแนกออกได้ 3 ชนิด ซึ่งจะพิจารณาจากสถานะ (Phase) ของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น มีดังนี้ [18, 19, 20]

#### 1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเดียวกับสารตั้งต้นและรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อไปทำการเร่งปฏิกิริยาแล้วจะทำให้เกิดปัญหาหลัก ๆ ก็คือ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะเกิดปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งตัวเร่งแบบเอกพันธ์สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ

1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว เช่น พวกกรดและเบสในสารละลายน้ำ เช่น กรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้น โดยที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะไม่เกิดปัญหาในการแยกตัวเร่งตอนสิ้นสุดปฏิกิริยา แต่จะส่งผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า โดยส่วนมากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง และมีสารตั้งต้นเป็นของไหล (ก๊าซ ของเหลว ก๊าซผสมกับของเหลว) ซึ่งตัวเร่งที่เป็นของเหลวนั้นจะมีสมบัติทางเคมีของพื้นผิวจำเพาะ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาจำเพาะตามธรรมชาติของสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ จะใช้การดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณตำแหน่งกัมมันต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ จะสามารถแบ่งให้เห็นในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

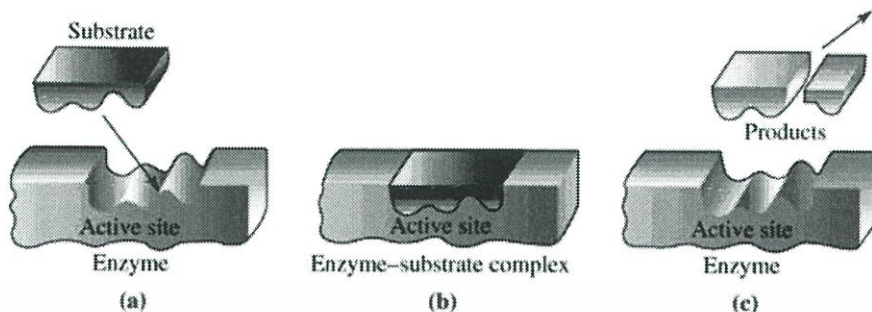
ประเภท	ปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยา
โลหะ	ไฮโดรจีเนชัน ดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) ไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) ออกซิเดชัน	Fe, Ni, Pd, Pt, Ag
ออกไซด์และซัลไฟด์ของสารกึ่งตัวนำ	ออกซิเดชัน ดีไฮโดรจีเนชัน ดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Desulphurization) ไฮโดรจีเนชัน	NiO, ZnO, MnO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MoO <sub>3</sub> , WS <sub>2</sub>
ออกไซด์ของสารฉนวนไฟฟ้า	ดีไฮเดรชัน (Dehydration)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , MgO
กรด	แคตริกอัลคิเลชัน	Aluminosilicate, Zeolite

## 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์-เอกพันธุ์ (Hydrogenized homogeneous catalyst)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธุ์แต่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น สาเหตุเนื่องมาจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดใหญ่ เช่น พวกรีนอไซม์ ซึ่งเป็นสารประกอบโปรตีน โดยที่พวก

เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์นั้น สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงมากและมีความจำเพาะสูง จะแสดงให้เห็นในรูป 2.7



ภาพที่ 2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์-เอกพันธ์ (Hydrogenized homogeneous catalyst)

[19]

### 2.3.2 กลไกของปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแล้ว กลไกของการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวมีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ 3 ขั้นตอน คือ [14]

1. โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งกัมมันต์
2. โมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับนั้นจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้นอีกโมเลกุลหนึ่งที่ถูกดูดซับและอยู่ข้างเคียง หรือ ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้นกับโมเลกุลหนึ่งที่มาจากวัฏจักรก๊าซ
3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จะเกิดการคายซับและแพร่ออกสู่วัฏจักรก๊าซ

### 2.3.3 ลักษณะการเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้น อุณหภูมิ พื้นผิวของสารตั้งต้น ความดัน หรือไม่ก็ เป็นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมลงไป โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วได้เนื่องมาจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ลดลง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดได้ 2 แบบ คือ [19, 21]

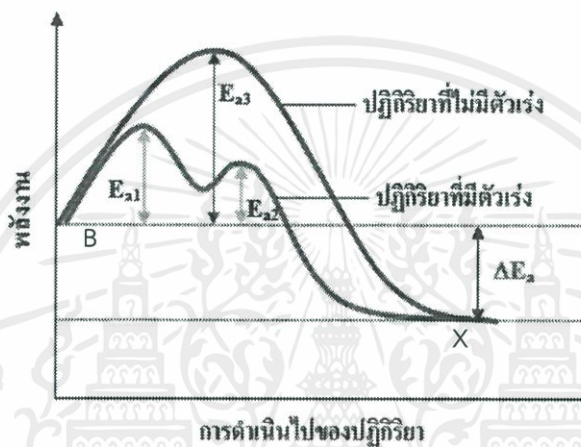
#### 1. การเกิดปฏิกิริยาโดยตรง (Direct)

โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาเส้นทางใหม่ กลไกของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไป โดยเกิดเป็นขั้นย่อยหลาย ๆ ขั้น ซึ่งจะยกตัวอย่างการเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยตัวอย่างนี้ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ B ไปเป็น X โดยมี M เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไปเท่าไร เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้กลับคืนมาเท่านั้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่า เกิดเพียงขั้นตอนเดียวและมีพลังงานกระตุ้นที่สูง ซึ่งจะได้จากกราฟ รูปที่ 2.8

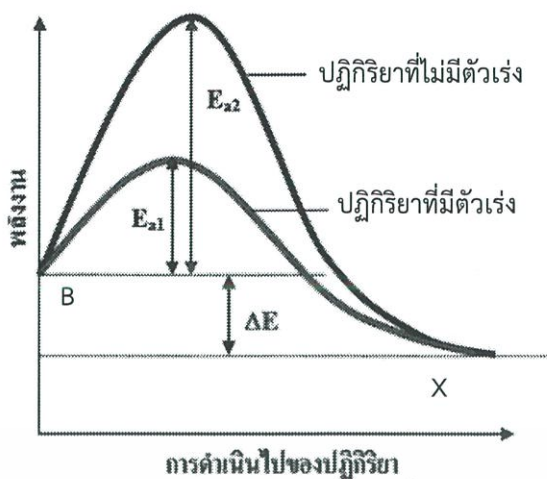


รูปที่ 2.8 การเร่งปฏิกิริยาโดยตรง [19]

ซึ่ง  $E_{a1}$  และ  $E_{a2}$  คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่ลดลงเสมอเมื่อเทียบกับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จึงมีจำนวนโมเลกุลที่พลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์มากขึ้นจึงสามารถเกิดการชนกันแล้วเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

## 2. การเกิดปฏิกิริยาโดยทางอ้อม (Indirect)

จะสัมพันธ์กับการเข้าไปรวมกับ สารตั้งต้นบางชนิด ทำให้เกิดการจัดโครงสร้างของสารใหม่ที่อยู่ใสภาพที่เหมาะสมพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยา หรือ ช่วยให้มีทิศทางในการชนของโมเลกุลที่เหมาะสม โดยในการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เกิดเส้นทางใหม่ ซึ่งอาจจะเกิดขั้นตอนเดียว ซึ่งจะเห็นได้จาก รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเร่งปฏิกิริยาโดยทางอ้อม [19]

ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำกว่าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น แต่พลังงานของปฏิกิริยามีค่าคงที่ ก็เป็นเพราะ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ลดลงเท่านั้น ไม่ได้ทำให้พลังงานของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง

### 2.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยามีอยู่ 5 อย่างหลัก ๆ คือ [19, 22]

#### 1. ธรรมชาติของสารตั้งต้น

ซึ่งในสารแต่ละชนิดมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในการเปลี่ยนชนิดของสารที่เข้ามาทำปฏิกิริยาจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไป

#### 2. ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ถ้ามีความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้มีพลังงานสูงเพิ่มมากขึ้นด้วยและยังเพิ่มโอกาสที่อนุภาคของสารตั้งต้นชนกันก็จะมีมากขึ้น ซึ่งในทางกลับกัน ถ้าลดความเข้มข้นลงก็จะเกิดปฏิกิริยาได้ช้าลง

#### 3. พื้นที่ผิวของสารตั้งต้น

ซึ่งจะมีผลจะเกิดขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ซึ่งมีสารตั้งต้นเป็นของแข็งทำปฏิกิริยากับก๊าซหรือของเหลว ซึ่งถ้าพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งมากทำให้อนุภาคของสารตั้งต้นชนกันด้วยความถี่สูงทำให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้น แต่ถ้าพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นน้อย อนุภาคของสารตั้งต้นก็จะชนด้วยความถี่ต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ความดัน

เมื่อถ้าเพิ่มความดันโดยการลดปริมาตรของก๊าซ นอกจากความดันจะเพิ่มจะส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะก๊าซเพิ่มขึ้นด้วยเพราะโมเลกุลของก๊าซอยู่ใกล้ชิดกันมาก จึงส่งผลให้การชนกันของโมเลกุลก็จะมากขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาตรของก๊าซจะมีผลทำให้ความดันของก๊าซลดลง เพราะ โมเลกุลของก๊าซอยู่ห่างกันก็จะส่งผลให้การชนกันของโมเลกุลน้อยลงจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าลง

#### 5. อุณหภูมิ

ซึ่งถ้าเพิ่มอุณหภูมิก็จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อลดอุณหภูมิ ก็เพราะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลของก๊าซจะเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลมีพลังงานจลน์มากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้อนุภาคของสารตั้งต้นเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมีโอกาสที่อนุภาคจะชนกันมากขึ้น

### 2.3.5 การประยุกต์การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยการประยุกต์การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ จะนิยมไปใช้ทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นหลัก ส่วนใหญ่เป็นการปรับปรุงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจำนวนมาก จะอยู่ในรูปของ ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) และน้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งในแต่ละแหล่งจะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เท่า ๆ กัน ซึ่งจะทำให้การปรับปรุงเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ โดยทำการกลั่นน้ำมันดิบแยกตัวที่ระเหยได้ง่าย กับ ตัวที่ระเหยได้ยาก แยกออกจากกัน ซึ่งตัวที่ระเหยได้ยาก หรือเรียกว่า กากน้ำมัน พอทำการแยกแล้วนำส่วนที่ระเหยได้ง่ายนำไปกลั่นลำดับส่วนซึ่งจะได้น้ำมันต่าง ๆ ตามสมบัติการระเหย เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน C1-C4 ก๊าซชนิดเบา และในส่วนของ กากน้ำมัน สามารถนำไปกลั่นภายใต้ความดันต่ำ จะได้ออกมาเป็นน้ำมันชนิดหนักและน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน, น้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาตามบ้านเรือน, น้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี และน้ำมันที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ โดยกระบวนการกลั่นนี้ยังมีจุดประสงค์ในการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแตกย่อยทางเคมีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) และกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันโดยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น หรือ มีค่าที่เหมาะสมกับการใช้ในเครื่องยนต์ของรถยนต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีหลากหลายชนิดที่สามารถนำไปประยุกต์ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและเบส

ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งอาจจะมีคุณสมบัติความเป็นกรด ซึ่งได้พบว่า ในบางปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ในปฏิกิริยาในการแตกตัว (Catalytic cracking) ซึ่งจะถูกเร่งด้วยสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งจะให้ผลออกมาคล้ายคลึงกับการเร่งปฏิกิริยา ที่มีความเป็นกรดต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแครกกิงนั้นสามารถไทเทรตด้วยเบส และสามารถทำให้เสื่อมสภาพได้ด้วยการเติมสารละลายที่เป็นเบสที่สามารถดูดซับบนพื้นผิวได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมด ทำให้เชื่อกันว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง มีความเป็นกรด และยังสามารถทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็น คาร์โบเนียมแคทไอออนได้ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน (Polymerization) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ซึ่งตำแหน่งบนพื้นผิวของแข็งที่เป็นกรด ซึ่งได้นิยามไว้มีด้วยกัน 2 อย่าง ดังนี้

### 1. ความเป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted acid)

ได้นิยามไว้ว่า สารประกอบที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสามารถถ่ายโปรตอนให้กับไอออนหรือโมเลกุลใดที่สามารถรับโปรตอนนั้นได้ เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างคู่กรด - เบสที่มีการแลกเปลี่ยนโปรตอนในสภาวะสมดุล ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ



โดยที่ A<sup>-</sup> คือ คู่เบสของ HA และ BH<sup>+</sup> คือคู่กรดของ B

### 2. ความเป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis acid)

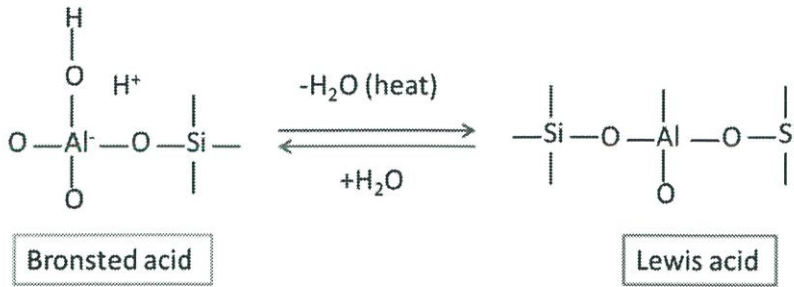
ได้นิยามว่า ในส่วนของกรด คือ สารใดที่สามารถรับคู่อิเล็กตรอนแล้วเกิดพันธะได้ และในส่วนของเบส คือ สารใดที่สามารถให้คู่อิเล็กตรอนกับสารที่สามารถรับคู่อิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ



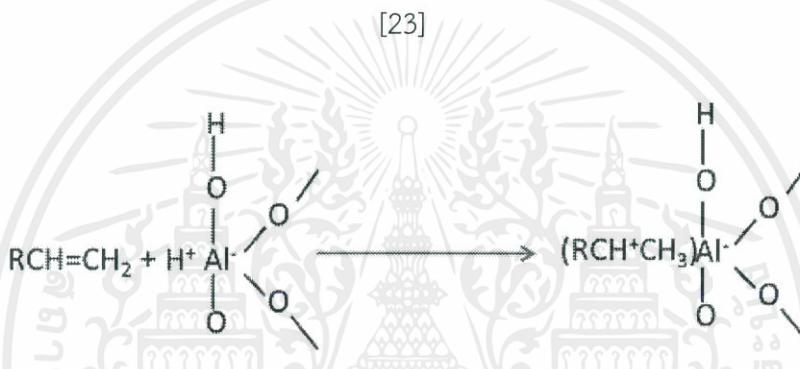
### แหล่งที่มาของความเป็นกรด

โดยที่โครงสร้างบนพื้นผิวที่มีความเป็นกรดนั้น โดยอธิบายได้จากทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นจาก Linus Pauling ได้สมมุติจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่ว่า เมื่อไอออนของอะลูมิเนียมที่เข้าไปแทนที่ไอออนของซิลิกอน ซึ่งจะทำให้พื้นผิวของแข็งมีค่าเป็นลบ จึงจำเป็นต้องถูกทำให้เสถียรด้วยไอออนบวก (โปรตอน) ซึ่งไอออนบวกนั้นอาจเกิดการแตกตัวของน้ำ โดยจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลมาเกาะบนอะตอมของอะลูมิเนียม ซึ่งจะได้ออกมา ทั้งไอออนอะลูมิเนียมและซิลิกอนที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระฮีดรอล และ มีความเป็นกรด ซึ่งในโครงสร้างนี้เมื่อได้รับความ

ร้อนจะเกิดการคายน้ำออกมา ทำให้ตำแหน่งกรดบรอนสเตดถูกเปลี่ยนให้เป็นตำแหน่งลิวอิส เป็นไปตามรูปที่ 2.10

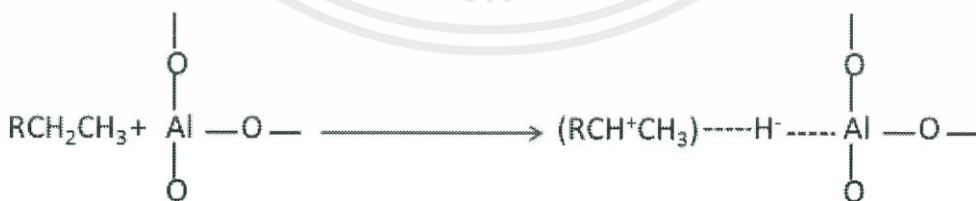


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนโครงสร้างของซิลิกา และ อะลูมินา ทำให้สมบัติเป็นกรดบรอนสเตดและลิวอิส



รูปที่ 2.11 การทำปฏิกิริยาของตำแหน่งกรดบรอนสเตด [23]

จากรูปที่ 2.11 จะเกิดเมื่ออะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ของอะตอมของซิลิกา ทำให้โครงสร้างเป็นลบ จึงต้องดุลประจุด้วยการดึงโปรตอนเข้ามา หลังจากนั้นเมื่อเจอเข้ากับสายโซ่แอลคีนจึงทำการให้โปรตอนกับสายโซ่แอลคีนทำให้กลายเป็นสายโซ่แอลเคน



รูปที่ 2.12 การทำปฏิกิริยาของตำแหน่งกรดลิวอิส [23]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า ออกซิเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) ที่สูงกว่าอะลูมิเนียมซึ่งจะทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะสามารถเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์โบเนียมไอออน ที่สามารถดูดซับบนพื้นผิวได้ ซึ่งจะ เป็นไปตามที่ได้กล่าวไว้ [23, 24]

### การเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต

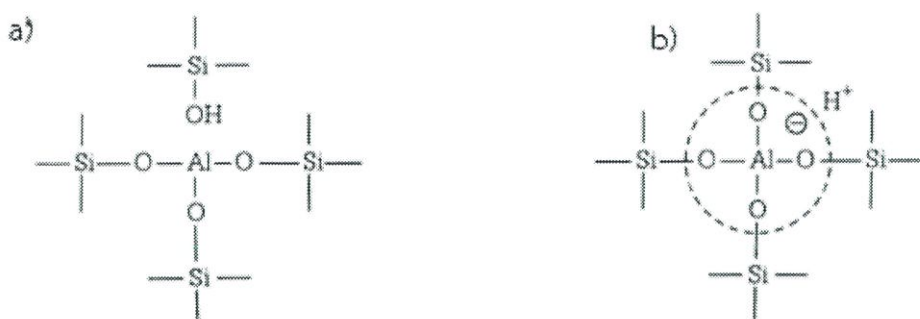
ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ก็คือ ความเป็นกรดและเบสของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งโดยปกติตัวเร่งสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตจะมีความเป็นกรดและเบส ซึ่งเกิดได้จากพื้นผิวจะถูกปกคลุมด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) แต่บนพื้นผิวของแข็งนั้นส่วนมากจะแสดงความเป็นกรด ซึ่งจะสังเกตได้จากจำนวนโปรตอนที่เกี่ยวข้องอยู่บนสารประกอบนั้น ๆ ซึ่งจะนำไปตามนิยามของ กรดบรอนสเตด (Bronsted acid) และ กรดลิวอิส (Lewis acid) ซึ่งสารประกอบออกไซด์ที่เป็นออกไซด์เดี่ยวจะสามารถแสดงความเป็นกรดที่ ต่ำมาก และสารประกอบออกไซด์คู่ ซึ่งในสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตจะมีความเป็นกรดสูง ซึ่งจะเกิด จาก อะตอมของอะลูมินาเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกาในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างมีความเป็นลบ เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เกิน ดังนั้น จึงต้องทำให้สมดุล โปรตอนจึงสามารถไปเกาะติดและเกิดพันธะ กับอะตอมของออกซิเจนในซิลิกาเลยทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งโปรตอนนี้สามารถหลุดออกได้เลยทำ ให้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต มีความเป็นกรด ซึ่งสารประกอบที่พูดถึงนี้ก็คือ เป็นผลึกอสัณฐาน (Amorphous) สามารถเกิดเป็นผลึกที่เรียกว่า ซีโอไลต์ (Zeolite) [20, 23]

### ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซึ่งซีโอไลต์นั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นโลหะ และมีความเป็นกรด ซึ่งความเป็นกรดของซีโอไลต์นั้นเกิดจาก เมื่อมีการแทนที่  $Si^{4+}$  ด้วย  $Al^{3+}$  จะทำให้โครงสร้างเกิดประจุลบขึ้นตามจำนวนอะตอมที่ถูกแทนที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทำ สมดุลประจุ ซึ่งส่วนใหญ่ไอออนที่มากำหนดสมดุลก็มาจากไอออนบวกของโลหะ แล้วเกิดพันธะกับ อะตอมออกซิเจนของซิลิกา ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล จึงมีความเป็นกรด จะเห็นได้จากรูปที่ 2.13 ซึ่งมี ซีโอไลต์คุณสมบัติที่สำคัญในแง่ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ประการ ก็คือ

1. ความสม่ำเสมอทางโครงสร้างผลึก และ ความสม่ำเสมอของรูพรุนของซีโอไลต์ ซึ่งมีโมเลกุลที่เล็กกว่ารูพรุนเท่านั้นก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ โดยโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนจะไม่สามารถ เข้าไปจับกับพื้นที่กัมมันต์ได้
2. การคงสภาพของหมู่ไฮดรอกซิล หรือ ความเป็นกรดของซีโอไลต์
3. ความแรงของสนามอิเล็กตรอนของอะตอมบริเวณข้างเคียงกับแคทไอออน โดย ความแรงของสนามแม่เหล็กนั้นจะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำของสารตั้งต้นได้ หรือ ความไวต่อ ปฏิกิริยาเร่งขึ้นกับธรรมชาติของแคทไอออนในสารประกอบซีโอไลต์ [20, 25, 26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงถึงโครงสร้างความเป็นกรดของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต(ซีโอไลต์)

a) กรดลิวอิส b) กรดบรอนสเตต [18]

### กระบวนการแครกกิงโดยตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งกระบวนการแครกกิงเป็นการแตกย่อยของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ จนมีขนาดที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากมีขนาดและโครงสร้างที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ในเครื่องยนต์ในรถยนต์ได้ดี ซึ่งถ้าไม่ผ่านกระบวนการแครกกิงก่อนนั้นจะส่งผลให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ นั้น จะทำให้เกิดการจุดระเบิดในกระบอกสูบก่อนจังหวะของเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์น็อคได้ ซึ่งค่าการเผาไหม้นั้นดูได้จากค่าออกเทน (Octane number) ซึ่งเป็นค่าการเผาไหม้ของสารประกอบเฮปเทน (n-heptane) และ ไอโซออกเทน (Isooctane) ค่ายิ่งเยอะจะส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดี มีค่าตั้งแต่ 0-100 ซึ่งในกระบวนการแครกกิงนั้น ถ้าเกิดปฏิกิริยาที่มากเกินไป จะทำให้เกิดการเกาะติดของคาร์บอนบนพื้นผิวจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะแก้ไขได้โดย นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปเผาจะทำให้คาร์บอนที่อยู่บนพื้นผิวนั้นหลุดออกมาในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นอันตรายจึงจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ เพื่อที่จะทำการออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการแครกกิงก็คือ ซีโอไลต์วาย (Zeolite Y)

### กระบวนการรีฟอร์มมิงโดยตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่คาร์บอนที่เป็นเส้นตรงกลายมาเป็นโซ่กิ่ง หรือ เป็นวงแหวน โดยผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้สามารถจำแนกได้เป็นปฏิกิริยา ต่าง ๆ ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของสารประกอบอะลิไซคลิก (Alicyclic species) หรือ สารประกอบแนพทีน (Naphthene) จนเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเกิดปฏิกิริยาการสลายวงแหวนของสารประกอบวงแหวน ที่เป็นสารประกอบอนุพันธ์ของสารประกอบไซโคลเพนเทน (Cyclopentane derivative) จนทำให้เกิดเป็นสารประกอบไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)

3. การเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ของสารประกอบเอิน - แอลเคน (n-alkane) จนเกิดเป็นสารประกอบไอโซแอลเคน (i-alkane)

4. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไซโคลเซชัน (Dehydrocyclization) ของสารประกอบเอิน - แอลเคน โดยเกิดเป็นสารประกอบอะลิไซคลิกและอะโรมาติก

ซึ่งทั้ง 4 ปฏิกิริยานี้จะส่งผลทำให้เกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติก และ สารประกอบแอลเคนชนิดกิ่ง ที่ได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้ค่าออกเทนสูง [23]

### 2.3.6. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการทำปฏิกิริยานั้น ซึ่งสังเกตได้ว่า บ่อยครั้งที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้ว ถูกกำจัดทิ้ง เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพและรักษาความไวในการเกิดปฏิกิริยาให้คงที่ไว้ไม่ได้ หรือ ไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ซึ่งการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีความเป็นพิษ (Poison) ซึ่งอาจจะปะปนอยู่ในสารตั้งต้นหรืออาจจะเกิดหลังการเกิดปฏิกิริยา มีดังนี้ [20]

#### ความเป็นพิษเนื่องจากการดูดซับทางเคมี

ซึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างช้า ๆ จะเกิดการดูดซับทางเคมีบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งถ้าการดูดซับที่ไม่แข็งแรง จะส่งผลให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาอาจจะกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อได้ทำการกำจัดสารพิษออก แต่ถ้าสารพิษถูกดูดซับอย่างแข็งแรง ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพและไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้

#### ความเป็นพิษเนื่องจากการฉาบ

ซึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีสิ่งฉาบด้วยคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง จะส่งผลให้คาร์บอนนั้นไปปกคลุมที่ตำแหน่งกัมมันต์บนตัวเร่งปฏิกิริยาและยังเข้าไปอุดตันในรูพรุน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกลับคืนสภาพได้บางส่วน โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปเผาในบรรยากาศ จะส่งผลให้คาร์บอนที่ติดอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาหลุดออกในรูปของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์

#### การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้งาน หรือถูกทำให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูงเกินไป ความดันสูงเกินไป หรือว่าในสภาวะที่เป็นพิษมาก ๆ ก็จะมีส่งผลให้เกิดการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงของโมเลกุลที่เป็นระเบียบและมีรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งโครงสร้างจะประกอบไปด้วย  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  ที่มีโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) จับกันโดยใช้ ออกซิเจนร่วมกัน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างก็คือ  $M_{x/n}(\text{SiO}_2)_x(\text{AlO}_2)_y \cdot w\text{H}_2\text{O}$  โดยที่  $n$  คือ ไอออนบวกของ โลหะหมู่ที่ 1 และ 2 อย่างเช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โดยที่อัตราส่วน  $y/x$  จะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 และ  $w$  ก็คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ ซึ่งลักษณะของซีโอไลต์ เป็น โครงสร้างขนาดใหญ่และเกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง และมีช่องว่าง หรือ รูพรุนที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบใน 3 มิติ โดยรูพรุนของซีโอไลต์นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 3 ถึง 10 อังสตรอม ซึ่งซีโอไลต์ จะมีรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างแน่นอน รูพรุนจะประกอบไปด้วยอะตอมออกซิเจนเป็นวงแหวน ดังนั้นผิวภายในของซีโอไลต์จะประกอบไปด้วยอะตอมของ ออกซิเจนเกือบทั้งหมด เนื่องจากขนาดอะตอมของออกซิเจนใหญ่กว่าขนาดอะตอมของไอออนบวก ซึ่งขนาดรูพรุนจะเป็นแบบ microporous เนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่ำกว่า 2 นาโนเมตร จะแบ่งออกมาได้ 3 ขนาด คือ

1. ขนาดรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะมีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม เช่น Zeolite A
2. ขนาดรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งจะมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 5 ถึง 6 อังสตรอม เช่น Zeolite ZSM-5
3. ขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 7 ถึง 8 อังสตรอม หรือเรียกว่า ซูเปอร์ เคจ (Supercage) เช่น ซีโอไลต์ฟูจาไซด์ ซึ่งจะมี  $X (\text{Si}/\text{Al} = 1 - 1.5)$  และ  $Y (\text{Si}/\text{Al} > 1.5)$  ซึ่งจะแบ่งขนาดรูพรุนเป็นไปตามตาราง ที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดของรูพรุน (Guisnet and Gilson, 2002)

Small pore zeolites	Middle pore zeolites	Large pore zeolites
8-membered ring	10- membered ring	12- membered ring
3.0 – 4.5 Å	4.5 – 6.0 Å	6.0 – 8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X,Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stilbite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

ซึ่งรูพรุนของซีโอไลต์นั้น จะสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เนื่องจากมี คุณสมบัติในการดูดซับทางเคมีที่ดี ซึ่งคุณสมบัติเด่น ๆ ของซีโอไลต์ ก็คือสมบัติการกรองเชิงโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Molecular sieve) โดยมีขนาดรูพรุนของซีโอไลต์เป็นตัวควบคุมขนาดของโมเลกุลที่ต้องการจะกรอง โดยซีโอไลต์นั้นจะมีหลากหลายชนิดที่จะสามารถนำไปใช้อุตสาหกรรมที่แตกต่างกันออกไป [3, 4]

### 2.4.1 ชนิดของซีโอไลต์

#### 1. ซีโอไลต์เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ซึ่งจะเกิดการทับถมกันของซีโอไลต์เขาไฟที่ทำปฏิกิริยากับน้ำใต้ดินที่เป็นด่าง หรือน้ำทะเล ที่มาของชื่อซีโอไลต์มาจากการรวมกันของคำว่า zeo และ lithos ในภาษากรีก ซึ่งหมายความว่า “เดือด” และ “หิน” รวมกันเป็นหินเดือด เนื่องจากลักษณะของซีโอไลต์เมื่อได้รับความร้อนจะปลดปล่อยน้ำออกมา และสามารถดูดซับน้ำกลับเข้าไปได้โดยง่าย ซึ่งซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมักจะมีปริมาณพื้นที่ผิวต่ำ และมีสิ่งปนเปื้อนของแร่ธาตุจำนวนมาก พวกโลหะ ควบหซ์ ซึ่งซีโอไลต์ชนิดนี้ จะมีอัตราส่วน Si/Al ต่ำ ๆ อาจพบในรูปของผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ หรือ โครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนสูงซึ่งยากที่จะทำการสังเคราะห์ โดยซีโอไลต์พวกนี้จะนิยมไปทำประโยชน์ในทางด้านการก่อสร้างโดยผสมอยู่ในตัวคอนกรีต นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวเติม (Filler) ในอุตสาหกรรมกระดาษ และยังผสมเป็นอาหารเสริมในอาหารสัตว์ ได้อีกด้วย ตัวอย่างของซีโอไลต์ที่ถูกนำไปใช้บ่อย เช่น ซาบานด์, เอร์โอไนต์, มอร์ติไนต์ (MOR), ไคเนอพิโตไลท์ (HEU) [27]

#### 2. ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

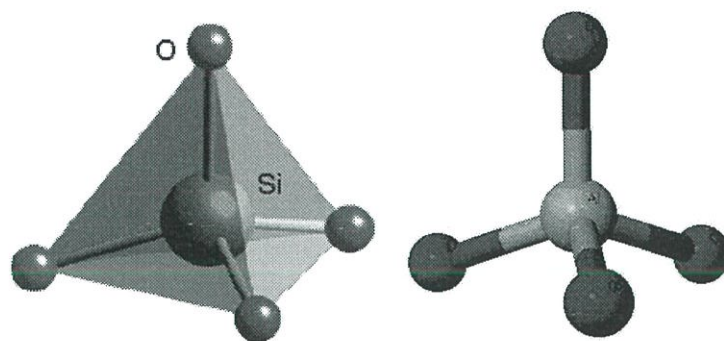
ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมากกว่าซีโอไลต์ ตามธรรมชาติ ก็เป็นเพราะ มีความบริสุทธิ์สูง มีขนาดสม่ำเสมอ และยังมีข้อดีอีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างให้เป็นไปตามต้องการ ส่งผลให้มีความซับซ้อนและหลากหลายที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยที่ความแตกต่างของโครงสร้าง ขนาด และองค์ประกอบของซีโอไลต์ส่งผลให้เกิดสมบัติที่แตกต่างกัน

### 2.4.2 ประเภทของซีโอไลต์ตามหน่วยโครงสร้าง

#### 1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Units)

โครงสร้างปฐมภูมิเป็นหน่วยพื้นฐานที่สุดของซีโอไลต์ มีลักษณะเป็นโครงสร้างเป็นทรงสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินา (Tetrahedral) โดยความยาวของพันธะและมุมระหว่างพันธะจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน หรือ อะลูมิเนียมกับออกซิเจน เป็นตัวกำหนดโครงสร้างชนิดของซีโอไลต์ ซึ่งจะมีค่าความยาวพันธะของซิลิกอนกับออกซิเจนอยู่ที่ 1.59 – 1.64 อังสตรอม และความยาวพันธะของอะลูมิเนียมกับออกซิเจนอยู่ที่ 1.73 อังสตรอม โดยมุมของพันธะอยู่ที่ 140 – 165° โดยมีอะตอมกลางเป็นอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ต่ำที่สุด ก็จะเป็นพวกซิลิกอนและอะลูมิเนียม และมีอะตอมล้อมรอบเป็น ออกซิเจน ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.14

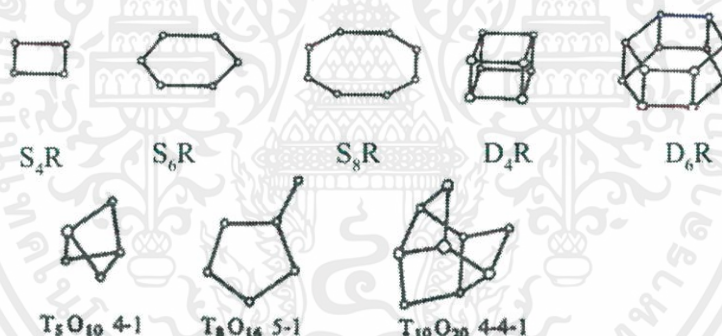
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 โครงสร้างปฐมภูมิของ ซิลิกา (ซ้าย) [28] และ อะลูมินา (ขวา) [29]

## 2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units)

โครงสร้างทุติยภูมิเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิติดกันเป็นวงเหลี่ยม ๆ อย่างเช่น เป็นวงเดี่ยว ( $S_4R$ ) ก็คือจะมีลักษณะเป็นวงเดี่ยวโดยมีมุม 4 มุม, เป็นวงคู่ ( $D_4R$ ) ก็มีลักษณะเป็นวงคู่มีมุม 4 มุม หรือว่าจะเป็นวงเชิงซ้อน ( $T_6O_{10}4-1$ ) ที่มีมุม 4 มุมเหมือนวงเดี่ยว และมีเพิ่มอีก 1 มุม ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีรูปร่างที่ไม่สมมาตรจะเห็นได้ในรูปที่ 2.15

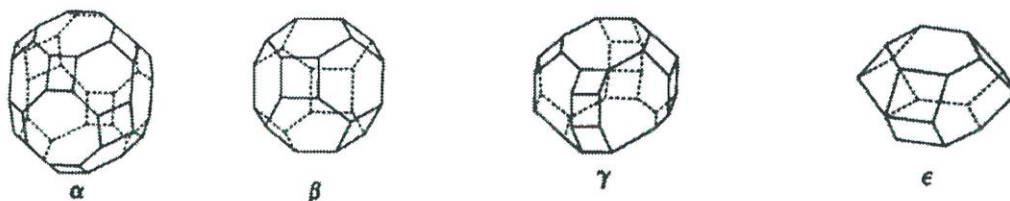


รูปที่ 2.15 โครงสร้างทุติยภูมิ [30]

## 3. หน่วยโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Units)

เป็นหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า ซึ่งเป็นโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตของซีโอไลต์ โดยทั่วไปมักเกิดจากโครงสร้างทุติยภูมิตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทำให้เกิดหน่วยย่อยของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปทรงยี่สิบหกหน้า (Truncated cuboctahedron) ( $\alpha$ ),

รูปทรงแปดหน้ามุมตัด (Truncated octahedral type) ( $\beta$ ), สิบแปดหน้า (18-hedron) ( $\gamma$ ), สิบเอ็ดหน้า (11-hedron) ( $\epsilon$ ) ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างตติยภูมิ [30]

ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปทรงเหลี่ยมหลายหน้า (Polyhedral) ที่มีความสมมาตรสูง ซึ่งจะ เป็นทรงหลายเหลี่ยมทรงโซดาไลต์ (Sodalite cage) ที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมแปดหน้าที่ถูกตัดมุมออก และเกิดเป็นทรงสี่เหลี่ยมสิบสองหน้า (Octahedral) [30]

### 2.4.3 สมบัติของซีโอไลต์

#### สมบัติทางกายภาพ

##### - พื้นผิว

ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลและอะตอม ซึ่งซีโอไลต์ มีพื้นผิวที่เป็นลบ ส่งผลให้มีความสามารถที่ดีมากในการดึงดูดให้เกิดการแพร่และการดูดซับ น้ำและไอออนบวก และยังส่งผลถึงสมบัติการชอบน้ำด้วย ซึ่งมีปริมาณอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ต่ำจะส่งผลให้ความชอบน้ำของพื้นผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ความสม่ำเสมอและเป็นระเบียบของโครงสร้างรูพรุน ที่จะส่งผลต่อการเป็นตัวคัดกรองโมเลกุล เฉพาะโมเลกุลที่เล็กกว่าเท่านั้นจึงจะเกิดสามารถในการคัดกรองสาร หรือสมบัติความจำเพาะต่อขนาดและโมเลกุลของสาร และสามารถปรับปรุงได้ผ่านการเติมสารเพิ่มหรือลดแรงดึงดูด และ กระบวนการกำจัดซิลิกาและอะลูมินาในโครงสร้าง

#### สมบัติทางเคมี

##### - ค่าความเป็นกรด

การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนอะลูมินาจะส่งผลถึงความเป็นกรดที่ลดลง ซึ่งในซีโอไลต์จะ ขึ้นอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว นอกจากอัตราส่วนของซิลิกาและอะลูมินาภายใน สารตั้งต้นแล้ว จะขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์และกระบวนการปรับปรุง โครงสร้างภายหลังการสังเคราะห์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแลกเปลี่ยนประจุและการดูดซับ  
โดยซีโอไลต์จะมีการแลกเปลี่ยนไอออนบวกเข้ามาในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ โดยประจุบวกที่จะเข้ามาทำหน้าที่สร้างสมดุลประจุบนพื้นผิว รูพรุนของซีโอไลต์ นอกจากนี้ประจุบวกที่อยู่บนพื้นผิว ยังทำหน้าที่ดึงดูดให้เกิดการดูดซับ และแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิวโดยมีแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์
- เสถียรภาพ  
ซึ่งความเสถียรภาพของซีโอไลต์จะมีค่าผกผันกับปริมาณของอะลูมินาในโครงสร้าง โดยขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งกรดบนพื้นผิว ยิ่งมีตำแหน่งกรดมากจะเกิดปฏิกิริยาได้มากและรวดเร็ว ก็จะส่งผลให้มีความเสถียรภาพที่ต่ำ โดยที่ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของ Si/Al ที่สูง หรือ ซิลิกาไลต์ ซึ่งจะมีเสถียรภาพทางความร้อน และ การเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะมีความจำเป็นอย่างมากในการนำไปใช้งานและส่งผลต่อความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ถ้าซีโอไลต์มีความเสถียรภาพที่ต่ำจะส่งผลต่อการเกิดโค้กซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง แต่ถ้ามีความเสถียรภาพที่มีความเหมาะสมกับความเป็นกรดและสมบัติทางด้านการคัดกรอง โมเลกุลจะส่งผลต่อการเกิดโค้กลดลง และ ยังเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้น [3]

#### 2.4.4 วิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีความหลากหลายทั้งในแง่ของโครงสร้างสมบัติ และ การนำไปใช้ ก็จะขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ของซีโอไลต์ที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้จะเป็นดินขาว ซึ่งดินขาวนั้นมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสูง จึงจำเป็นต้องไปเปลี่ยนโครงสร้างก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งจะมีวิธีการสังเคราะห์ [31] ดังนี้

##### กระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination process)

เป็นกระบวนการที่ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาว โดยใช้การเผาที่อุณหภูมิสูงๆ ระหว่าง 500 – 900 °C จะได้ออกมาเป็นเมตาคาโอลิน (Metakaolin) เป็นวิธีที่ใช้กันหลากหลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และใช้เวลาไม่นาน แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียที่ส่งผลต่อซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ก็คือ เนื่องจากการเผาในอุณหภูมิดังกล่าว จะไม่สามารถทำลายโครงสร้างของดินขาวให้เป็น metakaolin ทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ เลยส่งผลให้มีสิ่งปนเปื้อนของควอทซ์ มัสโคไวท์ และ แร่พื้นม้า ซึ่งจะส่งผลให้ซีโอไลต์ที่ทำการสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์ที่ต่ำลง และ ส่งผลถึงสมบัติและประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน [5, 6, 7]

##### กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process)

เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่มีความนิยมมากที่สุด โดยที่ สารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยให้ความร้อนและความดันภายในเทฟลอนไลน์อโต้เคลป (Teflon – อีเกสสารเป็นอีเกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

line autoclave) ภายใต้อุณหภูมิและเวลา จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเกิดการตกผลึกเป็นซีโอไลต์ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- ภาวะใต้วิกฤต (Subcritical) จะใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 100 – 240 °C และให้ความดันอยู่ที่ 1 บาร์
- ภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical) จะใช้อุณหภูมิมากกว่า 1000 °C และให้ความดันสูงถึง 3000 บาร์

ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้วิธีการ Hydrothermal 2 ครั้ง ซึ่งไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก จะเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาวด้วยการกระตุ้นในสารละลายเบส (Alkaline activation) และทำการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง เป็นการทำให้เจลอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการตกผลึกและฟอร์มตัวเป็นซีโอไลต์ ซึ่งจะมีข้อดีก็คือ ใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่ต่ำ ไม่เป็นมลพิษทางอากาศและง่ายต่อการควบคุมสารละลาย [4, 8]

#### กระบวนการกระตุ้นในสารละลายเบส (Alkaline activation)

ซึ่งกระบวนการนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เป็นกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูง ให้เป็นซิลิกาแบบอสัณฐาน ซึ่งมีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ ซึ่งจะเป็นวิธีที่เหมือนกับวิธีแคลซินเนชัน แต่จะมีข้อดีที่ดีกว่าวิธีแคลซินเนชันก็คือ เป็นการลดการปนเปื้อนของแร่ในกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีเสถียรภาพทางความร้อนและเคมีสูงๆ ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ ก็จะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายเบส ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น [6, 7]

#### กระบวนการโซล - เจล (Sol - gel process)

เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์วัสดุของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงจากโมเลกุลเล็ก ผ่านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ “โซล” เป็นสารแขวนลอยด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) และ ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Reaction) กลายเป็น “เจล” ที่เป็นของแข็งจากการเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาค ซึ่งวิธีนี้จะส่งผลให้ ซีโอไลต์ที่มีความสม่ำเสมอของอนุภาคและโครงสร้างมากกว่าการไฮโดรเทอร์มอลของสารละลาย นิยมนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [32]

#### กระบวนการที่มีใส่ Template

เป็นกระบวนการเติมสารอินทรีย์ลงในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ให้เป็นโครงสร้างเพื่อควบคุมขนาดของรูพรุนให้มีความสม่ำเสมอและให้มีขนาดตามที่ต้องการก่อนที่จะให้ความร้อนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออก ก็จะเหลือเป็นช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีการนี้ ส่วนใหญ่จะนิยมสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนในระดับเมโสพอร์ัส (Mesoporous) โดยกระบวนการนี้ก็มีข้อเสียก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมตัวของแม่แบบและยังสามารถเกิดการแยกตัวในระหว่างการสังเคราะห์ ซึ่งจะเป็นปัญหาต่อการกำจัดแม่แบบออก ซึ่งจะส่งผลให้ซีโอไลต์นั้นมีความบิดเบี้ยวและมีความเป็นผลึกที่ลดลง [4]

### กระบวนการปรับปรุงคุณภาพภายหลังการสังเคราะห์ (Post Synthesis Modification)

ซึ่งเป็นการปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติ เพิ่มความเสถียรภาพ เพื่อความเป็นกรด ปรับปรุงสมบัติทางพื้นผิว เป็นต้น เนื่องจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์นั้นเป็นเรื่องที่ยากที่จะสังเคราะห์ให้มีขนาด โครงสร้าง และ สมบัติตามที่ต้องการ มีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูง จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการ Dealumination และ Desilication หรือเป็นกระบวนการที่มีการกำจัดอะลูมินาและซิลิกาออกจากโครงสร้าง ซึ่งจะมีหลักการก็คือ ทำปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนควบคู่ไปในสารละลายกรดหรือเบส แต่จะมีข้อเสียก็คือ ความเป็นผลึกของซีโอไลต์จะลดลง นอกจากนี้ ยังไม่สามารถทำได้กับซีโอไลต์ทุกโครงสร้าง เนื่องจากอาจจะส่งผลต่อการทำลายโครงสร้างของซีโอไลต์นั้น หรือ ในบางครั้งอาจจะปรับปรุงด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยา

#### 2.4.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

##### อัตราส่วนของ Si/Al

ซึ่งปริมาณของซิลิกาจะมีผลต่อซีโอไลต์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ [34]

##### 1. ซีโอไลต์ที่มีปริมาณซิลิกาที่ต่ำ

โดยอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาอยู่ในช่วง 1 – 1.5 เนื่องจากมีปริมาณไอออนมากที่สุด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและเป็นตัวดูดซับที่ดี มีคุณสมบัติการชอบน้ำ (Hydrophilic) และมีความเป็นกรดมาก ซึ่งซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ ก็จะมี ซีโอไลต์เอ และ ซีโอไลต์เอ็กซ์

##### 2. ซีโอไลต์ที่มีปริมาณซิลิกานกลาง

โดยอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาอยู่ช่วง 2 – 5 เนื่องจากการลดลงของปริมาณอะลูมินาในโครงสร้าง จะส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนและความเป็นกรดที่ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณไอออนบวกเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนและกักเก็บประจุลดลง รวมไปถึงสมบัติความชอบน้ำลดลง และ มีความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งซีโอไลต์กลุ่มนี้ ก็จะเป็น ซีโอไลต์วายซึ่งเป็นที่ยอมรับและสนใจอย่างมากในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด

##### 3. ซีโอไลต์ที่มีปริมาณซิลิกาสูง

โดยอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาอยู่ในช่วง 10 – 100 เนื่องจากมีปริมาณ ซิลิกาที่สูง จะส่งผลให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและความแรงของกรดค่อนข้างสูง แต่มีตำแหน่งกรดบนพื้นผิวที่ต่ำ ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ ก็จะเป็น ซีโอไลต์ ZSM-5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ซีโอไลต์ที่มีปริมาณซิลิกาสูงมาก

โดยมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามากกว่า 100 เนื่องจากมีปริมาณอะลูมินาที่น้อยมาก ๆ เลยส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำมาก เสถียรภาพทางความร้อนมีค่าสูงมากทนได้ถึง 1300 °C และมีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างรุนแรง ในบางชนิดเป็นสมบัติ Organophilic นิยมใช้งานทางด้านการคัดกรองโมเลกุลเป็นหลัก ซึ่งซีโอไลต์ในกลุ่มนี้ก็คือ ซิลิกาไลต์ ซึ่งจะสรุปไว้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงถึงอัตราส่วน Si/Al ของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [8]

