

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย
สำหรับการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์จากอุตสาหกรรม

นายเชมกร โกลมศิริสุข



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CHARCOAL/ZEOLITE/TITANIA COMPOSITE
MATERIAL FOR ORGANIC WASTE WATER TREATMENT FROM INDUSTRIES

Mr. Khemmakorn Gomonsirisuk



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไท

ทานีเยสำหรับการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์จากอุตสาหกรรม

โดย

นายเชมกร โกมลศิริสุข

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรนภา สุจริตรกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. จรัสพร มงคลขจิต)

5672156023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: ACTIVATED CHARCOAL, ZEOLITE, TITANIA, PHENOL, WASTEWATER TREATMENT

KHEMMAKORN GOMONSIRISUK: PREPARATION OF ACTIVATED CHARCOAL/ZEOLITE/TITANIA COMPOSITE MATERIAL FOR ORGANIC WASTE WATER TREATMENT FROM INDUSTRIES. ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, D.Eng., 97 pp.

Activated charcoal/zeolite/titania composite material was prepared for phenol waste disposal from many industries which led to environmental problems. On the ground of good absorption of activated charcoal with high specific surface area and the regular pores of zeolite structure with good ion exchange property, the hollow tubes were fabricated from this composite material in order to be disposable after water treatment processes compared with powder form. To prepare the composite, activated charcoal and NaA zeolite adsorbent powders were mixed with phenolic resin by high speed ball mill, kneaded with organic binder and extruded to the hollow tube, respectively. Then the outer tube surface was coated with TiO₂ 10 wt% suspension, reduction firing and foam insertion, respectively to make the composites floatable on water surface to get irradiation for TiO₂ excitation. It exhibited that NaA zeolite showed non-plasticity property, so activated charcoal:zeolite = 1:1 and 50 wt% phenolic resin was the easiest fabrication batch and showed the great strength with 650°C reduction firing for 3 h condition. The coated TiO₂ on activated charcoal/zeolite substrate was not worked as catalyst after 650°C reduction firing for 3 h so Suratthani Ball Clay and NaA zeolite was used as substrate instead. Ball Clay and zeolite substrate illustrated lower phenol absorption but it presented better phenol oxidation which detected from the change of UV absorbance pattern and maximum absorption which related to chemical reaction. Owing to more zeolite tended to require more TiO₂ photocatalyst coated on zeolite. Therefore, the sample was activated under UV irradiation. The sample with highest zeolite ratio (Ball Clay : Zeolite = 1:3) got the most phenol oxidation.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุน ทางด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัย และงบประมาณจากหลายภาคส่วน ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาเพื่อแก้ไขปัญหา ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรักความเอาใจใส่ ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและดำเนินงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาศักยภาพของผู้วิจัย นำไปสู่การเสริมสร้างองค์ความรู้ใหม่ ๆ เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาทั้งในงานวิจัยและในชีวิตการทำงานในอนาคต ให้ความทรงจำที่ดี รวมทั้ง ให้ความสำคัญในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่ครบถ้วนสมบูรณ์

เจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่และเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำงานวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) และ ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายสำหรับการ ทำงานวิจัยและการนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครอบครัวผู้วิจัย เพื่อน ๆ และ พี่ ๆ ครอบครัววัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ เป็นที่ปรึกษา ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ มอบมิตรภาพที่ดีและความอบอุ่นที่น่าจดจำตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่ในรั้วบ้านสีเทาหลังนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฟีนอลและสารประกอบฟีนอล	4
2.2 การกำจัดฟีนอลในน้ำเสีย.....	7
2.1.1 พอลิเมอไรเซชัน	8
2.1.2 การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	8
2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	9
2.1.4 วิธีการทางชีววิทยา.....	9
2.1.5 กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advance oxidation processes).....	10
2.1.5.1 การออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozonation).....	10
2.1.5.2 การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	10
2.1.5.3 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's reagent)	10

2.1.5.4 โฟโตคะตะลิสต์.....	11
2.1.5.5 ไททานีเย.....	14
2.1.6 การดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน.....	16
2.3 ถ่านกัมมันต์.....	18
2.4 ซีโอไลต์.....	20
2.4.1 โครงสร้างซีโอไลต์.....	21
2.4.2 ชนิดและสมบัติของซีโอไลต์.....	22
2.4.3 ซีโอไลต์ เอ (Zeolite A).....	27
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.1.1 สารเคมี 30	
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นวัสดุและทดสอบการกำจัดฟีนอล.....	31
3.2.1 เตรียมวัตถุดิบและชิ้นวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ด้วยการอัดรีด.....	31
3.2.2 การทดสอบการกำจัดฟีนอล.....	33
3.3 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุ.....	35
3.3.1 องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุ.....	35
3.3.2 ความแข็งแรงของวัสดุ.....	35
3.3.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุและการเคลือบติดของไททานีเยบนวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์.....	36
3.3.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททานีเย.....	36
3.3.5 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา.....	36