Zeolite	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
SAPOs	1
NaA	1.9
NaA	2.3
4A	2.0
4A	2.6
A	2
LTA	2.3
X	3
X	3.2
Y	15
NaY	16
ZSM-5	20
ZSM-5	83.4
ZSM-5	100
Beta	88
Beta	100

#### อุณหภูมิและเวลาในการเกิด metakaolin

หรือเป็นกระบวนการเผาของดินขาว โดยให้อุณหภูมิที่เหมาะสมจนเกิดเป็น metakaolin หรือเป็นการผ่านกระบวนการดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผ่านการเผาแล้ว เป็นการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลออก ซึ่งจะนำไปตามสมการ



โดยที่  $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  คือ Kaolinite และ  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  คือ Metakaolinite

ซึ่งจะให้อุณหภูมิในการเผาจะมีทั้งหมด 3 ช่วง โดยที่ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 – 500 °C), ช่วงอุณหภูมิมiddle (600 – 800 °C) และ ช่วงอุณหภูมิสูง (800 – 900 °C) ซึ่งถ้าให้อุณหภูมิมากกว่า 950 °C จะส่งผลให้ metakaolin เกิดการสลายตัว ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วง 600 – 800 °C ที่จะสามารถเปลี่ยนเป็น metakaolin ได้อย่างสมบูรณ์

#### ความเข้มข้นของเบส

ซึ่งเบสที่นิยมใช้กันที่สุดก็คือ โซเดียมซิลิเกต (NaOH) โดยที่ความเข้มข้นของเบสที่มีความเหมาะสมที่สุดก็คือ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 โมลาร์ดี ถ้าความเข้มข้นของเบสมากขึ้นก็จะส่งผลให้ ลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เร่งการเกิดผลึกของซีโอไลต์ แต่จะลดขนาดผลึกของซีโอไลต์ และลดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

### ระยะเวลาในการพักสาร (Aging)

ซึ่ง Aging นั้นก็คือ ระยะเวลาในการเกิดอะลูมิโนซิลิเกตเจล ถ้าเพิ่มระยะเวลาการ Aging ก็ จะส่งผลให้อัตราการเกิด nucleation เพิ่มขึ้น และ เพิ่มความเป็นผลึกมากขึ้น แต่จะลดเวลาในการ เกิดผลึก และ มีขนาดของผลึกที่เล็กลง

### อุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ผลึกซีโอไลต์

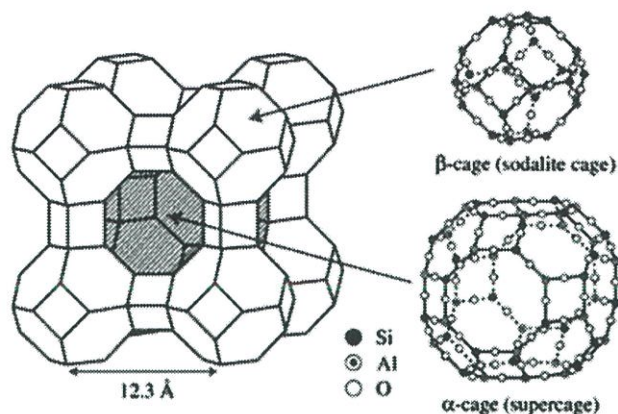
ซึ่งอุณหภูมิและเวลานั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาว ให้อยู่ในเฟสต่าง ๆ ถ้าทำการเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ซึ่งจะส่งผลให้ อัตราการเกิดผลึกที่มากขึ้น และ เพิ่มอัตราการเกิด nucleation ด้วย [8]

### 2.4.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ต่าง ๆ

ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์มีหลากหลายชนิด โดยที่ ซีโอไลต์แต่ละชนิดก็จะมีรูปร่าง โครงสร้าง ที่มีความแตกต่างกัน โดยการนำไปใช้งานที่แตกต่างของแต่ละชนิด ซึ่งจะอ้างอิงตามฐานข้อมูล โครงสร้างซีโอไลต์ของ International Zeolite Association (IZA) ซึ่งในปี 2017 พบ มี 232 ชนิด โดยที่มีทั้งหมด 40 โครงสร้าง [31] ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้าง LTA เป็น ซีโอไลต์เอ โครงสร้างแบบฟู จาไซต์ (FAU) ซึ่งจะประกอบไปด้วย ซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย โครงสร้างเบต้า (BEA) และ โครงสร้างมอร์ ดีไนต์ (MOR) ซึ่งได้ทำการยกตัวอย่างมาบางโครงสร้าง เช่น

#### โครงสร้างแบบ LTA (Zeolite A)

ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์เอ มีลักษณะโครงสร้างเป็นลูกบาศก์ (Cubic) โดยโครงสร้างจะ ประกอบไปด้วย โซดาไลต์เคจ (Sodalite cage) ประกอบไปด้วย 24 อะตอม โครงสร้างสามมิติขึ้นอยู่กับ ความบริสุทธิ์ที่จะเปลี่ยนแกนลูกบาศก์ที่มีการเชื่อมต่อกันผ่าน 4 วงแหวน ในหน้าหนึ่งของทรง ลูกบาศก์จะมี 8 ช่องที่ขนานกับ  $\langle 100 \rangle$  จะมี  $\alpha$  - cage อยู่ในโพรง ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.17

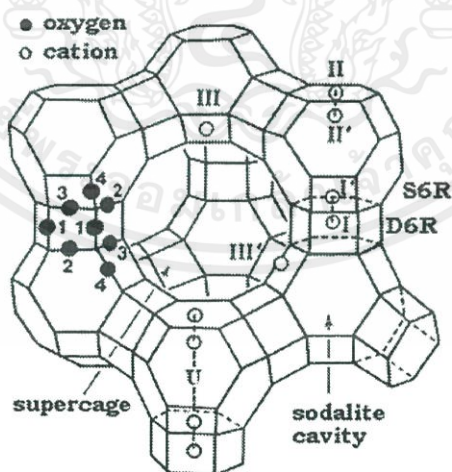


รูปที่ 2.17 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบ LTA (Zeolite A) [8]

### โครงสร้างแบบฟูจาไซต์ (FAU) (Zeolite X, Y)

ซึ่งโครงสร้างฟูจาไซต์นั้น ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งมีซีโอไลต์ที่จัดอยู่ในโครงสร้างแบบฟูจาไซต์อยู่ 2 อย่าง ก็คือ ซีโอไลต์เอ็กซ์และวาย

ซึ่งในซีโอไลต์เอ็กซ์นั้น มีโครงสร้างประกอบด้วย ในแต่ละส่วนที่อยู่ตรงกลางจะเป็นอะตอมของออกซิเจนที่แตกต่างกันจะระบุด้วยตัวเลข 1-4 อะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะสลับกัน ซึ่งในโครงสร้างจะประกอบด้วย โครงสร้างปฐมภูมิ (Double 6 rings : D6R) อยู่ในโพรง sodalite ที่ด้านตรงข้ามของ D6R จากด้าน I, II ซึ่งภายในช่อง sodalite จะเข้าใกล้ วงแหวนเดี่ยวหกวง (S6R) เข้าสู่ supercage และมี 4 โพรงขนาดใหญ่จากช่องเปิดของ 12 วงแหวน (Double 6-ring) ซึ่งค่าเฉลี่ยของความยาวพันธะ Si-O ประมาณ 1.618-1.704 อังสตรอม ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.18

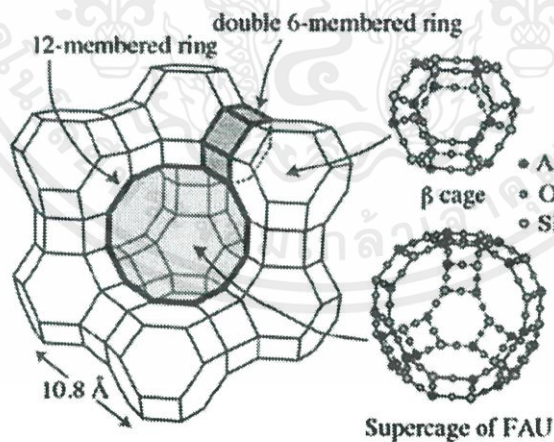


รูปที่ 2.18 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบฟูจาไซต์ (Zeolite X) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในซีโอไลต์วายนั้น เป็นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ออกมาแล้วมีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นซีโอไลต์ที่มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีความหลากหลายที่สุด เนื่องจากภายในรูพรุนและบริเวณพื้นผิวนั้น จะมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุได้ ซึ่งจะนิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแบบของแข็ง อย่างเช่น ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแครกกิงของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ สามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยที่ส่วนใหญ่จะผลิตจากน้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันพืชนั้นจะมีความหนืดที่สูงและอัตราการเผาไหม้ที่ต่ำจึงส่งผลให้ไม่เหมาะกับการใช้ในเครื่องยนต์ของรถยนต์ จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันโดยมีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปก็คือ ซีโอไลต์วาย จะส่งผลให้น้ำมันนั้นมีความหนืดที่น้อยลง และมีอัตราการเผาไหม้ที่สูง จึงมีความเหมาะสมในการใช้ในรถยนต์ได้ อีกทั้งซีโอไลต์วายยังมีข้อดีที่ว่า สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogeneous ยังเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลลงไปได้

ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์วายเป็น supercage 8 โครงสร้าง, sodalite cage 8 โครงสร้าง และวงแหวนคู่ของโครงสร้างวงแหวนจากการจับกันของ 6 โครงสร้างปฐุมภูมิ (Double 6-ring) จำนวน 16 หน่วย เมื่อมองลึกเข้าไปในโครงสร้างช่องเปิด 12-ring windows ที่จับกันจนเกิดโพรง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 7.4 อังสตรอม แต่เนื่องจากทรงสี่หน้าของโพรงที่สมมาตรจึงทำให้ช่องตรง ๆ ตลอดแนวไม่สามารถเกิดขึ้นได้ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าน้ำและแอมโมเนียมที่ผ่านเข้าไปในโครงสร้าง supercage จะถูกกักเก็บแคใน supercage เท่านั้นไม่สามารถเข้าไปในช่องว่างใน sodalite cage ได้ดังนั้น การดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้แค่ภายในโครงสร้าง supercage ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์วายจะสังเกตได้จากรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบฟูจาไซด์ (Zeolite Y) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.7 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์

ซึ่งในปัจจุบันนี้มีการนำซีโอไลต์ในหลากหลายด้านในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง กระบวนการในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นต้น ซึ่งสามารถประยุกต์ได้หลายอย่าง ซึ่งหลักๆที่นิยมใช้ จะแบ่งได้ 3 อย่าง ดังนี้ [36]

#### ตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchanger)

ซึ่งในซีโอไลต์จะมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์บริเวณพื้นผิว ซึ่งจะนิยมไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน ลดความกระด้างของน้ำโดยใช้ซีโอไลต์แทนฟอสเฟตในผงซักฟอก ซึ่งฟอสเฟตนั้นเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยในการแลกเปลี่ยนนั้นจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของไอออนบวก เช่น ขนาด ประจุ
- อุณหภูมิ
- ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย
- ชนิดของไอออนบวกที่รวมตัวกับไอออนบวกในสารละลาย
- ตัวทำละลาย
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

#### ตัวดูดซับ (Adsorbent)

โดยอาศัยหลักการมาจากความสามารถในการคัดแยกขนาด รูปร่าง และการมีขั้ว มีเพียงโมเลกุลที่มีขนาด และ รูปร่างที่เล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์เท่านั้นที่จะสามารถดูดซึมผ่านเข้ารูพรุนได้ นอกจากนี้ ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อัตราการแพร่ผ่านที่แตกต่างกันออกไป โดยที่สารบางชนิดแพร่เข้าและออกจากโครงสร้างได้ดีกว่า สารบางชนิดอาจจะติดค้างอยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งจะนิยมใช้ในการดูดซับโลหะในน้ำเสีย โดยปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ
- สภาพในการดูดซับ (อุณหภูมิ, ความเข้มข้น, ความดัน, พลังงานศักย์)

#### ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

เนื่องจากซีโอไลต์มีความเสถียรภาพทางความร้อน ความเป็นกรด และ ความจำเพาะต่อขนาดและรูปร่างของโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเป็นของแข็งที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการมาใช้งาน สามารถใช้ได้เป็นทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กระบวนการแครกกิงในกระบวนการปิโตรเลียม ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไปโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rohani Abu Bakar และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว โดยทำการเปรียบเทียบซิลิกาที่สังเคราะห์ได้โดยการเติมกรด ได้แก่ Hydrochloric acid, Sulfuric acid และ ซิลิกาที่สังเคราะห์โดยไม่ใช้กรด รวมถึงการเปรียบเทียบซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์โดยใช้ อุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 500°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C โดยทำการ สังเคราะห์ซิลิกาซึ่งเริ่มจากการล้างทำความสะอาดเปลือกข้าวด้วยน้ำปอดประจุ จากนั้นทำการ อบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อทำอบแห้งแล้วเปลือกข้าวจะเข้าสู่ขั้นตอน acid treatment ด้วย Hydrochloric acid และ Sulfuric acid ความเข้มข้น 0.5 M อุณหภูมิ 60°C และปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากการกรองกรดออกและทำการล้างเปลือกข้าวด้วยน้ำปอด ประจุ แล้วจึงทำการอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการเผา ในอากาศโดยนำเปลือกข้าวที่ผ่านการ acid treatment และไม่ผ่านการ acid treatment เผาที่ อุณหภูมิ 500°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ ผลการสังเคราะห์ซิลิกาด้วย SEM, FTIR, XRD, XRF และ BET และจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ ว่าซิลิกาแบบ amorphous ที่ความบริสุทธิ์ 99% สามารถสังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วยกรด hydrochloric หรือ sulfuric และทำการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมี BET surface area ที่สูง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการใช้งานด้าน adsorbent หรือ catalyst support ในปฏิกิริยาสังเคราะห์ทางเคมี

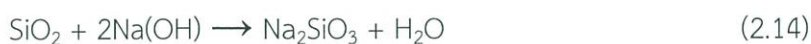
Jun Zhao และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ Zeolite Y และ ประสิทธิภาพในการแตกตัวให้เป็น mesoporous โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ pluronic P123 เป็น แม่แบบ โดยวิธีสังเคราะห์ Zeolite Y นั้นทำได้โดยการนำแม่แบบไปรวมกับอะลูมิเนียมซิลิเกตเจล โดยมี อัตราส่วนดังนี้  $0.42 \text{ Na}_2\text{O} : 0.074 \text{ Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : 17.13 \text{ H}_2\text{O} : x\text{P123}$  โดยที่  $x$  แทนอัตราส่วน โมลของ P123 :  $\text{SiO}_2$  จะกำหนดให้เป็น 0, 0.001, 0.003, 0.005 โดยนำไปใส่ในอโต้เคลบแล้วทำ การ Hydrothermal ที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาอบแล้วทำการ เผาที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายใต้ออกซิเจน แล้วจะได้ออกมาเป็น Zeolite Y แบบ Mesoporous ที่แตกต่างกัน แล้วก็ดูความเสถียรของ Zeolite Y โดยการใส่ P123 เข้าไปเป็นสารลดแรงตึงผิว ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย  $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$  ที่ความเข้มข้น 1 M เป็นจำนวน 3 ครั้ง และ โดยทำในระบบการไหลที่ต่อเนื่อง 100% เป็น 25 mL/600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้จาก kaolin (50%), alumina gel (15%), USY sample (35%) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พอเสร็จแล้วนำมา บด และ กรอง 40-60 mesh โดยตัวเร่งปฏิกิริยา (5g) ทำในไอน้ำที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยทั้งหมดที่กล่าวมานี้ นำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง SEM, TEM, XRD, XRF, BET,  $\text{NH}_3$ -TPD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากผลการทดลองพบว่า ให้อัตราส่วน  $P123/SiO_2 = 0.003$  ทำให้มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ที่ดีที่สุด

R.M. Mohamed และคณะ [39] ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายโดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากเปลือกข้าวในประเทศอียิปต์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ซิลิกาที่เริ่มจากการล้างเปลือกข้าวด้วย distilled water เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เกาะอยู่ภายนอกเปลือกข้าว จากนั้นทำการปั่นกวนในกรด HCl เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนประเภทโลหะ จากนั้นทำการอบให้แห้ง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ซิลิกาสำหรับใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วาย โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายโดยเริ่มจากการเตรียม seed gel โดยเติมสารละลาย  $Na_2SiO_3$  ที่เตรียมจากซิลิกาจากเปลือกข้าว ผสมกับสารละลาย Sodium aluminate จากนั้นทำการปั่นกวนให้เข้ากันแล้วทำการ aging และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องจะทำให้เกิดเป็น seed gel จากนั้นทำการเตรียม feedstock gel โดยใช้ขั้นตอนเดียวกับการเตรียม seed gel แต่จะไม่ทำการ aging จากนั้นทำการผสมและปั่นกวน seed gel และ feedstock gel เข้าด้วยกันแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองและล้าง แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะได้ ซีโอไลต์วายและทำการตรวจวัดซีโอไลต์วายโดยใช้ XRD, SEM และ BET และจากผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถสรุปได้ว่าซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวมีประสิทธิภาพที่เพียงพอ สำหรับการใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายที่มีความบริสุทธิ์และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ Uniform

N.M. Hieu และคณะ [40] ได้ศึกษาการแยกซิลิกาออกจาก activated carbon โดยใช้แกลบจากประเทศเวียดนาม ซึ่งจะศึกษาประสิทธิภาพของการแยกซิลิกา โดยมีวิธีแยก 2 วิธี โดยวิธีแรกจะเป็นวิธีการทางกายภาพ ใช้ระบบการแยกโดยใช้เครื่องปั๊มดูดอากาศ ภายใต้การไหลของอากาศที่ต่างกัน แล้วจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารตัวอย่างที่ใส่เข้าไปในระบบ โดยอนุภาคคาร์บอนจะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า จึงเคลื่อนที่ขึ้นและเก็บใน chamber แทนด้วยสัญลักษณ์ M1 ส่วนอนุภาคของซิลิกาที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่าจะลงไปที่ด้านล่างของท่อ และเก็บใน chamber อื่น แทนด้วยสัญลักษณ์ M2 และวิธีที่สองคือวิธีการทางเคมี โดยมีสมการแสดงความเกี่ยวข้องของซิลิกา และ NaOH ดังนี้



โดยจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดดังนี้ ความเข้มข้นของ NaOH อยู่ที่ 3-6 M, อัตราส่วนระหว่าง NaOH กับ ซีโอไลต์อยู่ที่ 0.3 - 0.6, ความดัน 1-3 at. และ อุณหภูมิอยู่ที่ 100-133 องศาเซลเซียส โดยหลังจากการบดแล้ว นำซีโอไลต์ที่ผสมกับ NaOH ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ จากนั้นนำไปใส่ใน autoclave เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการกรองแล้วล้าง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง และทำให้เป็นกลางด้วยกรด จากนั้นทำการกรองและล้าง แล้วนำไปอบอีก รอบเพื่อที่จะได้ซิลิกอนไดออกไซด์

โดยปัจจัยทั้งหมดจะส่งผลการแยก ดังนี้ เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการแยกดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 133 องศาเซลเซียส ก็จะเป็นอันตรายเมื่อทำการทดสอบ เป็นเพราะปฏิกิริยาที่ 1 เป็นปฏิกิริยาความร้อน ( $\Delta H = 55.5 \text{ KJ/mol}$ ) ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลต่อการแยกอย่างมาก ซึ่งหากเพิ่มความเข้มข้น NaOH ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 6 M ก็จะทำให้เกิดปัญหาต่อการกรอง โดยถ้าเพิ่มอัตราส่วนของ NaOH กับ ซีเล้า ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพมากขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนเป็น 0.9 จะส่งผลให้แยกได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ข้อเสียก็คือจะใช้ NaOH เป็นจำนวนมาก จึงไม่เหมาะสม วิธีการแยกทางกายภาพนั้นให้ประสิทธิภาพที่ต่ำจึงไม่เหมาะสมกับการใช้วิธีนี้ หากต้องการประสิทธิภาพที่สูงจะใช้วิธีทางเคมี โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดและเหมาะสมสำหรับการแยกนั้น คือการใช้อุณหภูมิ 133 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของ NaOH 6 M และอัตราส่วนของ NaOH กับ ซีเล้า เป็น 0.6 g/g โดยใช้เวลาในการแยกนั้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงที่สุดถึง 95.6 %

Tao Li และคณะ [41] ได้ศึกษาการเปลี่ยนน้ำมันทำอาหารที่ใช้แล้วมาทำเป็น เชื้อเพลิง ไอพ่น โดยใช้ Zeolite ทั้ง 3 ตัว คือ Meso-Y, SAPO-34 และ HY ที่เติมด้วย นิกเกิล ซึ่งในทางด้านอุตสาหกรรมการบินนั้นได้หาแนวทางการแก้ไขเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิง และ ลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ซึ่งได้นำน้ำมันทำอาหารที่ใช้แล้วมาเปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิงไอพ่นได้ โดยที่ เชื้อเพลิงไอพ่นนั้นจะประกอบไปด้วย alkanes ( $C_8-C_{16}$ ) และ aromatic hydrocarbon และ น้ำมันทำอาหาร จะประกอบไปด้วย ไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมัน ผ่านกระบวนการ decarbonylation ซึ่งจะใช้ Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดย Zeolite ที่ใช้ ทั้ง 3 ตัวก็คือ Meso-Y, SAPO-34 และ HY ที่เติมด้วยนิกเกิล จะแสดงถึง Selectivity ของ alkane ที่สูง และ Selectivity ของ aromatic hydrocarbon ที่ต่ำ โดยวิธีการทำนั้น ก็คือเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน โดยใช้  $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  2.99 g ในน้ำ DI 10 ml แล้วใส่ Zeolite 5.4 g แล้วมาทำการ stir ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบที่ 70 °C ใช้เวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำมาเผาที่ air 550 °C 4 ชั่วโมง (heating rate 5 °C / min) แล้วมาทำในไฮโดรเจน 500 °C 4 ชั่วโมง (flow rate = 350 ml/min) และ (heating rate 4 °C / min) และนำน้ำมันทำอาหารที่ใช้แล้ว มาอบให้แห้งเพื่อที่จะไล่ไอน้ำออก และนำน้ำมันมา 100 ml และ Zeolite ที่มีอัตราส่วน 20:1 ถูกใส่เข้าไปใน Batch reactor แล้วทำการ sealed ด้วยไฮโดรเจน ภายใต้ความดัน 3 MPa ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการ stir ที่ 500 รอบ/นาที ที่ 390 °C 8 ชั่วโมง โดยทั้งหมดจะถูกตรวจสอบได้โดยใช้ BET,  $NH_3$ -TPD, GC-MS พบว่าการนำน้ำมันทำอาหารที่ใช้แล้วมาเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงไอพ่น โดยจะเกิด deoxygenate เป็น heptadecane ( $C_{17}H_{36}$ ) และ pentadecane ( $C_{15}H_{30}$ ) ผ่านการ decarbonylation เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ alkane สายโซ่ยาวแตกตัวเป็น alkane สายโซ่สั้น ( $C_8-C_{16}$ ) โดยใส่ Zeolite Meso-Y จะมี Selectivity ของ alkane อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



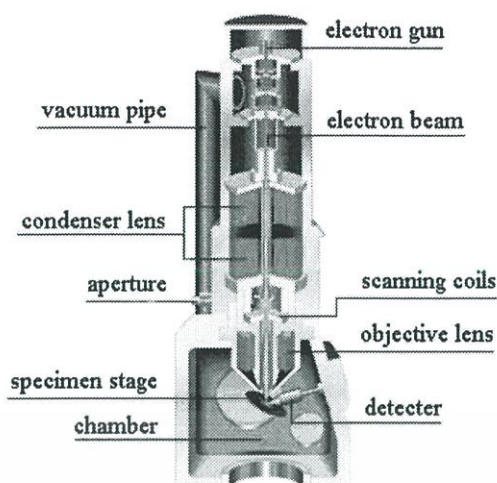
ด้วยความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการแยก Zeolite Y ออกจากตัวอย่าง โดยพบว่า ค่า conversion มีการเพิ่มขึ้นตาม alcohol/oleic acid molar ratio แต่ เมื่อค่า alcohol/oleic acid molar ratio เท่ากับ 9/1 ค่า conversion มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยค่า conversion ยังมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่ค่า conversion จะเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเกิน 45 นาที และค่า conversion มีการเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น Zeolite Y ที่แยกได้จากตัวอย่างเมื่อนำไปทำให้แห้งที่ 100 °C และเผาที่ 500 °C จากนั้นนำกลับไปใช้ใหม่โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง พบว่าค่า conversion ลดลงจาก 85% เหลือ 77% ดังนั้นการใช้ Zeolite Y ในรูป H form จากดินขาวในการสังเคราะห์ น้ำมันไบโอดีเซลจาก oleic acid ให้ค่า conversion สูงสุดเท่ากับ 85% ในเงื่อนไขเวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 70°C alcohol/oleic acid molar ratio เท่ากับ 6/1 และ Zeolite Y 5 wt%

## 2.6 เทคนิคในการตรวจวัด

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ซึ่งเป็นเทคนิคในการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่าง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่จะเห็นได้ 3 มิติ โดยผ่านการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยทำการส่องกราดลงบนพื้นผิวของวัสดุ โดยมีกำลังขยายถึง 20 – 800,000 เท่า

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น จะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน โดยที่กลุ่มของอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้แคบลง และ เพื่อเพิ่มความเข้มของอิเล็กตรอนจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งมีหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และ เมื่อตกกระทบลงบนวัตถุจะมีขนาดในช่วง 5 – 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนพื้นผิว ทำให้เกิดการปล่อยสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่จับได้มี 2 อย่างก็คือ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) และ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons) ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.20 [44, 45]

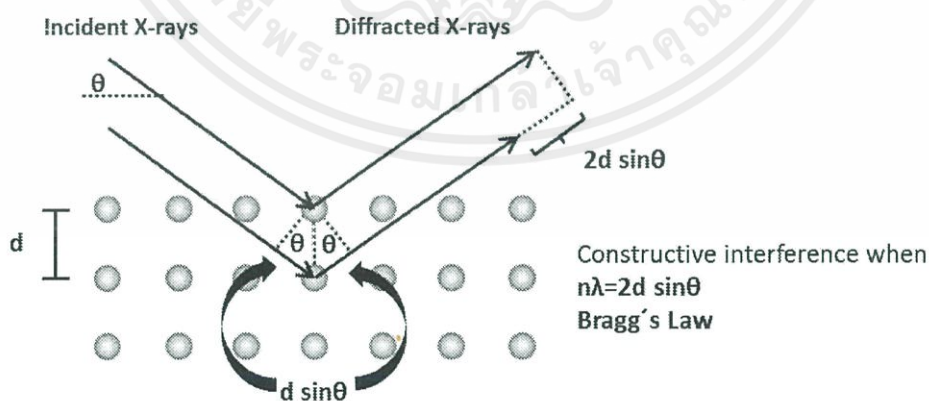


รูปที่ 2.20 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [46]

### 2.6.2 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ซึ่งเป็นเทคนิคในการศึกษาโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

หลักการทำงานเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ออกไปกระทบกับวัตถุที่ต้องการวัดจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับลำรังสีตกกระทบ โดยที่สารประกอบแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ก็จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึก และ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบก็จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับขนาด และ ประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.21 [47, 48]



รูปที่ 2.21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป จะอาศัยหลักการของ Bragg's Law ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

โดยที่  $n$  = ลำดับการสะท้อน

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

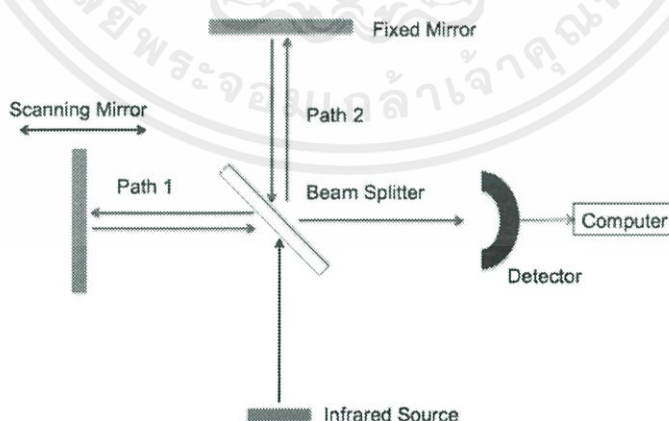
$d$  = ระยะห่างระหว่างผลึก

$\theta$  = มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์

### 2.6.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

ซึ่งเป็นเทคนิคในการศึกษาเกี่ยวกับ หมู่ฟังก์ชันของสารต่าง ๆ โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงอินฟราเรด ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วง  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$

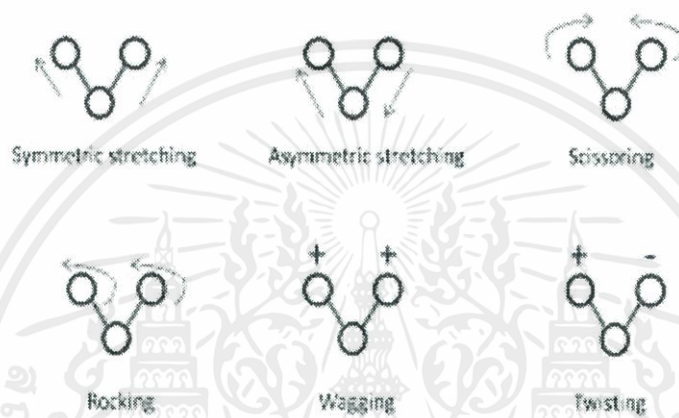
หลักการทํางาน ก็คือ ฉายรังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดจากสารเฉื่อย (He, Ne laser) ถูกทำให้ร้อน โดยช่วงอุณหภูมิอยู่ที่  $1,000 - 1,800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดฉายไปยังอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ (Interferometer) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Moving mirror) และกระจกที่อยู่กับที่ (Fixed mirror) โดยกระจกทั้งสองจะตั้งฉากกัน ผ่านตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อเป็นการแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ซึ่งส่วนหนึ่งจะทะลุเข้าสู่กระจกอยู่กับที่ อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกที่เคลื่อนที่ได้ โดยที่แสงเลเซอร์ปรับระยะเวลาการเคลื่อนที่ของกระจกให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองสวนกันและมารวมกับเป็นแสงเดียวผ่านไปยังสารตัวอย่าง และ ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ความถี่ของแต่ละตัว ซึ่งจะเป็นไปตาม รูปที่ 2.22 [49]



รูปที่ 2.22 องค์ประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectroscopy [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ผลของ FTIR นั้น เมื่อแสงอินฟราเรดตกกระทบโมเลกุลสารจะเกิดแรงกระทำ (Interaction) ระหว่างแสงกับโมเลกุลของสาร โดยที่แสงอินฟราเรดก็จะมีควมถี่ที่ตรงกับควมถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุลของสารจะถูกดูดกลืนไป เรียกว่า เรโซแนนซ์ (Resonance) ดังนั้นควมถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนซึ่งจะต้องตรงกับควมถี่ของการสั่นของพันธะ โดยจะมีลักษณะการสั่นที่มีหลากหลายและแตกต่างกันออกไป เช่น การสั่นแบบยืด (Stretching) ซึ่งเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างอะตอม มีทั้งแบบสมมาตร (Symmetric) และไม่สมมาตร (Asymmetric) หรือ การสั่นแบบงอ (Bending) ซึ่งมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงมุมของพันธะ ซึ่งควมถี่ของการสั่นของพันธะทั้งหมด จะเห็นได้จากรูปที่ 2.23 [51]



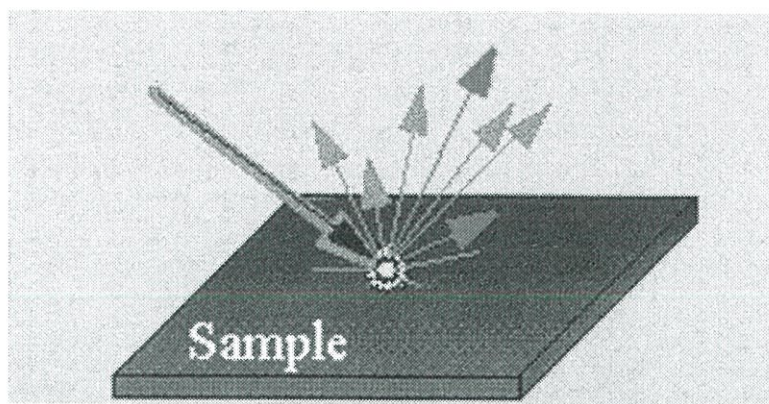
รูปที่ 2.23 การสั่นของโมเลกุลในรูปแบบต่าง ๆ [52]

#### 2.6.4 เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)

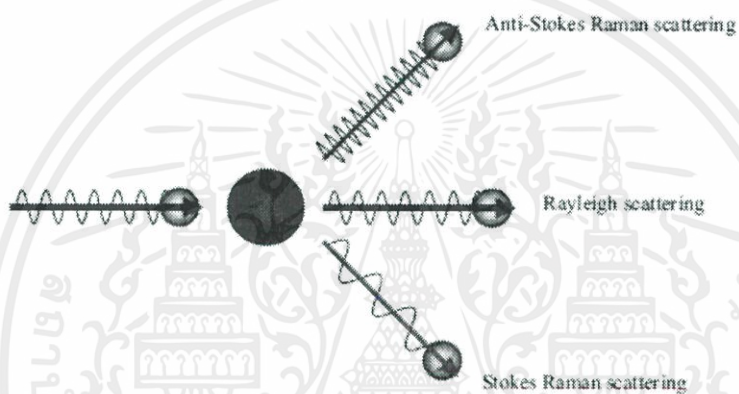
เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษา องค์ประกอบทางเคมี โดยอาศัยหลักการกระเจิงของอนุภาคแสงเมื่อชนกับโมเลกุลของสาร โดยจะสนใจที่อนุภาคแสงที่มีการกระเจิงแบบรามาน

หลักการทำงาน โดยให้แสงเลเซอร์ความเข้มสูงเข้าสู่วัสดุ ซึ่งโมเลกุลในวัสดุจะถูกกระตุ้นแล้วทำให้เกิดการกระเจิงของแสงออกมา โดยแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกับแสงเลเซอร์ที่มากระตุ้น ซึ่งจะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น จะเรียกว่า แสงเลย์ไร (Rayleigh scatter) ส่วนลำแสงอีกส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก จะมีการกระเจิงแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต่างออกไป เรียกลำแสงนี้ว่า รามาน (Raman scatter) หากอนุภาคของแสงเข้าชนโมเลกุลในสภาวะพื้น ความถี่ของการกระเจิงแสงหลังการชนจะลดลง เรียกว่า stokes raman scattering แต่ถ้าหากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น ความถี่ของการกระเจิงแสงหลังจากการชนเพิ่มขึ้น เรียกว่า anti-stokes raman scattering โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นการวิเคราะห์จากควมถี่ของการกระเจิงแสง ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2. 24, 2.25 และ 2.26 [53, 54]

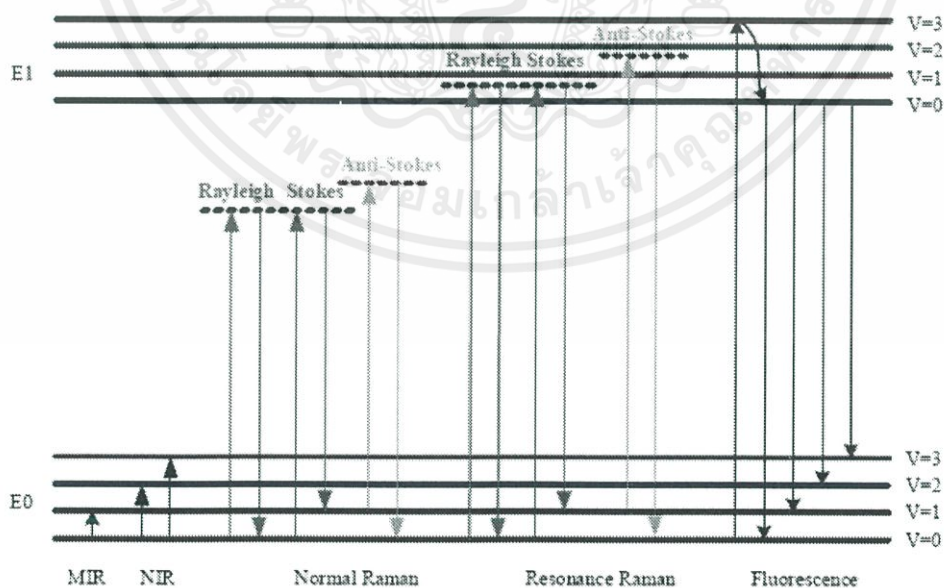
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 หลักการของ Raman Spectroscopy [53]



รูปที่ 2.25 การเกิด scattering แบบต่าง ๆ [54]



รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนพลังงานระดับพลังงานของ electron [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

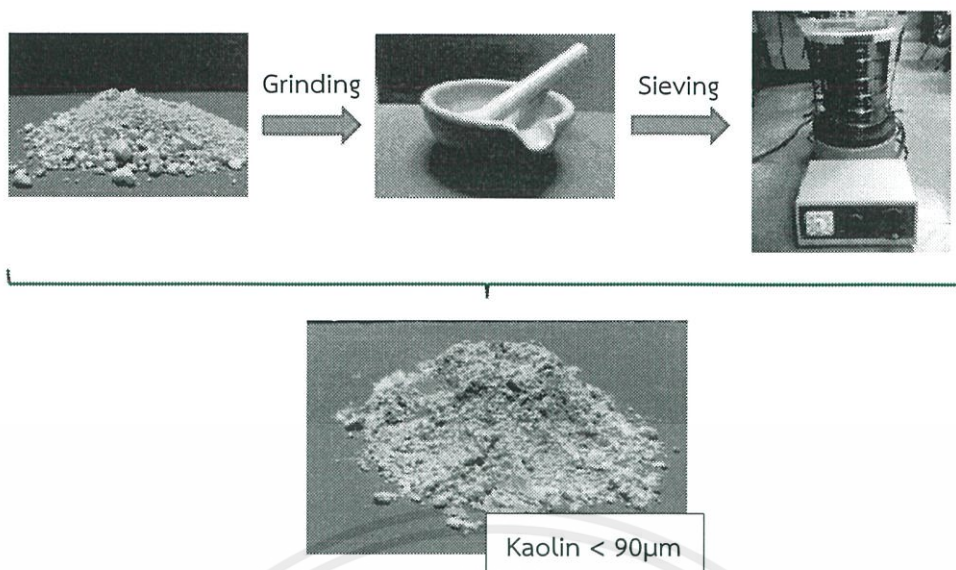
### วิธีดำเนินการทดลอง

เนื่องจากการศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วาย จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์วายเป็นองค์ประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต ผู้ทำการวิจัยจึงคาดว่าดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบเป็นกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตจะสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายได้ซึ่งโดยทั่วไปการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจะอาศัยกระบวนการนำดินขาวไปเผาเพื่อแตกโครงสร้าง และ กำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อฟอร์มเป็นซีโอไลต์ ซึ่งกระบวนการเผาเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานสูง อีกทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 2 ครั้งเป็นกระบวนการในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายในการวิจัยนี้ โดยในการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกนั้น ทำเพื่อการเปลี่ยนโครงสร้าง และ ไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สองเพื่อทำการฟอร์มเป็นซีโอไลต์ โดยวิธีนี้จะใช้พลังงานในกระบวนการที่น้อยกว่า สามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ดินขาวจากจังหวัดลำปางในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วาย

#### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

##### 3.1.1 ดินขาว และ การคัดกรองขนาด

เนื่องจากดินขาวเนื่องจากดินขาวตามธรรมชาตินั้นมีการผสมกันของดินขาวหลากหลายขนาด จึงจำเป็นต้องใช้ครกบดดินขาวให้เป็นผง จากนั้นจึงนำดินขาวที่มีลักษณะเป็นผงไปทำการแยกขนาด โดยใช้เครื่องแยกขนาด (Sieving) โดยจะทำการเลือกดินขาวที่มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมโครเมตรไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการแยกขนาดดินขาว และดินขาวที่แยกได้

### 3.1.2 เปลือกข้าว

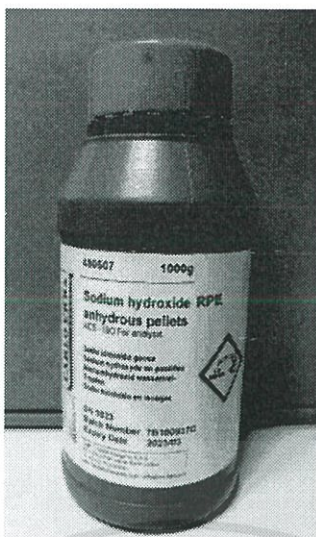
เนื่องจากเปลือกข้าวมีส่วนประกอบที่เป็นซิลิกาประมาณ 80 % ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซิลิกาเพื่อใช้เป็นแหล่งของซิลิกาที่ใช้สำหรับการเติมซิลิกาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วย

### 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เป็นสารละลายในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่หนึ่ง และ ครั้งที่สอง โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์มีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นของแข็งสีขาวลักษณะเป็นเม็ด (beads)
- มีค่ามวลโมเลกุล 39.997 g/mol
- สูตรโมเลกุล คือ NaOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

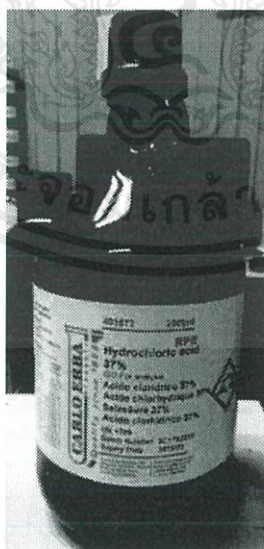


รูปที่ 3.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์

### 3.1.4 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)

กรดไฮโดรคลอริกใช้เป็นสารละลายในการทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน (impurity) เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินขาวและเปลือกข้าว โดยกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการสังเคราะห์มีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นของเหลวสีใส
- มีค่ามวลโมเลกุล 36.461 g/mol
- สูตรโมเลกุล คือ HCl



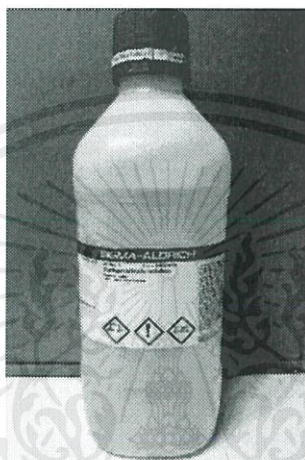
รูปที่ 3.3 กรดไฮโดรคลอริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution)

สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งของซิลิกาที่ทำการเติมลงในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการสังเคราะห์มีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นของเหลวสีใส
- มีค่ามวลโมเลกุล 122.06 g/mol
- สูตรโมเลกุล คือ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$



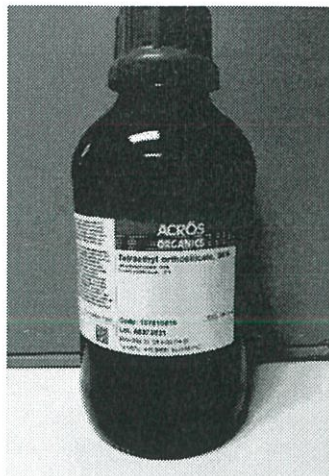
รูปที่ 3.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

### 3.1.6 สารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate solution)

สารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตเป็นสารละลายที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งของซิลิกา ที่ทำการเติมลงในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการสังเคราะห์มีคุณสมบัติ ดังนี้

- เป็นของเหลวสีใส
- มีค่ามวลโมเลกุล 208.33 g/mol
- สูตรโมเลกุล คือ  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

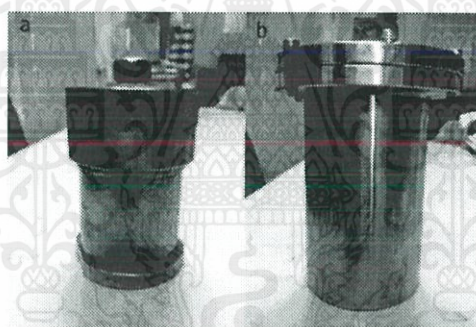


รูปที่ 3.5 สารละลายเตตระเอทิลอโทซิลิเกต

### 3.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากดินขาวด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

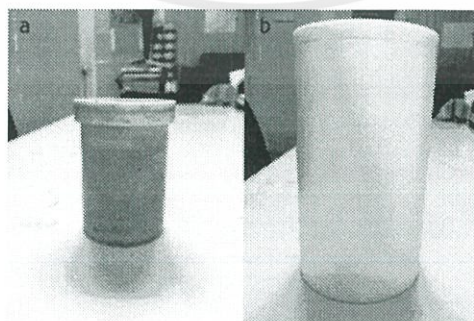
#### 3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

##### 3.2.1.1 ออโต้เคลป (Autoclave) ขนาด 100 ml และ 500 ml



รูปที่ 3.6 a) ออโต้เคลปขนาด 100 ml b) ออโต้เคลปขนาด 500 ml

##### 3.2.1.2 เทฟลอนไลน์ (Teflon lined) ขนาด 100 ml และ 500 ml



รูปที่ 3.7 a) เทฟลอนไลน์ขนาด 100 ml b) เทฟลอนไลน์ขนาด 500 ml

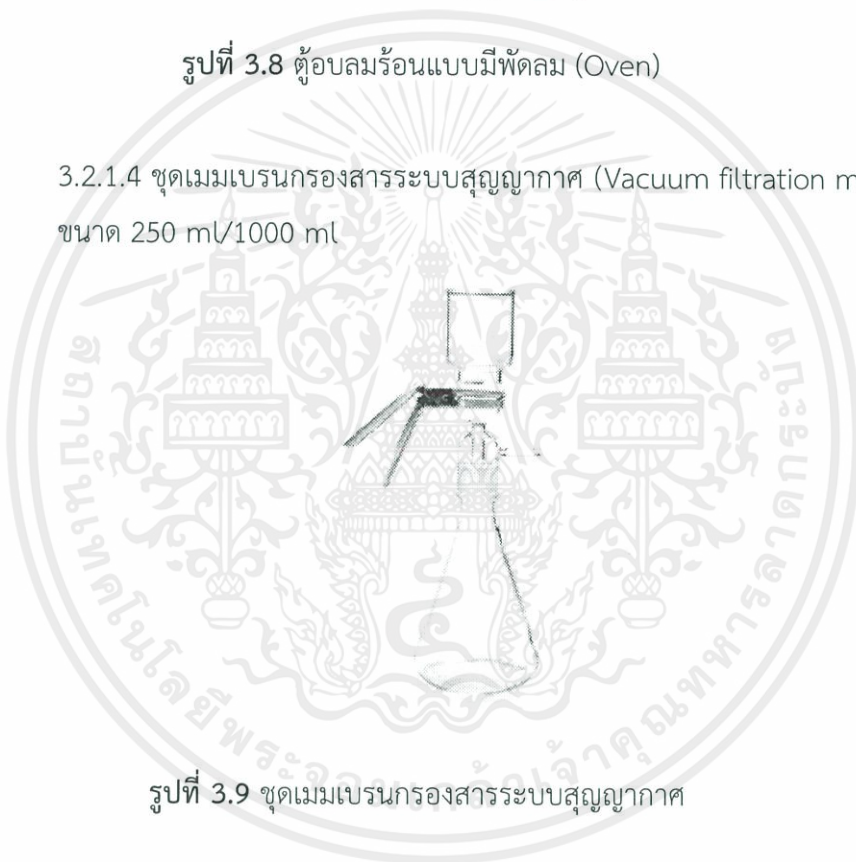
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Oven) จากบริษัท Memmert รุ่น UF 16  
ความจุ 161 ลิตร ช่วงอุณหภูมิ 5 °C ถึง 300 °C