3.3.6 ความหนาแน่น	36
3.3.7 การดูดซึมน้ำ	37
3.3.8 ความพรุนตัว	37
3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลด้วย UV-Vis absorption spectrometer	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	39
4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบ	39
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	39
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ.....	40
4.1.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ	41
4.1.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของวัตถุดิบ	43
4.2 ศึกษาการขึ้นรูปและการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย	46
4.2.1 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ที่ส่งผลต่อการ ขึ้นรูปด้วยการอัดรีดและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ ผสมซีโอไลต์	47
4.2.2 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของ ชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์	50
4.2.3 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ส่งผลต่อความแข็งแรง ของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์.....	51
4.2.4 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่ส่งผลต่อความแข็งแรง ของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์.....	53
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะ	55
4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัสดุเชิงประกอบ	55
4.4 ผลการศึกษาวิธีการเคลือบ และ ปริมาณไททาเนีย ที่ใช้เคลือบลงบนวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ	56

4.4.1	วิธีการจุ่ม.....	57
4.4.2	วิธีการทาเคลือบ.....	58
4.4.3	วิธีการพ่นเคลือบ.....	59
4.4.4	ปริมาณไททาเนียที่เคลือบ.....	60
4.5	ผลการศึกษาความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และ ความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย.....	62
4.6	ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะโพรงของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ ซี โอไลต์/ไททาเนียด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller.....	63
4.7	ผลการนำวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียไปใช้กำจัดฟีนอลในน้ำ.....	64
4.8	ผลการนำผงไททาเนีย P25 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาใช้กำจัดฟีนอล.....	70
4.9	ศึกษาการขึ้นรูปและการใช้งานวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนีย.....	72
4.9.1	การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของดินดำสุราษฎร์ธานีต่อซีโอไลต์ที่ส่งผล ต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรดินดำ สุราษฎร์ธานีผสมซีโอไลต์.....	72
4.9.2	ผลการใช้วัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียกำจัดฟีนอล.....	76
4.10	ผลการวิเคราะห์การดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ด้วย FT-IR Spectroscopy.....	80
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	82
	รายการอ้างอิง.....	83
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟินอล	5
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางพิษวิทยาของฟินอลและอาการที่ปรากฏเมื่อได้รับฟินอลเข้าสู่ร่างกาย	5
ตารางที่ 2.3 สมบัติของไททาเนีย P25	15
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างวัสดุดูดซับ	17
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมเอซีโอไลต์และดินคำสุราษฎร์ธานี	39
ตารางที่ 4.2 ผลการผสมผงวัตถุติดกับตัวประสานอินทรีย์และการทดสอบความแข็งแรงเบื้องต้น ของชิ้นงานหลังเผา.....	48
ตารางที่ 4.3 การเคลือบติดของไททาเนียบนผิววัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ด้วยวิธีการ พ่นเคลือบ	60
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบหลังเผา 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง.....	63
ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย	64
ตารางที่ 4.6 ผลการผสมผงวัตถุติดกับตัวประสานอินทรีย์และการทดสอบความแข็งแรงเบื้องต้น ของชิ้นงานหลังเผา.....	73
ตารางที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบดินคำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์ก่อนและ หลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	75
ตารางที่ 4.8 ลักษณะผิวของวัสดุเชิงประกอบดินคำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียเผาที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	75
ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบดินคำสุราษฎร์ ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียหลังเผา 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง.....	76