รูปที่ 3.8 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Oven)

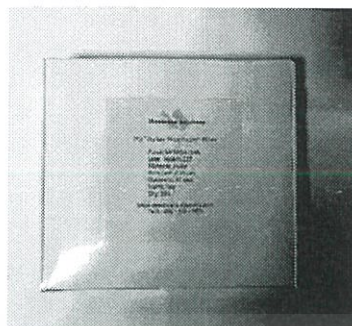
3.2.1.4 ชุดเมมเบรนกรองสารระบบสุญญากาศ (Vacuum filtration membrane)  
ขนาด 250 ml/1000 ml



รูปที่ 3.9 ชุดเมมเบรนกรองสารระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

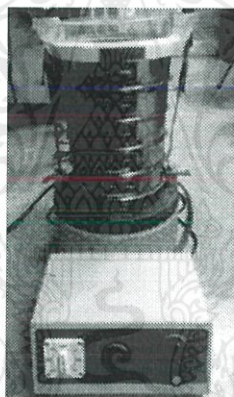
3.2.1.5 เยื่อกรองไนลอน (Nylon membrane filters) ขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน  
เส้นผ่านศูนย์กลางเยื่อกรอง 47 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 เยื่อกรองไนลอน

3.2.1.6 ปีกเกอร์แก้ว (beaker) ขนาด 250 ml

3.2.1.7 เครื่องเขย่าคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรง (sieving machine) จากบริษัท  
Retch รุ่น AS200



รูปที่ 3.11 เครื่องเขย่าคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรง

3.2.1.8 ปั๊มสุญญากาศ (Rotary pump)



รูปที่ 3.12 ปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

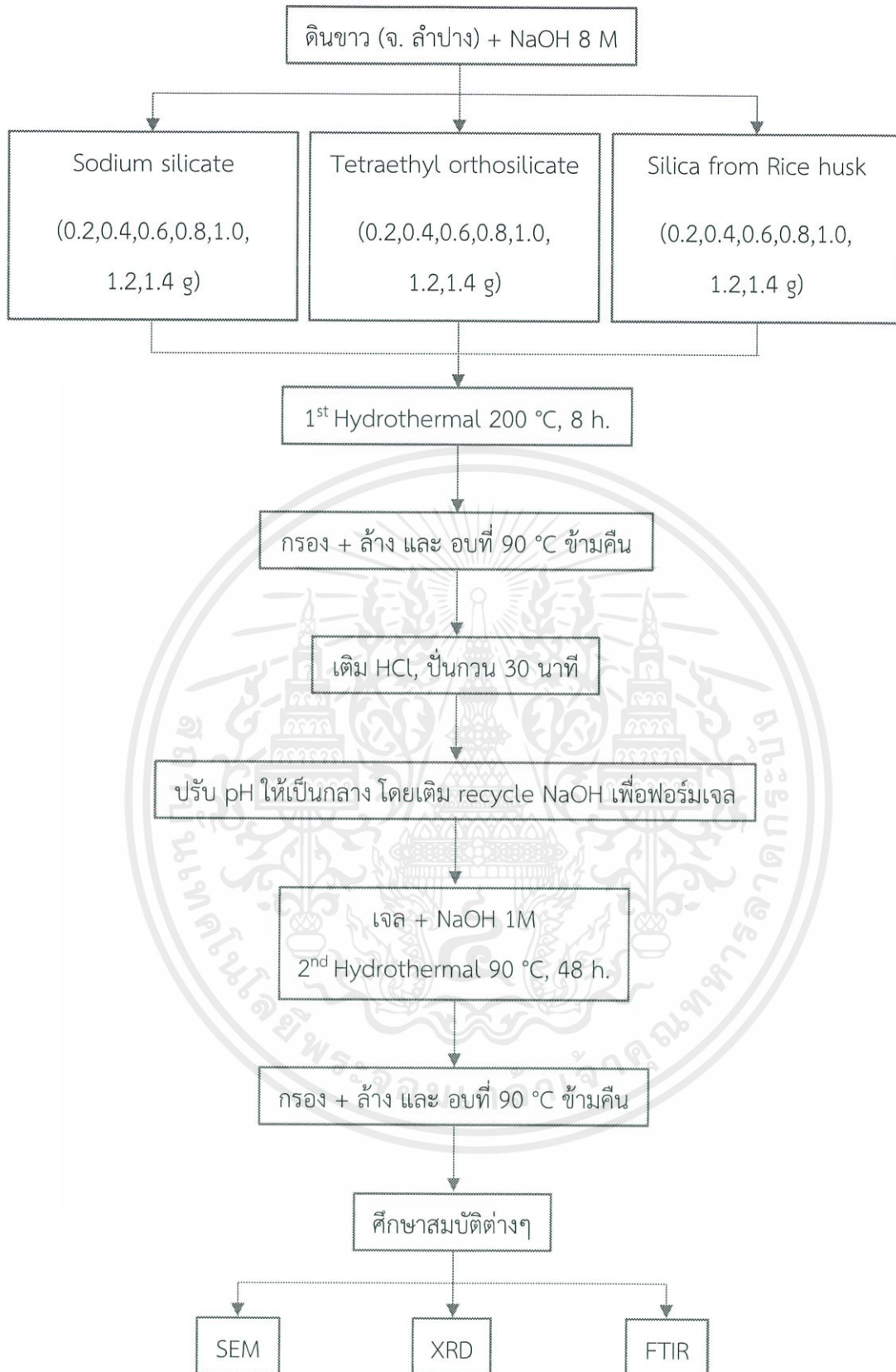
3.2.1.9 เครื่องชั่งสาร (Weight balance)

3.2.1.10 เครื่องปั่นกวนสาร (Stirrer)

3.2.1.11 กระบอกตวง (Cylinder)

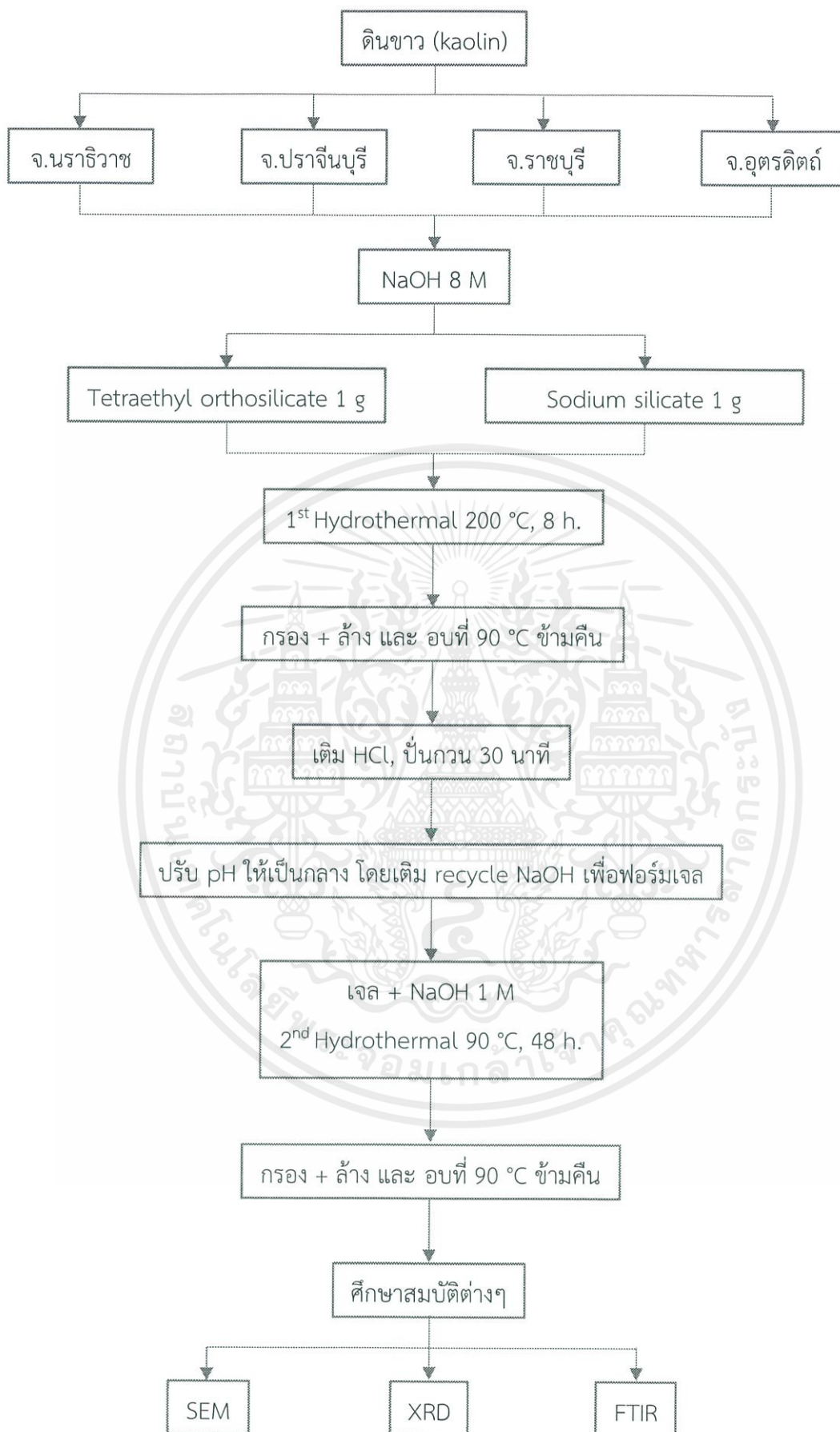


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



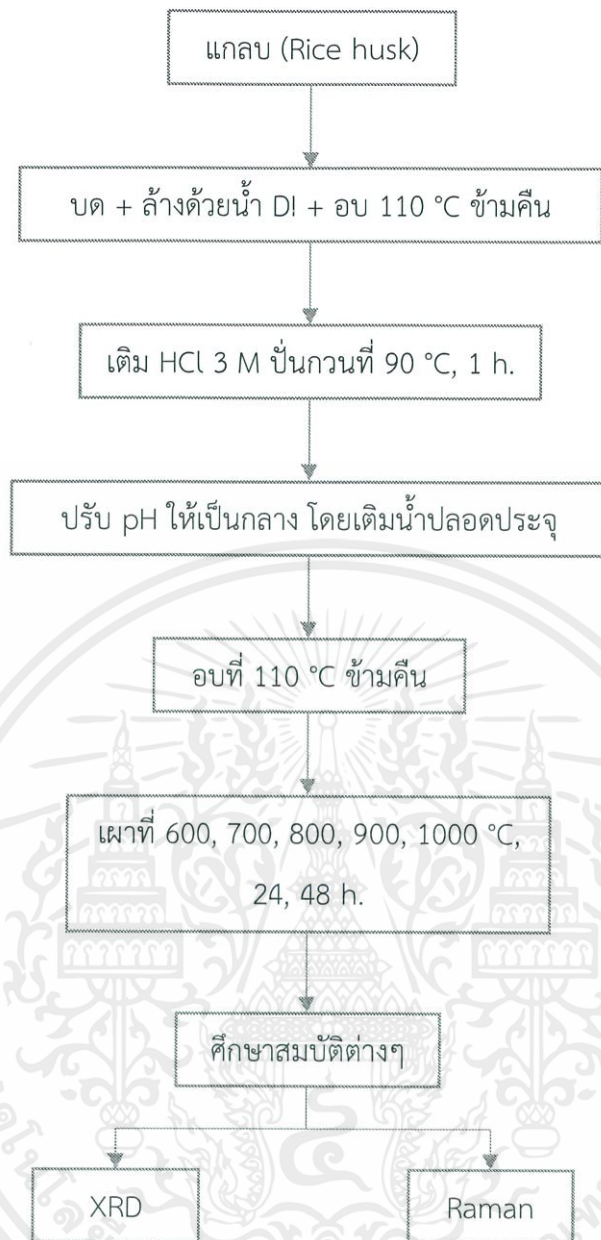
รูปที่ 3.13 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วย ใช้แหล่งซิลิกาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วย ดินขาวที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกาที่ได้จากเปลือกข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาว จ.ลำปาง

จากการศึกษาการทำกรทดลองจากงานวิจัยของ Jing-Quan Wang, Ya-Xi Huang, Yuanming Pan, และ Jin-Xiao Mi ที่ทำการไฮโดรเทอร์มอลดินขาวที่ 240 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งมีการใช้ดินขาว 1.5 กรัม และเติมโซเดียมซิลิเกต 0.6 กรัม โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 M แต่ในการทดลองนี้จะใช้อุณหภูมิที่ 200 °C และเติมซิลิกาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

#### 3.2.2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายโดยการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ทำการเติม ที่มีผลต่อซีโอไลต์ว้ายที่ทำการสังเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

1. เนื่องจากดินขาวมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงจำเป็นต้องนำไปบดให้เป็นผงละเอียดและกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
2. ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในเจือจาง 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัมกับดินขาวจนมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M
3. นำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาแช่ในถังน้ำแข็งทันที
4. หลังจากที้อโตเคลปเย็นลงแล้ว นำสารผสมที่ได้มากรองแยกดินขาวออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยยังต้องเก็บสารละลายไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป
5. นำดินขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. ผสมดินขาวเข้ากับน้ำปริมาตร 10 ml บั่นกวนเพื่อให้ดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอ
7. เมื่อดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 wt% ปริมาตร 5 ml ลงไป บั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
8. กรองสารละลายกรดที่มีดินขาวอยู่ แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางอีกครั้งผ่านการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เก็บไว้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก ในขั้นตอนนี้สารละลายจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นเจลสีขาว
9. ทำการกรองเพื่อแยกเจลออกจากสารละลาย
10. นำเจลที่เก็บไว้มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M
11. ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน
12. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
13. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายโดยการเติมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิ

เกต

ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกตที่ทำการเติมที่มีผลต่อซีโอไลต์วายที่ทำการสังเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

1. เนื่องจากดินขาวมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงจำเป็นต้องนำไปบดให้เป็นผงละเอียดและกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
2. ผสมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกตในเงื่อนไข 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัม กับ ดินขาวจนมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M
3. นำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาแช่ในถังน้ำแข็งทันที
4. หลังจากที่อยู่ไฮโดรเทอร์มอลเรียบร้อยแล้ว นำสารผสมที่ได้มากรองแยกดินขาวออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยยังต้องเก็บสารละลายไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป
5. นำดินขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปอดประจุแล้วปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. ผสมดินขาวเข้ากับน้ำปริมาตร 10 ml บั่นกวนเพื่อให้ดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอ
7. เมื่อดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 wt% ปริมาตร 5 ml ลงไป บั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
8. กรองสารละลายกรดที่มีดินขาวอยู่ แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางอีกครั้งผ่านการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เก็บไว้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก ในขั้นตอนนี้สารละลายจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นเจลสีขาว
9. ทำการกรองเพื่อแยกเจลออกจากสารละลาย
10. นำเจลที่เก็บไว้มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M
11. ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน
12. ล้างด้วยน้ำปอดประจุแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
13. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

### 3.2.2.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายโดยการเติมซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือก

ข้าว

ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวที่ทำการเติมที่มีผลต่อซีโอไลต์วายที่ทำการสังเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เนื่องจากดินขาวมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงจำเป็นต้องนำไปบดให้เป็นผงละเอียด และกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
2. ผสมซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกข้าวในเงื่อนไข 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัม กับดินขาวจนมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M
3. นำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาแช่ในถังน้ำแข็งทันที
4. หลังจากที่อยู่ไฮโดรเทอร์มอลเรียบร้อยแล้ว นำสารผสมที่ได้มากรองแยกดินขาวออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยยังต้องเก็บสารละลายไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป
5. นำดินขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปอดประจุแล้วปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. ผสมดินขาวเข้ากับน้ำปริมาตร 10 ml ปั่นกวนเพื่อให้ดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอ
7. เมื่อดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 wt% ปริมาตร 5 ml ลงไป ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
8. กรองสารละลายกรดที่มีดินขาวอยู่ แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางอีกครั้งผ่านการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เก็บไว้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก ในขั้นตอนนี้สารละลายจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นเจลสีขาว
9. ทำการกรองเพื่อแยกเจลออกจากสารละลาย
10. นำเจลที่เก็บไว้มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M
11. ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน
12. ล้างด้วยน้ำปอดประจุแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
13. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

### 3.2.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาเปลือกข้าว ในกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ดังนี้

1. นำเปลือกข้าวมาทำการบดให้มีขนาดเล็กและทำการล้างด้วยน้ำปอดประจุ
2. นำเปลือกข้าวไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 คืน
3. ทำการปั่นกวนเปลือกข้าวไปในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10% w/v ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. ทำการล้างเปลือกข้าวไปด้วยน้ำปอดประจุเพื่อทำการปรับ pH ให้เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำเปลือกข้าวไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. นำเปลือกข้าวที่ได้ไปทำการเผาในที่อับอากาศที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600, 700, 800, 900 และ 1,000 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมง
7. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

### 3.2.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวแหล่งอื่นๆ

#### 3.2.4.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวแหล่งอื่นๆโดยการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ทำการศึกษาอิทธิพลแหล่งที่มาของดินขาวมีผลต่อซีโอไลต์วายเป็นดินขาวที่ทำการสังเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

1. เนื่องจากดินขาวมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงจำเป็นต้องนำไปบดให้เป็นผงละเอียดและกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
2. ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต 1.0 กรัม กับดินขาวในเงื่อนไขดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ 4 แหล่ง ได้แก่ ได้แก่ จังหวัดนราธิวาส, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุดรธานี จนมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M
3. นำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาแช่ในถังน้ำแข็งทันที
4. หลังจากทีอโตเคลปเย็นลงแล้ว นำสารผสมที่ได้มากรองแยกดินขาวออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยยังต้องเก็บสารละลายไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป
5. นำดินขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. ผสมดินขาวเข้ากับน้ำปริมาตร 10 ml ปั่นกวนเพื่อให้ดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอ
7. เมื่อดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 wt% ปริมาตร 5 ml ลงไป ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
8. กรองสารละลายกรดที่มีดินขาวอยู่ แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางอีกครั้งผ่านการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เก็บไว้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก ในขั้นตอนนี้สารละลายจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นเจลสีขาว
9. ทำการกรองเพื่อแยกเจลออกจากสารละลาย
10. นำเจลที่เก็บไว้มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M
11. ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
13. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

### 3.2.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขาวแหล่งอื่นๆโดยการเติมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต

ทำการศึกษาอิทธิพลของแหล่งที่มาของดินขาวที่มีผลต่อซีโอไลต์วายเป็นดินขาวที่ทำการสังเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

1. เนื่องจากดินขาวมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงจำเป็นต้องนำไปบดให้เป็นผงละเอียดและกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง
2. ผสมสารละลายเตตระเอทิลออลโทซิลิเกต 1.0 กรัม กับดินขาวในเงื่อนไขดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ 4 แหล่ง ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุดรดิตถ์ จนมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M
3. นำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาแช่ในถังน้ำแข็งทันที
4. หลังจากที่อยู่ไฮโดรเทอร์มอลเรียบร้อยแล้ว นำสารผสมที่ได้มากรองแยกดินขาวออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยยังต้องเก็บสารละลายไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป
5. นำดินขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
6. ผสมดินขาวเข้ากับน้ำปริมาตร 10 ml ปั่นกวนเพื่อให้ดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอ
7. เมื่อดินขาวกระจายตัวสม่ำเสมอเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 wt% ปริมาตร 5 ml ลงไป ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
8. กรองสารละลายกรดที่มีดินขาวอยู่ แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางอีกครั้งผ่านการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เก็บไว้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก ในขั้นตอนนี้สารละลายจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นเจลสีขาว
9. ทำการกรองเพื่อแยกเจลออกจากสารละลาย
10. นำเจลที่เก็บไว้มาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M
11. ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน
12. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 คืน
13. เก็บตัวอย่างในภาชนะปิดและเก็บในที่แห้งเพื่อนำไปตรวจวัดคุณสมบัติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์แต่ละเงื่อนไขทำการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดต่างๆ โดยจะทำการตรวจตัวอย่างหลังการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างและเลือกใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุด

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ใช้เครื่องมือตรวจวัดนี้เพื่อวิเคราะห์ทางกายภาพ หรือ สัณฐานวิทยา ของซีโอไลต์วายที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นโดยเครื่องมือวัดนี้ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นจึงต้องนำตัวอย่างซีโอไลต์วายที่จะตรวจวัดไปเคลือบทองด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) เนื่องจากตัวอย่างไม่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าเพื่อให้เห็นภาพได้คมชัดขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการวัดดังนี้

Scanning Electron Microscope: ZEISS, EVO MA10

Magnification: 3000X



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

เพื่อทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) โดยทำการวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังจากทำการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่ 2 โดยใช้เงื่อนไขในการวัดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FTIR Spectrometer: PerkinElmer, Spectrum Two

Measurement mode: Adsorbance

Wavenumber range: 400-4000  $\text{cm}^{-1}$



รูปที่ 3.17 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

### 3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกผ่านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใช้วิเคราะห์ความเป็นผลึกของสารหลังจากการไฮโดรเทอร์มอลทั้ง 2 ครั้งเพื่อดูอิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เงื่อนไขในการวิเคราะห์ ดังนี้

X-ray Diffractometer: Rigaku model

$2\theta$  : 10-80 degree

Power: 40 kV, 40 mA

Increment (Step size): 0.02 degree

Scan speed (Step time): 0.5 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

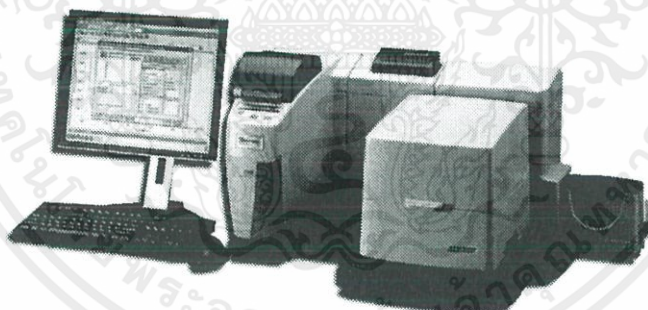


รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึกผ่านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

### 3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามาน สเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิคใช้ในการเพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการสังเคราะห์ซิลิกาที่ได้จากเปลือกข้าว เพื่อที่จะดูอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิในการเผา โดยใช้เงื่อนไขในการวิเคราะห์ ดังนี้

Raman shift:  $100 - 2500 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.19 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี

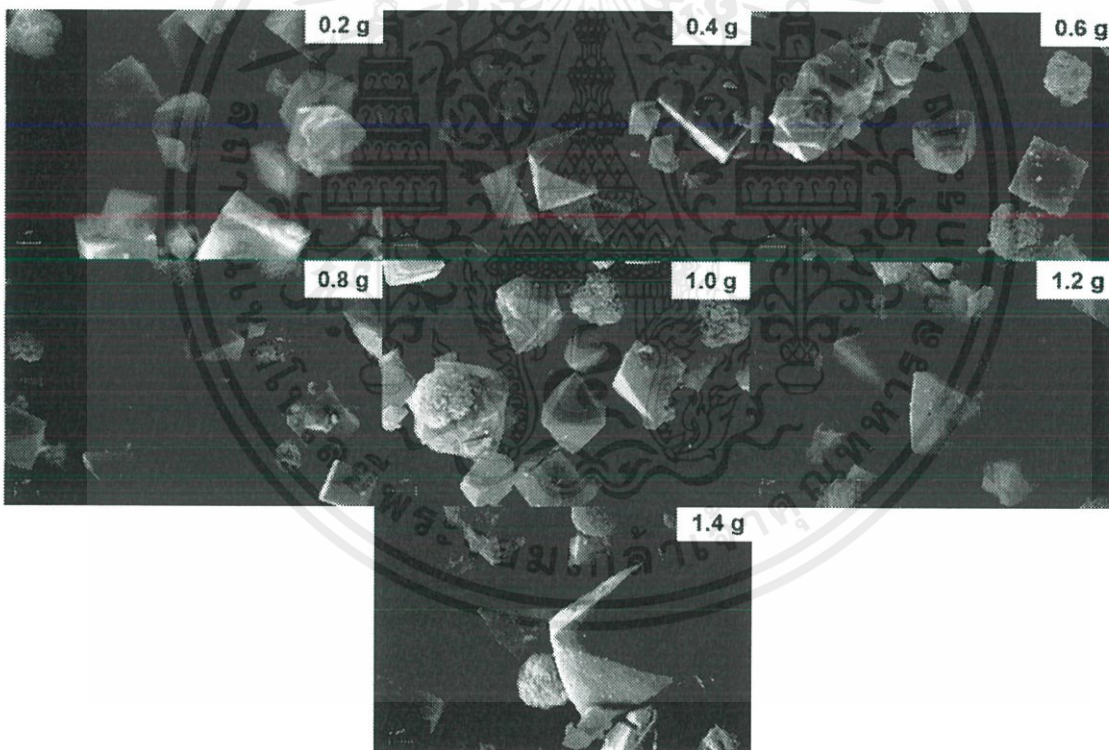
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง

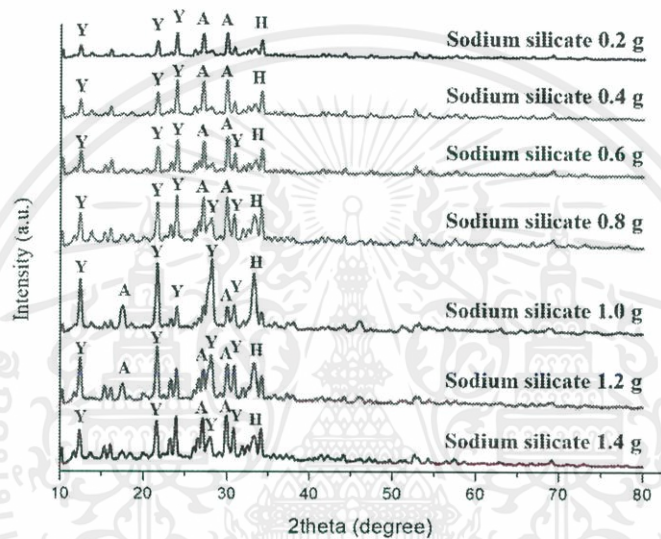
การสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายจากดินขาวนั้น ได้ทำการเติมซิลิกาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ Sodium silicate, Tetraethyl orthosilicate และ ซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว โดยทำการเติมซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ในเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัม ผสมกับดินขาวจากจังหวัดลำปางจนมีน้ำหนักรวม 2 กรัม เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM พบว่าเงื่อนไขการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate ทั้งหมดสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ว้ายได้



รูปที่ 4.1 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ

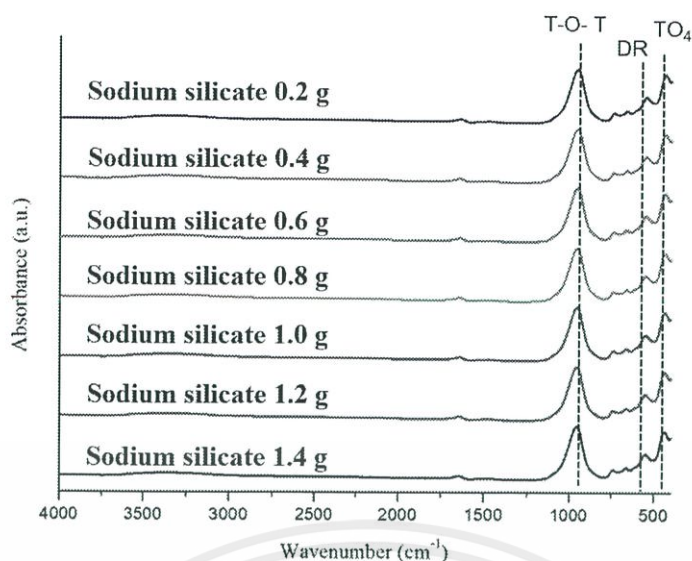
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่าง ๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าการเติม Sodium silicate ในทุกเงื่อนไขสามารถพบซีโอไลต์วายซึ่งมีรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedra) และพบว่ามี การปะปนของซีโอไลต์เอที่มีรูปทรงลูกบาศก์ (Cubic) นอกจากนี้พบว่ามีเฟสของ Hydrated sodalite ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลมาจากซีโอไลต์บางส่วนที่สังเคราะห์ที่ไม่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย SEM มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก และเฟสอื่น ๆ ปะปนอยู่เล็กน้อย ได้แก่ ซีโอไลต์เอ และ Hydrated sodalite



รูปที่ 4.2 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, H=Hydrated sodalite)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่าง ๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก และมีการปะปนของซีโอไลต์เอ และ Hydrated sodalite โดยพบว่าในเงื่อนไขการเติม Sodium silicate ปริมาณ 1.0 กรัม มีความสูงของกราฟในตำแหน่งที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์วายสูงที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ



รูปที่ 4.3 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring)

จากรูปที่ 4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ พบว่ามีการสั่นของพันธะที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์ ได้แก่ การสั่นของพันธะ  $TO_4$  (T=Si, Al) ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบ Tetrahedral bending โดยมีเลขคลื่น  $448\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของพันธะ T-O-T (T=Si, Al) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Symmetric stretching โดยมีเลขคลื่น  $976\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าที่เลขคลื่น  $550\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ Double ring ในซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ในผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์

ตารางที่ 4.1 แสดง % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่าง ๆ

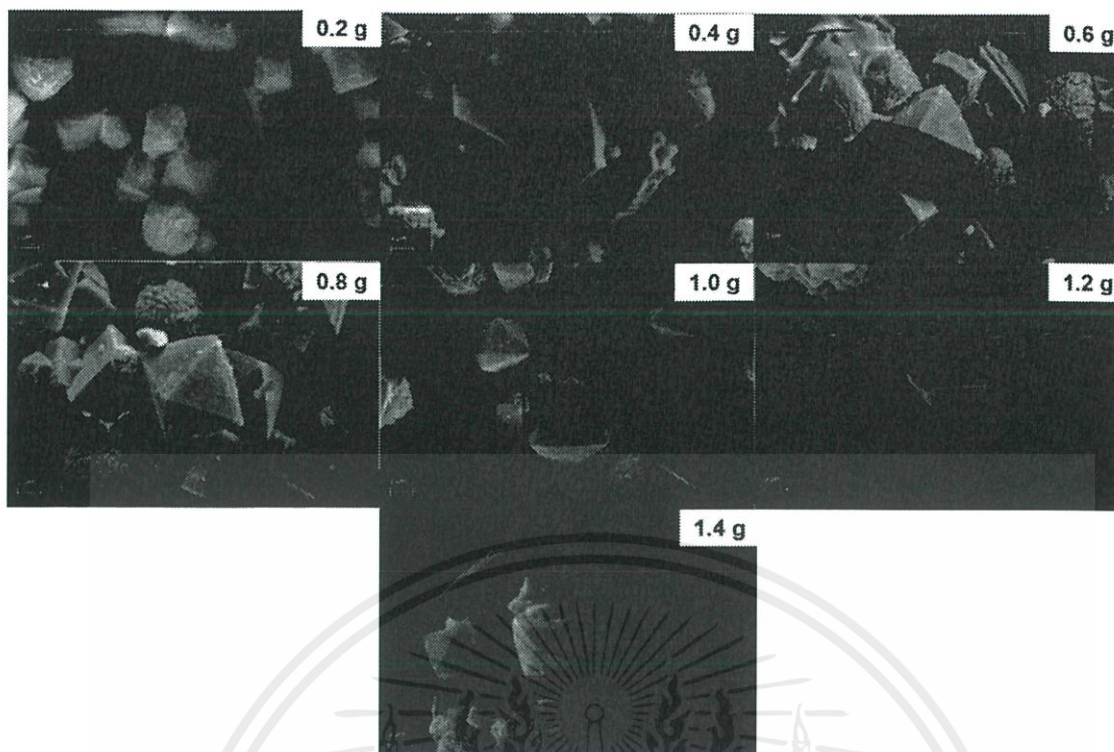
Sodium silicate	HT1	HT2	Product
	Weight loss (%)	Weight loss (%)	
0.2 g	49.10%	20.00%	30.00%
0.4 g	39.90%	28.45%	31.65%
0.6 g	44.00%	25.85%	30.15%
0.8 g	44.50%	24.85%	30.65%
1.0 g	36.00%	32.90%	31.10%
1.2 g	34.00%	33.90%	32.10%
1.4 g	39.30%	29.10%	31.60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ ซึ่งปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในดินขาว จึงพบได้ว่า %Weight loss ในการเติมปริมาณ Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ จะอยู่ที่ประมาณ 34 – 49 % มีค่าใกล้เคียงกันและปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนจำพวกโลหะ และดินขาวบางส่วนออกไปประมาณ 20 – 34 % จนทำให้เหลือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการเติม Sodium silicate ในปริมาณที่ต่างๆกัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 31.04% ซึ่งในปริมาณที่ได้ออกมา ไม่ได้บ่งบอกถึงปริมาณของซีโอไลต์วายทั้งหมด เนื่องจากได้ทำการวัดผลอื่นๆ พบได้ปริมาณที่ได้ออกมา มีซีโอไลต์วายและซีโอไลต์อื่นๆที่ปะปนอยู่

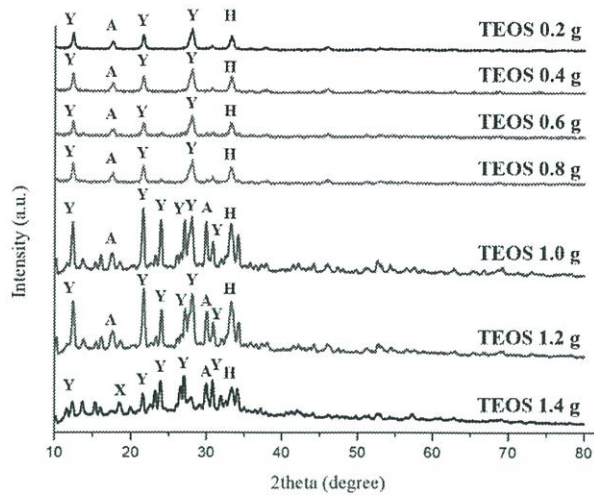
#### 4.2 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง

การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจากดินขาวนั้นได้ทำการเติมซิลิกาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ Sodium silicate, Tetraethyl orthosilicate และ ซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว โดยทำการเติมซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ในเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัม ผสมกับดินขาวจากจังหวัดลำปางจนมีน้ำหนักรวม 2 กรัม เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM พบว่าเงื่อนไขการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ทั้งหมดสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์วายได้



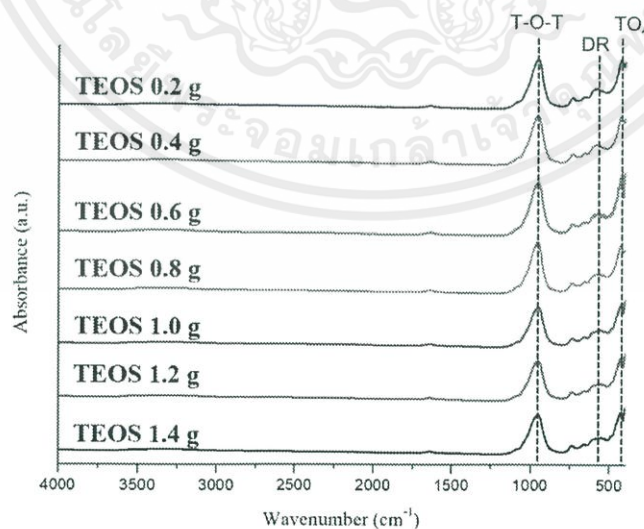
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่าง ๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในทุกเงื่อนไขสามารถพบซีโอไลต์วายซึ่งมีรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedra) และพบว่ามีเฟสอื่น ๆ มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Sodium silicate ซึ่งมีการปะปน ได้แก่ ซีโอไลต์เอที่มีรูปทรงลูกบาศก์ (Cubic) นอกจากนั้นพบว่ามีเฟสของ Hydrosodalite ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลมาจากซีโอไลต์บางส่วนที่สังเคราะห์ไม่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย SEM มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก และเฟสอื่น ๆ ปะปนอยู่เล็กน้อย ได้แก่ ซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอ็กซ์ และ Hydrosodalite



รูปที่ 4.5 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite)

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก และมีการปะปนของซีโอไลต์เอ และ Hydrosodalite รวมทั้งพบเฟสของซีโอไลต์เอ็กซ์ในเงื่อนไขการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ปริมาณ 1.4 กรัม โดยพบว่าในเงื่อนไขการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ปริมาณ 1.0 กรัม มีความสูงของกราฟในตำแหน่งที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์วายสูงที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ



รูปที่ 4.6 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ผลิตรัศที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่างๆมีลักษณะของกราฟที่ใกล้เคียงผลิตรัศที่ทำการสังเคราะห์ โดยการเติม Sodium silicate ในปริมาณต่างๆ ซึ่งพบว่าการสั่นของพันธะที่แสดงลักษณะของ ซีโอไลต์ ได้แก่ การสั่นของพันธะ  $TO_4$  (T=Si, Al) ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบ Tetrahedral bending โดยมีเลขคลื่น  $448\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของพันธะ T-O-T (T=Si, Al) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Symmetric stretching โดยมีเลขคลื่น  $976\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณเลขคลื่น  $550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของ Double ring ในซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ในผลิตรัศที่ทำการสังเคราะห์

ตารางที่ 4.2 แสดง % Weight loss ของผลิตรัศที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate (TEOS) ในปริมาณต่าง ๆ

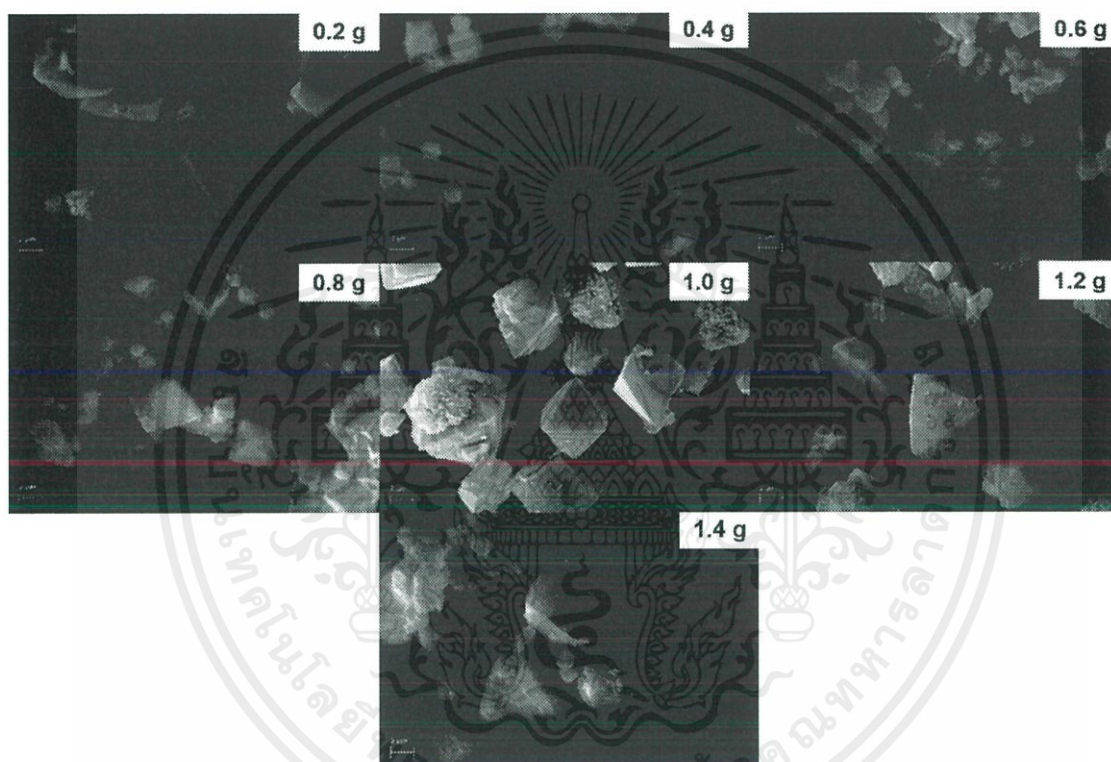
TEOS	HT1	HT2	Product
	Weight loss (%)	Weight loss (%)	
0.2 g	48.95%	19.45%	31.60%
0.4 g	33.95%	35.50%	30.55%
0.6 g	41.40%	26.00%	32.60%
0.8 g	38.30%	28.60%	33.10%
1.0 g	42.10%	23.85%	34.05%
1.2 g	38.45%	27.95%	33.60%
1.4 g	33.00%	35.95%	31.05%

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณของผลิตรัศที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณต่างๆ ซึ่งปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในดินขาว จึงพบได้ว่า %Weight loss ในการเติมปริมาณ Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณต่างๆ จะอยู่ที่ประมาณ 33 – 49 % มีค่าใกล้เคียงกันและปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนจำพวกโลหะ และดินขาวบางส่วนออกไปประมาณ 19 – 36 % จนทำให้เหลือผลิตรัศที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 32.36% ซึ่งในปริมาณที่ได้ออกมา ไม่ได้บ่งบอกถึงปริมาณของซีโอไลต์วายเป็นทั้งหมด เนื่องจากได้ทำการวัดผลอื่นๆ พบได้ปริมาณที่ได้ออกมา มีซีโอไลต์วายเป็นและซีโอไลต์อื่นๆที่ปะปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การศึกษาผลของการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณที่แตกต่างที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นจากดินขาวจากจังหวัดลำปาง

การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นจากดินขาวนั้น ได้ทำการเติมซิลิกาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ Sodium silicate, Tetraethyl orthosilicate และ ซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว โดยทำการเติมซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ในเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัม ผสมกับดินขาวจากจังหวัดลำปางจนมีน้ำหนักรวม 2 กรัม เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM พบว่าเงื่อนไขการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ทุกเงื่อนไขสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นได้ โดยซิลิกาที่ได้มาจากการสังเคราะห์ซิลิกาในเงื่อนไขที่ดีที่สุดโดยใช้แกลบเป็นสารตั้งต้น

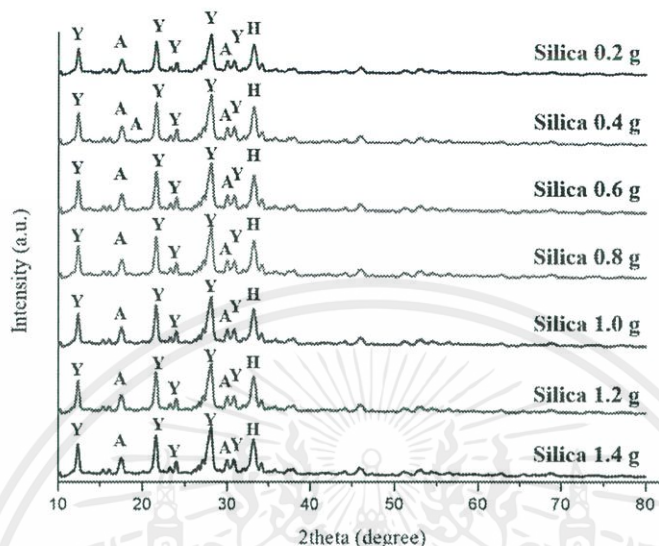


ภาพที่ 4.7 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณต่าง ๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากภาพ SEM จะเห็นได้ว่าการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในทุกๆ เงื่อนไขสามารถพบซีโอไลต์วายเป็นซึ่งมีรูปร่างสี่หน้า (Tetrahedra) เช่นเดียวกับซิลิกาจากแหล่งอื่น ๆ ข้างต้น และพบว่ามีรูปร่างของเฟสอื่น ๆ ได้แก่ ซีโอไลต์เอที่มีรูปร่างลูกบาศก์ (Cubic) นอกจากนี้พบว่ามีเฟสของ Hydrosodalite ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลมาจากซีโอไลต์

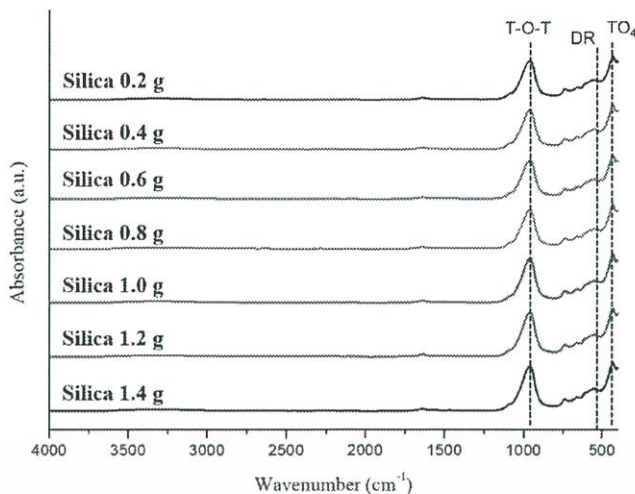
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วนที่สังเคราะห์ไม่เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย SEM มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก เช่นเดียวกับซิลิกาจากแหล่งอื่น ๆ ข้างต้น และเฟสอื่น ๆ ปะปนอยู่เล็กน้อย ได้แก่ ซีโอไลต์เอ และ Hydrosodalite



รูปที่ 4.8 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, H=Hydrosodalite)

จากรูปที่ 4.8 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่าง ๆ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์วายเป็นหลัก และมีการปะปนของซีโอไลต์เอ และ Hydrosodalite โดยพบว่าในเงื่อนไขต่าง ๆ มีลักษณะของกราฟและความสูงของกราฟที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ เงื่อนไข ซึ่งแตกต่างจากในเงื่อนไขการเติม Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate ที่มีความแตกต่างของลักษณะกราฟและความสูงของกราฟที่ชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาที่จำกัดของซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ทำให้การเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวเพิ่มไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วาย



รูปที่ 4.9 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ (DR=Double ring)