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของฟินอลและอนุพันธ์ของฟินอล.....	4
ภาพที่ 2.2 การเกิดเรโซแนนซ์ของฟินอกไซด์แอนไอออน	7
ภาพที่ 2.3 ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (VB) กับแถบการนำ (CB) ที่ต่างกันของวัสดุ โฟโตคะตะลิสต์แต่ละชนิด	11
ภาพที่ 2.4 กลไกการเกิดตัวออกซิไดซ์ภายหลังการกระตุ้นโฟโตคะตะลิสต์ ด้วยแสงที่มีพลังงาน สูงกว่าช่องว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	12
ภาพที่ 2.5 กลไกการสลายตัวของฟินอลเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก	16
ภาพที่ 2.6 การสังเคราะห์คาร์บอนโฟมและโครงสร้างจุลภาพของคาร์บอนโฟม	20
ภาพที่ 2.7 สมบัติทางความร้อนของฟินอลิกเรซินภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	20
ภาพที่ 2.8 การเกิดหน่วยโครงสร้างพื้นฐาน (SBU) ของซีโอไลต์	22
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ a) zeolite A (3D, 4.2 Å), (b) zeolite Y (3D, 7.4 Å), (c) Zeolite L (1D, 7.1 Å), (d) ZSM-5 (silicalite) (2D, 5.3 × 5.6 Å, 5.1 × 5.5 Å) เมื่อ D คือ dimensions of channel system	23
ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟินอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหล โดย (○) คือ BEA (∞) และ (□) คือถ่านกัมมันต์	24
ภาพที่ 2.11 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับฟินอล บน HBEA(■), HFAU(◆) และ HMOR(▲)	25
ภาพที่ 2.12 จลนศาสตร์ของการดูดซับฟินอลความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตรบน HBEA(◆) HFAU(◆) และ HMOR(○) โดยเส้นที่ลากได้จากการจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ แบบ pseudo second-order	26
ภาพที่ 2.13 วัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์และการเปรียบเทียบความสามารถในการย่อย สลาย สี้อมด้วยตัวเร่งวัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์กับไททาเนียทางการค้า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 g/L สี้อมความเข้มข้น 1 ppm ที่ pH 5	26
ภาพที่ 2.14 โครงสร้างซีโอไลต์เอ	27

ภาพที่ 2.15 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีของเมทิลีนบลูบนโซเดียมเอซีโอไลต์และรูปแบบการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดของซีโอไลต์ก่อนและหลังใช้ดูดซับสีของเมทิลีนบลู	28
ภาพที่ 2.16 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบซีโอไลต์โซเดียมเอและคาร์บอน ในบรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน	29
ภาพที่ 3.1 แผนผังการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททานี	33
ภาพที่ 3.2 ชุดการทดลองฉายแสงยูวีเพื่อทดสอบการกำจัดฟีนอล	34
ภาพที่ 3.3 การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานด้วย Universal Testing Machine (Instron5843)	35
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบเฟสของโซเดียมเอซีโอไลต์และดินคำสุราษฎร์ธานี	40
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์	41
ภาพที่ 4.3 ลักษณะจุลภาคของถ่านกัมมันต์	41
ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของโซเดียมเอซีโอไลต์	42
ภาพที่ 4.5 ลักษณะจุลภาคของโซเดียมเอซีโอไลต์	42
ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์	43
ภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในโพรงของถ่านกัมมันต์กับความดัน (P) เมื่อ P_0 เป็นความอิ่มตัว ณ จุดกลั่นตัวของก๊าซ	44
ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวขนาดโพรงของโซเดียมเอซีโอไลต์	45
ภาพที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในโพรงของโซเดียมเอซีโอไลต์กับความดัน (P) เมื่อ P_0 เป็นความอิ่มตัว ณ จุดกลั่นตัวของก๊าซ	46
ภาพที่ 4.10 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	48
ภาพที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ผ่านการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอซีโอไลต์ เป็น ก) 3:1 ข) 1:1 และ ค) 1:3	49
ภาพที่ 4.12 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ เเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีฟีนอลิกเรซินปริมาณต่างกัน	50
ภาพที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่มีฟีนอลิกเรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก(ซ้าย) และร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก(ขวา) เเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง	51

ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ ซีโอไลต์เผาที่อุณหภูมิที่ต่างกัน.....	52
ภาพที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เผา 600 องศาเซลเซียส (ซ้าย) 650 องศาเซลเซียส (ขวา) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีสัดส่วนระหว่าง ถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอ ซีโอไลต์ เป็น ก),ข) 3:1 ค),ง) 1:1 และ จ),ฉ) 1:3.....	53
ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ ซีโอไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาต่างกัน	54
ภาพที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่มีถ่านกัมมันต์: โซเดียมเอซีโอไลต์เท่ากับ 1:1 เเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ก),ค) 1 ชั่วโมง และ ข),ง) 3 ชั่วโมง.....	54
ภาพที่ 4.18 องค์ประกอบเฟสของวัสดุเชิงประกอบหลังเผา 650 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง	55
ภาพที่ 4.19 องค์ประกอบเฟสของไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุเชิงประกอบก่อน และหลังเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	56
ภาพที่ 4.20 การเคลือบติดไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำตามลำดับ ด้วยวิธีการจุ่ม	57
ภาพที่ 4.21 ไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำก่อนและหลังทำการจุ่มชิ้นงาน ...	58
ภาพที่ 4.22 การเคลือบติดไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำตามลำดับ ด้วยวิธีการทาด้วยแปรง	59
ภาพที่ 4.23 การเคลือบติดไททาเนีย ร้อยละ 1, 5 และ 10 ในน้ำตามลำดับ ด้วยวิธีการพ่น.....	60
ภาพที่ 4.24 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอล	65
ภาพที่ 4.25 แผนภูมิแสดงการกำจัดฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ด้วยวัสดุเชิง ประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียที่ผ่านการเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) 50%P (ข) 30%P	67
ภาพที่ 4.26 แผนภาพแสดงแถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย สูตร 1AC:1Z 50%P ที่ผ่านการเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก) ในที่มืด และ ข) ฉายแสงยูวี.....	68
ภาพที่ 4.27 แผนภาพแสดงแถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ถูกกำจัดด้วยผงไททาเนีย P25 0.01 กรัม.....	69
ภาพที่ 4.28 แผนภูมิแสดงการสลายตัวของฟีนอลในน้ำเมื่อฉายแสงยูวี โดยใส่ผงไททาเนีย 0.01 กรัม ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน.....	71

ภาพที่ 4.29 เฟสองค์ประกอบของไททาเนีย P25 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	
แตกต่างกัน.....	71
ภาพที่ 4.30 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟินอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้าน	
ส่วนถูกกำจัดด้วยผงไททาเนีย P25 ผสมกับถ่านกัมมันต์เผาในบรรยากาศรีดักชัน	
ที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง โดยมีผงไททาเนีย P25 รวมอยู่ 0.01 กรัม ..	72
ภาพที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนีย	
เผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง	73
ภาพที่ 4.32 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบดินดำ	
สุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียก่อนและหลังเผา.....	74
ภาพที่ 4.33 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟินอลในน้ำเมื่อจุ่มวัสดุเชิงประกอบดินดำ	
สุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียในที่มืด โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินดำ	
สุราษฎร์ธานี:โซเดียมเอซีโอไลต์เป็น ก) 1:1 ข) 1:2 และ ค) 1:3.....	77
ภาพที่ 4.34 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของสารละลายฟินอลที่เปลี่ยนไปเมื่ออยู่ในรูปของ โซเดียม	
ฟีนอกไซด์.....	78
ภาพที่ 4.35 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟินอลในน้ำเมื่อจุ่มวัสดุเชิงประกอบดินดำ	
สุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียภายใต้แสงยูวี โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ	
ดินดำสุราษฎร์ธานี: โซเดียมเอซีโอไลต์เป็น ก) 1:1 ข) 1:2 และ ค) 1:3	79
ภาพที่ 4.36 การส่องผ่านแสงอินฟราเรดของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังดูดซับฟินอล..	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเสียอินทรีย์ปนเปื้อนที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ได้แก่ ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูง [1] ด้วยโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกทำให้สารเหล่านี้ถูกออกซิไดซ์และสลายตัวในธรรมชาติได้ยาก สารอินทรีย์ดังกล่าวจึงตกค้างอยู่ในแหล่งน้ำเป็นระยะเวลานานซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ทั้งแบบเรื้อรังหรือแบบเฉียบพลันแม้มีอยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียจึงถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนทำให้ความเป็นพิษของน้ำเสียลดลง ได้แก่ วิธีการย่อยสลายโดยใช้สารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัว มีข้อเสียคือต้องใช้สารเคมีจำนวนมากและสารเคมีมักมีราคาแพง วิธีการย่อยสลายโดยอาศัยชีวภาพต้องปรับภาวะให้เหมาะสมกับชนิดของจุลินทรีย์ หรือบางกรณีสารอินทรีย์บางชนิดอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ส่งผลให้จุลินทรีย์ตายและไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์อื่นที่เหลือได้ วิธีที่นิยมคือการใช้วัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ดูดซับสารอินทรีย์ โดยลักษณะของวัสดุดูดซับที่ดีควรมีขนาดเล็กและมีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากจึงจะสามารถดูดซับสารได้ดี และเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียงานวิจัยส่วนมากจึงพยายามใช้วัสดุดูดซับที่มีราคาถูกหรือสามารถหาและผลิตได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียเนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (micro pore) ไปจนถึงขนาดใหญ่ (macro pore) จำนวนมาก [2] และ ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่เชื่อมกันเป็นโครงข่ายซึ่งภายในโครงข่ายมีแคทไอออนดุลประจุอยู่ ทำให้ซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนภายในโครงข่ายกับแคทไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำหรือส่วนของสารอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วบวกสูงได้ [3] แต่เนื่องจากวัสดุดูดซับที่ใช้ส่วนมากใช้กันในรูปแบบที่เป็นผงทำให้การเก็บและกำจัดยุ่งยาก ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุดูดซับที่ดีและใช้กันอย่างแพร่หลายมาขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบที่สามารถลอยบนผิวน้ำได้ และมีขนาดใหญ่พอที่จะเก็บทำลายได้ง่ายรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบผง นอกจากวิธีการกำจัดสารอินทรีย์ที่กล่าวมา ยังมีอีกวิธีการที่มีประสิทธิภาพดี คือ วิธีการย่อยสลายโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