จากรูปที่ 4.9 ผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวลำปาง โดยทำการซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ ซึ่งมีลักษณะของกราฟที่ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์โดยการเติม Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณต่างๆ ซึ่งพบว่ามีการสั่นของพันธะที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์ ได้แก่ การสั่นของพันธะ  $TO_4$  (T=Si, Al) ซึ่งมีการสั่นแบบ Tetrahedral bending โดยมีเลขคลื่น  $448\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของพันธะ T-O-T (T=Si, Al) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Symmetric stretching โดยมีเลขคลื่น  $976\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณเลขคลื่น  $550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของ Double ring ในซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ในผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ แต่มีความสูงของกราฟในบริเวณนี้ไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการเติม Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดง % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติมซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณต่าง ๆ

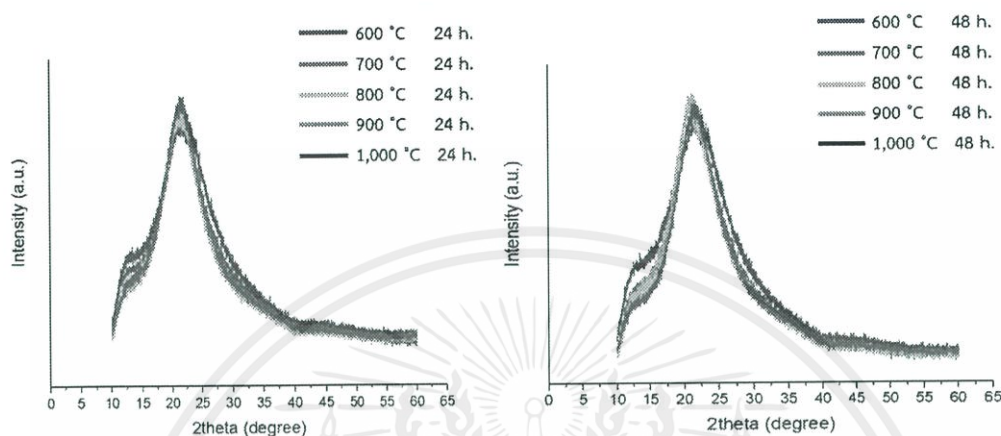
Silica from rice husks	HT1	HT2	Product
	Weight loss (%)	Weight loss (%)	
0.2 g	44.25%	25.35%	30.40%
0.4 g	39.50%	29.95%	30.55%
0.6 g	44.55%	25.00%	30.45%
0.8 g	37.90%	31.25%	30.85%
1.0 g	41.15%	27.60%	31.25%
1.2 g	39.00%	30.40%	30.60%
1.4 g	34.40%	34.50%	31.10%

จากตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวลำปางโดยทำการเติมซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ ซึ่งปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรก จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในดินขาว จึงพบได้ว่า %Weight loss ในการเติมซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณต่างๆ จะอยู่ที่ประมาณ 34 – 45 % มีค่าใกล้เคียงกันและปริมาณที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สอง จะเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนจำพวกโลหะ และดินขาวบางส่วนออกไปประมาณ 25 – 35 % จนทำให้เหลือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการเติมซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในปริมาณที่ต่างๆกัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30.74% ซึ่งในปริมาณที่ได้ออกมา ไม่ได้บ่งบอกถึงปริมาณของซีโอไลต์วายทั้งหมด เนื่องจากได้ทำการวัดผลอื่นๆ พบได้ปริมาณที่ได้ออกมา มีซีโอไลต์วายและซีโอไลต์อื่นๆที่ปะปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

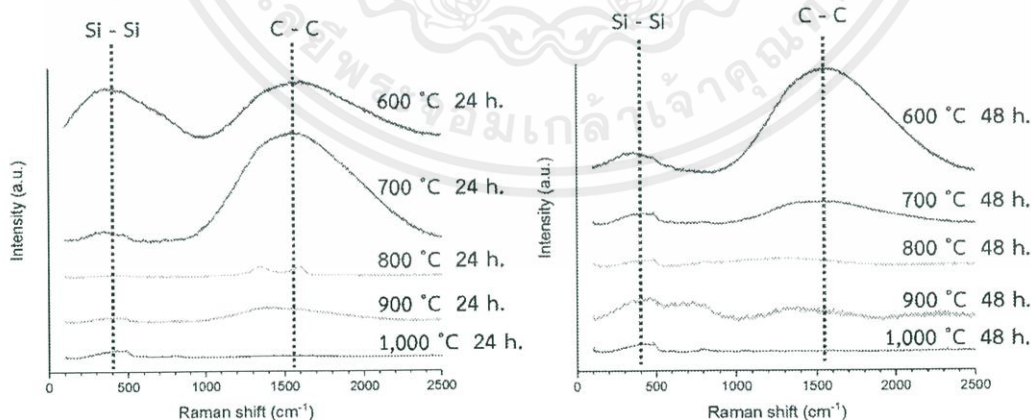
#### 4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าว

การสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าวนั้นได้ทำการสังเคราะห์โดยใช้วิธีการเผาในที่อับอากาศ ซึ่งมีการใช้เงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ ทำการเผาที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600, 700, 800, 900 และ 1,000 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมงเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย XRD และ Raman Spectroscopy พบว่าในทุกเงื่อนไขผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา



รูปที่ 4.10 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวแสดงลักษณะของกราฟซิลิกาที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้ยังพบว่าในเงื่อนไขเวลาในการเผาทั้งสองเงื่อนไขเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นกราฟจะมีความแคบลงและมีความสูงที่มากขึ้นแสดงถึงความเป็นซิลิกาที่มากกว่า ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในการเผามีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ได้



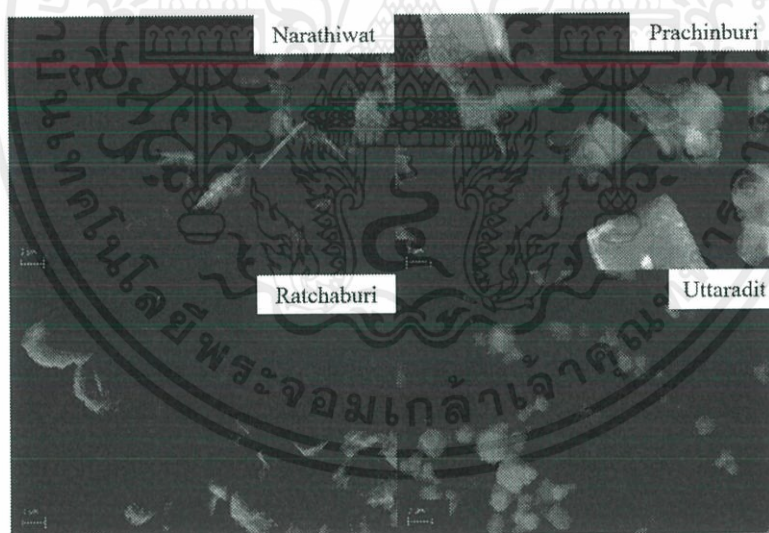
รูปที่ 4.11 กราฟ Raman Spectroscopy ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 ดังจะสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์ที่ได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) จึงต้องใช้ Raman Spectroscopy ในการวิเคราะห์ร่วม โดยพบว่าผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์ที่ได้มีลักษณะเป็น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) และลักษณะกราฟของซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ทำให้ทราบว่าคาร์บอน (Carbon) ในผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์ที่ได้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 1,000 °C ไม่พบบริเวณของกราฟที่แสดงลักษณะของคาร์บอน (Carbon) ในทั้งสองเงื่อนไขเวลาการเผา ได้แก่ 24 และ 48 ชั่วโมง จึงเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้

#### 4.5 การศึกษาผลของดินขาวในพื้นที่อื่นๆที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ วายจากดินขาวโดยมีการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate

การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจากดินขาวในการทดลองนี้ได้ใช้ดินขาวจากพื้นที่ต่างๆเป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์เป็นจำนวน 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนราธิวาส, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีการเติมซิลิกาปริมาณ 1.0 กรัมจาก Sodium silicate โดยทำการวิเคราะห์ผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์ด้วย SEM และ XRD

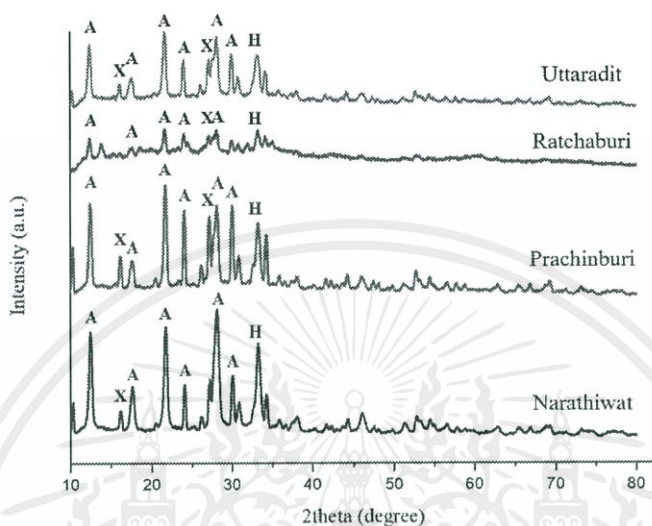


รูปที่ 4.12 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม

จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผลิตรัศมีที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวในพื้นที่ต่างๆ ได้แก่ จังหวัดนราธิวาส, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยสังเกตได้ว่าทุกเงื่อนไขประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์เอเป็นหลักซึ่งมีรูปร่างลูกบาศก์ (Cubic) นอกจากนี้พบว่าการปะปนของเฟส Hydosodalite ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลมาจากซีโอไลต์

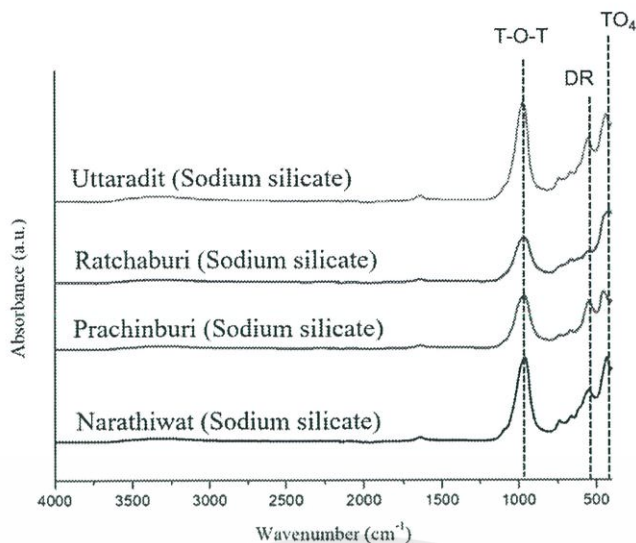
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วนของสังเคราะห์ไม่เสร็จสมบูรณ์ จากภาพ SEM ทำให้ทราบว่าดินขาวจากทั้ง 4 จังหวัดเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้วไม่สามารถสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์วายได้ ซึ่งมีผลมาจากการมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่ไม่สูงในดินทั้ง 4 พื้นที่ เนื่องจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจำเป็นต้องอาศัยดินขาวที่มีปริมาณซิลิกาสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จะประกอบไปด้วยซีโอไลต์เอซึ่งสังเคราะห์ได้โดยดินขาวที่มีปริมาณซิลิกาไม่สูงเป็นหลัก



รูปที่ 4.13 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite)

จากรูปที่ 4.13 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่าง ๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์เอเป็นหลัก และมีการปะปนของซีโอไลต์เอ็กซ์ และ Hydrosodalite โดยเมื่อเปรียบเทียบความสูงของกราฟพบว่าเงื่อนไขที่ใช้ดินขาวจากจังหวัดนราธิวาสและปราจีนบุรีมีความสูงของกราฟที่สูงกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ ทำให้ทราบว่าดินขาวทั้งสองแหล่งสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์เอได้ดี แต่อย่างไรก็ตามไม่มีเงื่อนไขใดที่แสดงเฟสของซีโอไลต์วาย ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่ไม่พบซีโอไลต์วายในทุกเงื่อนไข



รูปที่ 4.14 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (DR=Double ring)

จากรูปที่ 4.14 ผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม พบว่ามีการสั่นของพันธะที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์ ได้แก่ การสั่นของพันธะ  $TO_4$  (T=Si, Al) ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบ Tetrahedral bending โดยมีเลขคลื่น  $448\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของพันธะ T-O-T (T=Si, Al) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Symmetric stretching โดยมีเลขคลื่น  $976\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าที่เลขคลื่น  $550\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ Double ring ในซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ในผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ และจะสังเกตได้ว่าบริเวณที่เป็นการสั่นของ Double ring ในเงื่อนไขดินขาวจากจังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุดรดิตถ์ ไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขดินขาวจากจังหวัดนราธิวาส และจังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินขาวจากจังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุดรดิตถ์ในการทดลองนี้สังเคราะห์ซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ได้น้อยกว่าเงื่อนไขอื่น

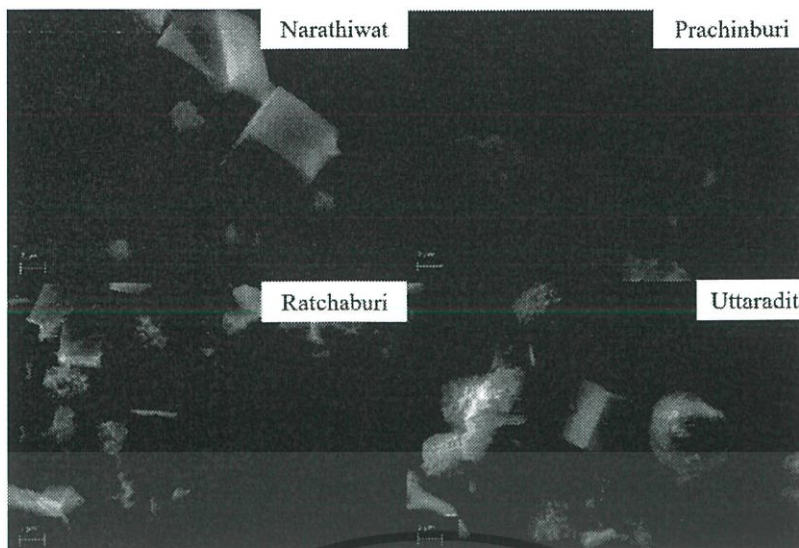
ตารางที่ 4.4 แสดง % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม

Kaolin & Sodium silicate	HT1	HT2	Product
	Weight loss (%)	Weight loss (%)	
Narathiwat	36.57%	21.96%	41.46%
Ratchaburi	75.27%	4.30%	20.43%
Uttaradit	53.45%	31.69%	14.85%
Prachinburi	32.05%	22.82%	45.12%

จากตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Sodium silicate ในปริมาณ 1.0 กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่า %Weight loss ที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกและครั้งที่สองของดินขาวในแต่ละพื้นที่ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากว่า ดินขาวในแต่ละพื้นที่ก็จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไปและมีสิ่งเจือปนในดินขาวที่ปริมาณแตกต่างกันออกไปจึงส่งผลให้ %Weight loss แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้มากที่สุดและมีความใกล้เคียงกันจะอยู่ที่จังหวัดปราจีนบุรี และ จังหวัดนครราชสีมา อยู่ที่ 45.12% และ 41.46% ตามลำดับ และ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาน้อยจะอยู่ที่จังหวัดราชบุรี และ อุตรดิตถ์ อยู่ที่ 20.43% และ 14.85% ตามลำดับ

#### 4.6 การศึกษาผลของดินขาวในพื้นที่อื่นๆที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ วายจากดินขาวโดยมีการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate (TEOS)

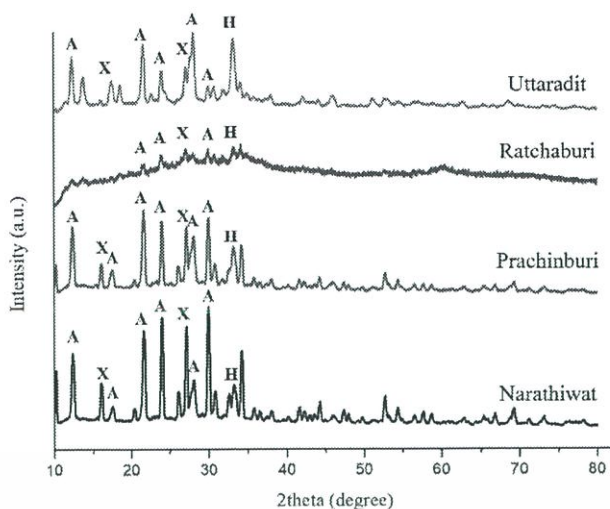
การสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจากดินขาวในการทดลองนี้ได้ใช้ดินขาวจากพื้นที่ต่างๆเป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์เป็นจำนวน 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และ จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยมีการเติมซิลิกาปริมาณ 1.0 กรัมจาก Tetraethyl orthosilicate โดยทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ด้วย SEM และ XRD



รูปที่ 4.15 ภาพ SEM กำลังขยาย 3000X ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม

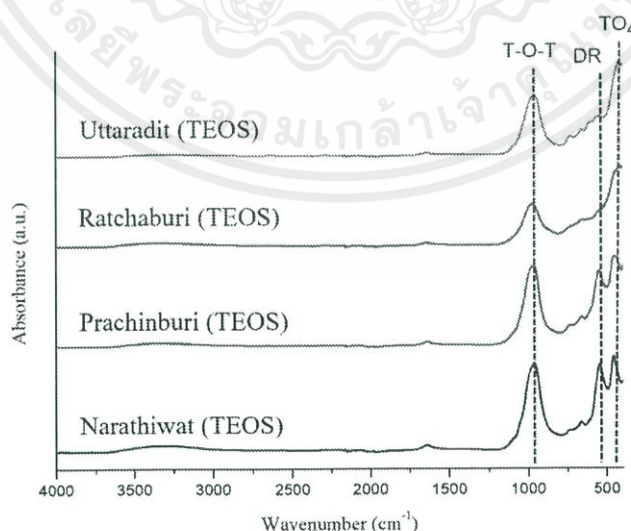
จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวในพื้นที่ต่างๆ ได้แก่ จังหวัดนราธิวาส, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุตรดิตถ์ โดยสังเกตได้ว่าทุกเงื่อนไขประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์เอเป็นหลักซึ่งมีรูปทรงลูกบาศก์ (Cubic) นอกจากนี้พบว่าการปะปนของเฟส Hydrosodalite ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งเป็นผลมาจากซีโอไลต์บางส่วนที่สังเคราะห์ไม่เสร็จสมบูรณ์ จากภาพ SEM ทำให้ทราบว่าดินขาวจากทั้ง 4 จังหวัดเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้วไม่สามารถสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่มีซีโอไลต์วายได้ ซึ่งมีผลมาจากการมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่ไม่สูงในดินทั้ง 4 พื้นที่ เนื่องจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายจำเป็นต้องอาศัยดินขาวที่มีปริมาณซิลิกาสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จะประกอบไปด้วยซีโอไลต์เอซึ่งสังเคราะห์ได้โดยดินขาวที่มีปริมาณซิลิกาไม่สูงเป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (Y=Zeolite Y, A=Zeolite A, X=Zeolite X, H=Hydrosodalite)

จากรูปที่ 4.16 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วยเฟสของซีโอไลต์เอเป็นหลัก และมีการปะปนของซีโอไลต์เอ็กซ์ และ Hydrosodalite โดยเมื่อเปรียบเทียบความสูงของกราฟพบว่าเงื่อนไขที่ใช้ดินขาวจากจังหวัดนราธิวาสและปราจีนบุรีมีความสูงของกราฟที่สูงกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ ทำให้ทราบว่าดินขาวทั้งสองแหล่งสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์เอได้ดี แต่อย่างไรก็ตามไม่มีเงื่อนไขใดที่แสดงเฟสของซีโอไลต์วาย ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่ไม่พบซีโอไลต์วายในทุกเงื่อนไข



รูปที่ 4.17 กราฟ FTIR ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม (DR=Double ring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 ผลึกภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม พบว่ามีการสั่นของพันธะที่แสดงลักษณะของซีโอไลต์ ได้แก่ การสั่นของพันธะ  $TO_4$  (T=Si, Al) ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบ Tetrahedral bending โดยมีเลขคลื่น  $448\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของพันธะ T-O-T (T=Si, Al) ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Symmetric stretching โดยมีเลขคลื่น  $976\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบว่าที่เลขคลื่น  $550\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ Double ring ในซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ในผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ และจะสังเกตได้ว่าบริเวณที่เป็นการสั่นของ Double ring ในเงื่อนไขดินขาวจากจังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุตรดิตถ์ ไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขดินขาวจากจังหวัดนราธิวาส และจังหวัดปราจีนบุรี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินขาวจากจังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุตรดิตถ์ในการทดลองนี้สังเคราะห์ซีโอไลต์กลุ่มฟูจาไซต์ได้น้อยกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ

ตารางที่ 4.5 แสดง % Weight loss ของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม

Kaolin & TEOS	HT1	HT2	Product
	Weight loss (%)	Weight loss (%)	
Narathiwat	38.92%	25.00%	36.08%
Ratchaburi	74.30%	5.70%	19.99%
Uttaradit	44.01%	39.80%	16.19%
Prachinburi	32.44%	25.38%	40.18%

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากดินขาวจากพื้นที่ต่างๆ โดยทำการเติม Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณ 1.0 กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่า %Weight loss ที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกและครั้งที่สองในแต่ละพื้นที่ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากว่า ดินขาวในแต่ละพื้นที่ก็จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไปและมีสิ่งเจือปนในดินขาวที่ปริมาณแตกต่างกันออกไปจึงส่งผลให้ %Weight loss แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้มากที่สุดและมีความใกล้เคียงกันจะอยู่ที่จังหวัดปราจีนบุรี และ จังหวัดนราธิวาส อยู่ที่ 40.18% และ 36.08% ตามลำดับ และ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาน้อยจะอยู่ที่จังหวัดราชบุรี และ อุตรดิตถ์ อยู่ที่ 19.99% และ 16.19% ตามลำดับ

## สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1. จากการดำเนินงานสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปาง โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สองครั้งในการทำการทดลอง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ 1) การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Sodium silicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปาง 2) การศึกษาผลของการเติมซิลิกาจาก Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปาง 3) การศึกษาผลของการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปาง โดยสามารถทำการสรุปขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังนี้ โดยการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกเริ่มต้นด้วยการนำดินขवाल่ำปางไปทำการบดให้เป็นผงละเอียดและกรองด้วยเครื่องแยกขนาดให้มีขนาดต่ำกว่า 90 ไมครอน จากนั้นนำไปผสมซิลิกาจากแหล่งทั้งสามในเงื่อนไข 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 กรัมกับดินขवाल่ำปางมีปริมาณรวมเท่ากับ 2 กรัม เนื่องจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางจำเป็นต้องใช้สารตั้งต้นที่มีซิลิกาปริมาณสูง จากนั้นนำไปไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 16 ml ความเข้มข้น 8 M เพื่อให้เกิดกระบวนการ Alkaline activation เพื่อสลายพันธะระหว่าง Si-O และ Al-O รวมทั้งแยกสารเจือปนอื่นๆ เช่น โลหะ สารอินทรีย์ และโดยการไฮโดรเทอร์มอลครั้งที่สองจะนำดินขवाल่ำปางที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มอลครั้งแรกไปบดบดในกรวดเพื่อทำการสกัดซิลิกอน และอะลูมิเนียมจากโครงสร้างของดินขवाल่ำปาง รวมทั้งกำจัดสิ่งเจือปนที่เหลืออยู่ จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวทำการเติมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 60 ml ที่ความเข้มข้น 1 M เพื่อให้เกิดการจับตัวเป็นอะลูมิโนซิลิเกตเจล จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ไปทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นซีโอไลต์ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์จึงทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย XRD, SEM และ FTIR ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าทุกเงื่อนไขสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางได้ โดยซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate ในปริมาณที่มากขึ้น โดยการเพิ่มของซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางสูงสุดและเริ่มคงที่ตั้งแต่ปริมาณการเติม Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate เท่ากับ 1.0 กรัม และลดลงที่ 1.4 กรัม ซึ่งเป็นผลมาจากที่ปริมาณการเติม 1.4 กรัม เป็นปริมาณที่มากเกินไปสำหรับการเกิด ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางและทำให้เกิดซีโอไลต์ชนิดอื่นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ในเงื่อนไขการเติมซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวในเงื่อนไขต่างๆมีผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์วายเป็นดินขवाल่ำปางที่ใกล้เคียงกันในทุกเงื่อนไข ซึ่งเป็นผลมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำปฏิกิริยาที่จำกัดของซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว ทำให้การเติม ซิลิกาซึ่งทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าวเพิ่มไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วย