โฟโตคะตะลิสต์คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อาศัยแสงเป็นตัวกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา โดยแสงที่ใช้กระตุ้นต้องมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของโฟโตคะตะลิสต์ชนิดนั้น ๆ ในปัจจุบันวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่ใช้มีหลายชนิดโดยไททาเนียเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากราคาถูก ไม่เป็นพิษ เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาหรือคงทนต่อสารเคมี ไม่ละลายน้ำ และมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.2 eV ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงยูวีที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าประมาณ 380 nm [4] จึงสามารถใช้งานเพื่อเร่งการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้ภายใต้แสงอาทิตย์ แต่ไททาเนียมักถูกใช้ในรูปแบบผงทำให้ในการใช้งานจริงต้องมีการกวนน้ำเสียตลอดเวลาเพื่อกระจายอนุภาคไททาเนียไม่ให้ตกตะกอน และได้รับการกระตุ้นด้วยแสงยูวี แต่หากปริมาณไททาเนียมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการบดบังรังสียูวีที่จะส่องผ่านน้ำลงไปกระตุ้นไททาเนียได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดประยุกต์ไททาเนียเคลือบบนวัสดุดูดซับเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เพื่อให้ไททาเนียที่ถูกเคลือบลอยอยู่บนผิวน้ำได้รับการกระตุ้นด้วยแสงยูวีมากกว่าได้น้ำและในขณะเดียวกันยังมีวัสดุดูดซับช่วยดูดซับสารอินทรีย์ปนเปื้อนไปพร้อม ๆ กันด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียโดยใช้ไททาเนียที่ใช้ทางการค้าคือ P-25 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียในการสลายสารอินทรีย์ฟีนอลภายใต้แสงยูวี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาการเตรียมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ รวมทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ และปริมาณไททาเนียที่เคลือบที่มีผลต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย โดยปรับสัดส่วนของปริมาณถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ ฟีนอลิกเรซิน รวมทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อให้วัสดุมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานในน้ำ วิเคราะห์สมบัติเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ และศึกษาการนำไปใช้แตกสลายฟีนอลในน้ำภายใต้แสงยูวี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียที่มีสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์