2. จากการดำเนินงานสังเคราะห์ซิลิกาโดยทำการสังเคราะห์จากเปลือกข้าว เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยจากดินขาวลำปาง โดยมีการกำหนดเงื่อนไข 2 ส่วน ได้แก่ 1) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเปลือกข้าว 2) เวลาที่ใช้ในการเผาเปลือกข้าว โดยสามารถทำการสรุปขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังนี้ ในขั้นแรกนำเปลือกข้าวมาทำการบดให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นทำการปั่นกวนเปลือกข้าวที่ผ่านการเตรียมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10% w/v ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำการกำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ แล้วจึงนำเปลือกข้าวที่ได้ไปทำการเผาที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 600, 700, 800, 900 และ 1,000 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย XRD และ Raman Spectroscopy โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และในเงื่อนไขอุณหภูมิการเผาที่ 600, 700, 800 และ 900 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ซึ่งมีการเจือปนของคาร์บอน (Carbon) ซึ่งแตกต่างจากเงื่อนไขอุณหภูมิการเผาที่ 1,000 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมง ไม่พบการเจือปนของคาร์บอนแสดงให้เห็นว่าที่เงื่อนไข การเผาที่ 1,000 °C โดยใช้เวลาในเงื่อนไข 24 และ 48 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเงื่อนไขอื่นๆ

3. จากการดำเนินงานสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยโดยใช้เงื่อนไขดินขาวจากพื้นที่ต่าง ๆ 4 แห่ง ได้แก่ ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา, จังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดราชบุรี และจังหวัดอุดรดิตถ์ โดยมีการเติมซิลิกาปริมาณ 1.0 กรัมในเงื่อนไข Sodium silicate และ Tetraethyl orthosilicate ซึ่งใช้ขั้นตอนสังเคราะห์เช่นเดียวกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยดินขาวจากจังหวัดลำปางที่ได้กล่าวไปในข้างต้น โดยทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ด้วย SEM และ XRD โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไม่มีองค์ประกอบของซีโอไลต์ด้วย โดยพบเพียงซีโอไลต์เอเป็นหลักปะปนด้วยซีโอไลต์เอ็กซ์และ Hydrosodalite นอกจากนี้พบว่าดินขาวจากจังหวัดอุดรดิตถ์สังเคราะห์ซีโอไลต์ได้มีดีนิกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งอื่นๆทั้ง 3 แหล่ง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยดินขาวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสองครั้ง พบว่าปริมาณซิลิกามีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอย่างมาก โดยจะเห็นได้จากปริมาณซิลิกาที่ต่างกันมีผลต่อชนิดของซีโอไลต์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตามแม้จะสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยแต่จะเห็นได้ว่าในผลการวิเคราะห์ต่างๆมีซีโอไลต์ชนิดอื่นเจือปนในทุกเงื่อนไขและผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสองครั้งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีเดิมที่ผ่านกระบวนการเผา เนื่องจากซีโอไลต์ด้วยที่ผ่านการสังเคราะห์จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเผาจะส่งผลให้ ซีโอไลต์วายยังมีสิ่งเจือปนจำพวกโลหะ, ควอตซ์ ที่หลงเหลืออยู่ในดินขาว เนื่องจากไม่สามารถทำให้ดินขาวเป็นเมตาคาโอลินได้อย่างสมบูรณ์ จะทำให้ซีโอไลต์วายที่ทำการสังเคราะห์มีความบริสุทธิ์ที่ต่ำลง ซึ่งทำให้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสองครั้งมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ซีโอไลต์วายได้ดีกว่ากระบวนการเผา ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าหากมีการปั่นกวบในระหว่างการไฮโดรเทอร์มอลทั้งสองครั้ง รวมทั้งการเพิ่มเวลาอาจจะทำให้ลดการเกิดซีโอไลต์อื่นๆ ส่วนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าวนั้นจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการเผาเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพซิลิกาที่ได้ ทางผู้วิจัยคาดว่าเวลาในการเผาลงอาจจะได้ซิลิกาที่มีคุณภาพและใช้พลังงานที่น้อยลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] M.S. Prasad, K. J. Reid., H. H. Murray. “Kaolin processing, properties and application”. Applied Clay Science. 6 (1991) 87-119.
- [2] มุกดา จารุศรีพันธ์ุ. “คุณภาพแร่ดินขาว”. แหล่งที่มา:  
[http://library.dmr.go.th/Document/DMR\\_Technical\\_Reports/2545/1761.pdf](http://library.dmr.go.th/Document/DMR_Technical_Reports/2545/1761.pdf). 5 เมษายน 2562
- [3] Sirinuch L. “Zeolite and Zeolite Technology”, KKU Science Journal, 41 (2013), 56-66. 18 เมษายน 2562
- [4] Tijjani Abdullahi, Zawati Harun, Mohd Hafiz Dzarfan Othman. “A review on sustainable synthesis of zeolite from kaolinite resources via hydrothermal process”. Advanced Powder Technology. 28 (2017) 1827-1840. 18 เมษายน 2562
- [5] P. Sidheswaran, A.N. Bhat. “Studies of zeolitisation of kaolinite”. Indian Jor. Chem. 34A (1995) 800-802. 21 เมษายน 2562
- [6] P. thungngen, P. Amnapaeng, P. Asawaworarit, W. Goodwin, N. Chollacoop and A. Eiad-ua. “Influence of temperature and alkaline activation for synthesis zeolite A from natural kaolin”. Key Engineering material. 751 (2017) 410-416. 21 เมษายน 2562
- [7] P. Asawaworarit, N. Chollacoop, N. Viriya-Empikul and A. Eiad-ua. “Effect of Alkaline Activation on Low Grade Natural Kaolin for synthesis of Zeolite A”. Materials Science Forum. 872 (2016) 206-210. 21 เมษายน 2562
- [8] E.B.G. Johnson, Sazmal E. Arshad. “Hydrothermally synthesized zeolites based on kaolinite: A review”. Applied Clay Science, 97-98 (2014) 215-221. 21 เมษายน 2562
- [9] “ดินขาว”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.sptn.dss.go.th/otopinfor/index.php/en/2014-09-15-12-50-24/2016-12-28-03-58-05/142-kaolin>. 1 เมษายน 2562
- [10] “ดินขาว”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic/clay1.htm>. 2 เมษายน 2562
- [11] ชมรมเกษตรปลอดสารพิษ. “ดินขาว(Kaolinite)”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.thaigreenagro.com/ดินขาว-kaolinite>. 2 เมษายน 2562
- [12] นิภา จุละจาริตต์. “เคมีวิเคราะห์เพื่อการพัฒนาแหล่งดินขาว”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<https://www.virtual.cmru.ac.th/cfi-bin/getdoc/509-1.pdf>. 2 เมษายน 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] มุกดา จารุศรีพันธ์. “คุณภาพแร่ดินขาว”. แหล่งที่มา:  
[http://library.dmr.go.th/Document/DMR\\_Technical\\_Reports/2545/1761.pdf](http://library.dmr.go.th/Document/DMR_Technical_Reports/2545/1761.pdf). 5 เมษายน 2562
- [14] ประสิทธิ์ สุวรรณประทีป และ ชาญ จรรย์ยานิชย์. “แหล่งดินขาว (เคโอลิน) ที่สำคัญและการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมในประเทศไทย”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[http://www.sptn.dss.go.th/otopinfor/attachments/article/142/CF74\(A14\).pdf](http://www.sptn.dss.go.th/otopinfor/attachments/article/142/CF74(A14).pdf). 5 เมษายน 2562
- [15] กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี และ กรมทรัพยากรธรณี. “คุณภาพดินเพื่ออุตสาหกรรมเซรามิก”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[http://library.dmr.go.th/Document/DMR\\_Technical\\_Reports/2551/20249.pdf](http://library.dmr.go.th/Document/DMR_Technical_Reports/2551/20249.pdf). 7 เมษายน 2562
- [16] นวลอนงค์ ศรีพงษ์. “การวิจัยและพัฒนาดินขาวเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.sptn.dss.go.th/otopinfor/attachments/article/142/CF74\(A11\).pdf](http://www.sptn.dss.go.th/otopinfor/attachments/article/142/CF74(A11).pdf). 7 เมษายน 2562
- [17] “การดำเนินไปของการเกิดปฏิกิริยา”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://mobile.rate-of-reaction.myreadyweb.com/article/category-144372-html>. 11 เมษายน 2562
- [18] รศ. ดร. วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. (2554). เคมีพื้นผิวและตัวเร่งปฏิกิริยา. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ท็อป 11 เมษายน 2562
- [19] ศิริวุฒิ บัวสมาน. “5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.slideshare.net/siricom4/5-56039793>. 11 เมษายน 2562
- [20] อ.ดร.ฐิติพรรณ ฉิมสุข. “ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/t.chimsook/คม443-ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม4p.pdf>. 12 เมษายน 2562
- [21] ผศ.ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล และ นายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา. “ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) กับประโยชน์ในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.geppower.com/image/pdf-article/2-RECOAL-article.pdf>. 12 เมษายน 2562
- [22] “ปัจจัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.saranya05618.wordpress.com/ปัจจัยการเกิดปฏิกิริยา>. 12 เมษายน 2562
- [23] รศ.ดร.วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. (2547). ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) 17 เมษายน 2562
- [24] ผศ.ดร. ธราธร มงคลศรี. หลักมูลทางวิศวกรรมปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 17 เมษายน 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] กรมทรัพยากรธรณี. “ซีโอไลต์”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.dmr.go.th/main.php?filename=zeolite> 18 เมษายน 2562
- [26] ผศ.ดร. จตุพร วิทยาคุณ. (2547). ซีโอไลต์, หัวข้อที่เลือกสรรทางเคมีอินทรีย์(15-23). สาขาวิชาเคมี สำนักวิชาวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 18 เมษายน 2562
- [27] J.M. Newsam. In: A.K. Cheetham, P Day, eds. (1992). Solid State Chemistry: Compounds. New York: Oxford University Press, 234-280. 18 เมษายน 2562
- [28] “SiO<sub>4</sub>”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.chemtube3d.com/gallery/structurepages/SiO44-.html>. 19 เมษายน 2562
- [29] “AlO<sub>4</sub>”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://cmasc.gmu.edu/samp.htm>. 19 เมษายน 2562
- [30] นางสาวภาวณี ตาลเถื่อน. “การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซไนโตรเจนในก๊าซผสมสังเคราะห์ด้วยซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4 A”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Pawanee\\_Tantuan/fulltext.pdf](http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Pawanee_Tantuan/fulltext.pdf). 21 เมษายน 2562
- [31] นางสาวจุฬารัตน์ อุปชาย์ และ นางสาวนาดยา วัฒพจน์. “การสังเคราะห์ซีโอไลต์”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://chem.flas.kps.ku.ac.th/01403443/01403443-REPORT-SYNTHESIS-ZEOLITE.pdf>. 21 เมษายน 2562
- [32] S. Patwardhan. (2001). “Sol-gel synthesis of zeolites: effect of process parameter” 21 เมษายน 2562
- [33] พัชรินทร์ วรรณกุล. “Sol-Gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซีโอไลต์จากขานอ้อย”. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี 2553 ฉบับที่ 36/209, 39-43. 21 เมษายน 2562
- [34] K. Torii (1978). “Natural zeolites: utilization of natural zeolite in Japan, Natural Zeolites, Occurrence, Properties, Use (eds L.B. Sand, F.A. Mumpton)”, Pergamon Press, New York, 441-450. 21 เมษายน 2562
- [35] Donghan Bae, Karl Seff. “Structures of cobalt (II)-exchanged zeolite X”. Microporous and Mesoporous Materials. 33 (1999) 265-280. 21 เมษายน 2562
- [36] ดร. จิตรลดา ชูมี. “การดูดซับโลหะทองแดงในสารละลายด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากแคลบข้าว”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://ssruir.ssru.ac.th/handle/ssruir/755>. 21 เมษายน 2562
- [37] Rohani Abu Baker, Rosiyah Yahya, Seng Neon Gan. “Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk”. Procedia Chemistry. 19 (2016) 189-195. 24 เมษายน 2562
- [38] Jun Zhao, Genggeng Wang, Lihong Qin, Haiyan Li, Yu Chen, Baijun Liu. “Synthesis and catalytic cracking performance of mesoporous zeolite Y”. Catalysis Communications. 73 (2016) 98-102. 24 เมษายน 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] R.M. Mohamed, I.A. Mkhaldid, M.A. Barakat. "Rice husk ash as a renewable source for the production of zeolite NaY and its characterization". *Arabian Journal of Chemistry*. 8 (2015) 48-53. 24 เมษายน 2562
- [40] N.M. Hieu, V.V. Korobochkin, N.V. Tu. "A study of silica separation in the production of activated carbon from rice husk in Viet Nam". *Procedia Chemistry* 15 (2015) 308-312. 24 เมษายน 2562
- [41] Tao Li, Jun Cheng, Rui Huang, Junhu Zhao, Kefa Cen. "Conversion of waste cooking oil to jet biofuel with nickel-based mesoporous zeolite Y catalyst". *Bioresource Technology* 197 (2015) 289-294. 24 เมษายน 2562
- [42] Jing-Quan Wang, Ya-Xi Huang, Yuanming Pan, Jin-Xiao Mi. "New Hydrothermal route for the synthesis of high purity nanoparticles of zeolite Y from kaolin and quartz". *Microporous and Mesoporous Materials* 232 (2016) 77-85. 24 เมษายน 2562
- [43] Aidan M. Doyle, Talib M. Albayati, Ammar S. Abbas, Ziad T. Alismaeel. "Biodiesel production by esterification of oleic acid over zeolite Y prepared from kaolin". *Renewable energy* 97 (2016) 19-23. เมษายน 2562
- [44] "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://science.buu.ac.th/part/mc/uploads/home/EM.pdf>. 23 เมษายน 2562
- [45] อัจฉราพร ศรีอ่อน. "หลักการทํางานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299\\_77.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/299_77.pdf). 23 เมษายน 2562
- [46] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. "Scanning Electron Microscope: SEM". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/20.html>. 23 เมษายน 2562
- [47] "The X-ray Diffraction (XRD)". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/x-ray-diffraction>. 23 เมษายน 2562
- [48] "X-Ray diffraction (XRD)". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/#introduction-xray-diffraction-xrd>. 23 เมษายน 2562
- [49] อรทัย สีสภาพนาพร. (2546). *Fourier Transform Infrared Spectrometer*. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ. 23 เมษายน 2562
- [50] "Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)". [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://chem.libretexts.org/Courses/Howard\\_University/Howard%3A\\_Physical\\_Chemistry\\_Laboratory/14.\\_Fourier\\_Transform\\_Infrared\\_Spectroscopy\\_\(FTIR\)](https://chem.libretexts.org/Courses/Howard_University/Howard%3A_Physical_Chemistry_Laboratory/14._Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_(FTIR)). 23 เมษายน 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [51] “บทที่ 10 อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://ebook.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>. 23 เมษายน 2562
- [52] จิราพร จรอนันต์, พัชรี เจียรนัยกูร, พัชราภรณ์ ทิพย์วัฒน์. “การประยุกต์ใช้เทคนิค FTIR ทางชีวการแพทย์”. *Thammasat Medical Journal*. 17 (2017) 641-652. 23 เมษายน 2562
- [53] “เทคนิคทางรามาน (Raman Spectroscopy)”. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/279\\_60.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/279_60.pdf). 23 เมษายน 2562
- [54] ภก. เมธีส ซอพิติพร. “รามาน สเปกโตรสโคปี: หลักการและการประยุกต์ใช้”. *วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม 2551*, ปีที่ 25 ฉบับที่ 1. 23 เมษายน 2562



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





# ProBioRefine 2018

## Preparation of silica from rice husk for the synthesis of zeolite Y catalyst from Thai kaolin via 2-step hydrothermal for biodiesel synthesis



Tianzang Wongsittikul<sup>1</sup>, Kobchai Oupachi<sup>1</sup>, Suphanta Sahaewith<sup>1</sup>, Worapak Tanwongwan<sup>1</sup>, Sutichai Assabumrungrat<sup>2</sup> and Apibek Elad-ul<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

\*Corresponding Author's E-mail address: apibek.ii@kmutl.ac.th

### Introduction



Rice husk is an agricultural residue plentifully in Thailand. For this reason, it is important to find a new process to utilize the rice husk to silica (variable materials). For zeolite Y which may require a high SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio, the silica from rice husk is added to modify the original kaolin SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio. This article opens an alternative source of silica for hydrothermal route for the synthesis of zeolite Y catalyst for biodiesel synthesis.

### Objective of this work

The objective of this article is to study the synthesis of silica from rice husk for zeolite Y synthesis from Thai kaolin.

### Experimental

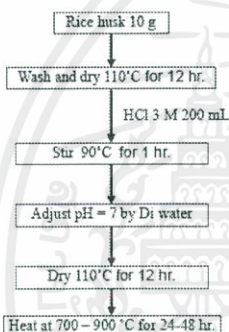


Fig. 1 Flow diagram of the synthesis of silica from rice husk

### Result and Discussion

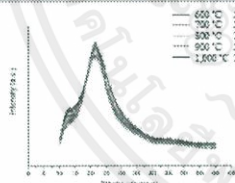


Fig. 2 XRD pattern of the silica synthesized in this study

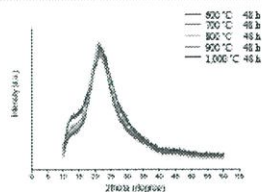


Fig. 3 XRD pattern of the silica synthesized in this study

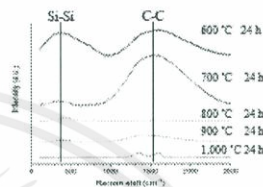


Fig. 4 Raman spectroscopy patterns of the silica synthesized in this study

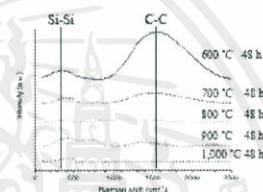


Fig. 5 Raman spectroscopy patterns of the silica synthesized in this study

XRD patterns of silica at 600 – 1,000 °C for 24 – 48 h are shown in Fig.2 and 3, respectively. The broad peaks with maximum intensity at 2θ = 22° are observed, indicating amorphous Si. However, the sharpness of the peak increases with temperatures and time.

Raman spectroscopy of silica at 600 – 1,000 °C for 24 – 48 h are shown in Fig.4 and 5, respectively. The peaks are observed Si-Si and C-C in the amorphous SiC. The intensity of the peak decreases, when the temperatures and time increases.

### Conclusion

The amorphous silica with purity was produced from rice husk at 1,000 °C for 48 h. Silica obtained from this conditions has potential to the silica source for the synthesis of zeolite Y from Thai kaolin.

### References

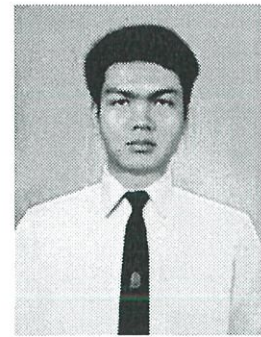
- [1] R.M. Mohamed, et al. Rice husk ash as a renewable source for the production of zeolite NaY and its characterization, *Arabian J. of Chemistry* 8 (2015) 48 - 53.
- [2] R.A. Bakara, et al. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk, *Procedia Chemistry* 19 (2016) 189 - 195.

Nano-porous Material Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)

ภาพที่ 2 โปสเตอร์เผยแพร่ในงานวิจัยในงาน ProBioRefine 2018 ระหว่างวันที่ 13-14 ตุลาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน



**Name:** Mr. Kobchai Onpecht

**ชื่อ นามสกุล:** นาย กอบชัย อ้นเพชร

**Date of Birth:** June 7, 1996

**Nationality/Religion:** Thai/Buddhism

**Language:** Thai (Native), English

**Address:** 171/1, Nam-Phut Rd., Ban-Pho, Amphone Muang Trang, Trang, 92000

**Study address:** College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), 1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

**Email:** Kobchai.on@gmail.com

**Education:**

Aug 2015 – present: Bachelor's degree in Nanomaterial Engineering, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. Supervised by Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-ua

May 2012 - Jan 2015: High School certificate in Mathematics and Science, Princess Chulabhorn Science High School Trang, Trang, Thailand

**International Conference:** Kobchai Onpecht, Thanapat Wongkitikun, Suphada Srilai, Worapak Tanwongwan, Suttichai Assabumrungrat, Apiluck Eiad-ua, Synthesis of zeolite Y from Thai kaolin via 2-steps hydrothermal without calcination, the Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, February 7-8, 2019 at BITEC, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thanapat Wongkitikun, Kobchai Onpecht, Suphada Srilaiwith, Worapak Tanwongwan, Suttichai Assabumrungrat, Apiluck Eiad-ua, Preparation of silica from rice husk for the synthesis of zeolite Y catalyst from Thai kaolin via 2-step hydrothermal for biodiesel synthesis, ProBioRefine 2018, December 13-14, 2018 at Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

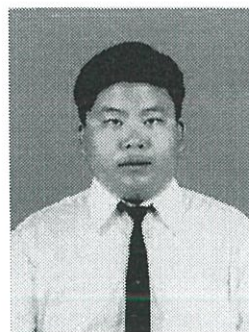
**Field of Interest:**

Nanoporous Materials, Nanomaterial, Nanotechnology, Energy Technology and Catalyst for Energy, Chemical Engineering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)



- Name:** Mr. Thanapat Wongkitikun
- ชื่อ นามสกุล:** นาย ธนภัทร วงษ์กิติคุณ
- Date of Birth:** April 30, 1997
- Nationality/Religion:** Thai/Buddhism
- Language:** Thai (Native), English
- Address:** 143 Rungcharoen Alley, Prachasongkro Road, Dindaeng, Bangkok 10400, Thailand
- Study address:** College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), 1 Soi Chalongsong 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
- Email:** Thanapat.wktk@gmail.com
- Education:**
- Aug 2015 – present: Bachelor's degree in Nanomaterial Engineering, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand. Supervised by Asst. Prof. Dr. Apiluck Eiad-ua
- May 2012 - Jan 2015: High School certificate in Mathematics and Science, Sri Ayudhya School, Bangkok, Thailand
- International Conference:** Thanapat Wongkitikun, Kobchai Onpecht, Suphada Srilaiwith, Worapak Tanwongwan, Suttichai Assabumrungrat, Apiluck Eiad-ua, Preparation of silica from rice husk for the synthesis of zeolite Y catalyst from Thai kaolin via 2-step hydrothermal for biodiesel synthesis, ProBioRefine 2018, December 13-14, 2018 at Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kobchai Onpecht, Thanapat Wongkitikun, Suphada Srilai, Worapak Tanwongwan, Suttichai Assabumrungrat, Apiluck Eiad-ua, Synthesis of zeolite Y from Thai kaolin via 2-steps hydrothermal without calcination, the Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, February 7-8, 2019 at BITEC, Bangkok, Thailand.

**Field of Interest:**

Nanoporous Materials, Nanomaterial, Nanotechnology, Energy Technology and Catalyst for Energy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้