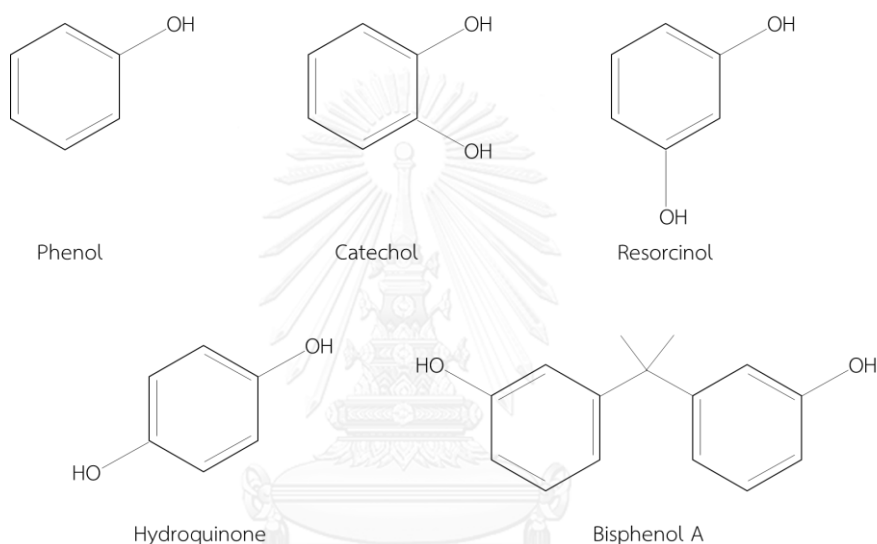


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟีนอลและสารประกอบฟีนอล

ฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดหนึ่ง (Volatile organic compounds, VOCs) มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกต่อกับหมู่ไฮดรอกซิล หากมีหมู่แทนที่อื่น ๆ มาเกาะกับวงอะโรมาติกเพิ่มเป็นอนุพันธ์ของฟีนอล



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นทั้งสารตั้งต้นและผลผลิตจากอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี สี ย้อม ยา พลาสติก น้ำยาทำความสะอาด สารเคมีทางการเกษตร จากตารางที่ 2.1 ฟีนอลสามารถละลายน้ำได้สารละลายใส ไม่มีสี จึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อละลายในน้ำปริมาณเล็กน้อยระดับในล้านส่วนจึงสังเกตเห็นด้วยกลิ่นได้ยาก และด้วยหมู่แอลกอฮอล์ของฟีนอลที่สามารถแตกตัวให้โปรตอนจึงแสดงสมบัติเป็นกรดอ่อนรวมทั้งขนาดโมเลกุลที่เล็กของฟีนอล จึงทำให้ฟีนอลสามารถทำลายและซึมผ่านผิวหนังได้

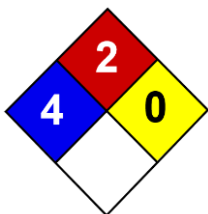
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของฟีนอล [5]

สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี	รายละเอียด
สูตรโมเลกุล	C ₆ H ₆ O
น้ำหนักโมเลกุล	64.11 g/mol
ลักษณะภายนอก	เป็นผลึกของแข็ง
สี	ใส ไม่มีสีจนถึงชมพูอ่อน
กลิ่น	กลิ่นฉุนเฉพาะตัว
ความเป็นกรด - ด่าง	pH = 5-6 (ขึ้นกับความเข้มข้น)
ความถ่วงจำเพาะ/ความหนาแน่น	1.071 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	40 - 42°C
จุดเดือด	182°C (760mmHg)
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ ละลายในน้ำได้ 83 g/100mL (20°C)
ความดันไอ	3.24 g/L
ความสามารถในการดูดกลืนแสง UV-Vis (λ_{max})	270 nm

ฟีนอลมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตแม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย มีพิษเฉียบพลันและเมื่อได้รับฟีนอลสะสมเป็นระยะเวลานานจะแสดงอาการที่เป็นพิษเรื้อรัง และสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้หลายช่องทาง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

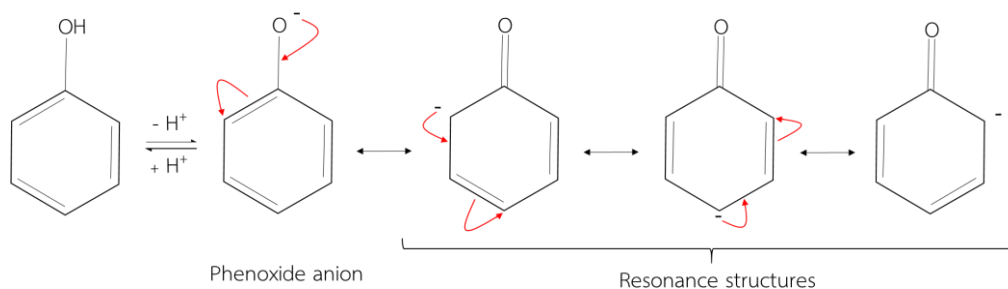
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางพิษวิทยาของฟีนอลและอาการที่ปรากฏเมื่อได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกาย [6]

รายละเอียด	ความเป็นพิษและอาการที่แสดง
วิธีที่ได้รับฟีนอล <ul style="list-style-type: none"> - สัมผัสทางผิวหนัง - สัมผัสทางตา - สูดดม - กลืนกิน 	ผลของพิษเฉียบพลัน <ul style="list-style-type: none"> ดูดซึมผ่านผิวหนังทันที ระคายเคืองและเกิดแผลไหม้ ทำลายเยื่อเมือกบริเวณทางเดินหายใจ หายใจติดขัด เป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหารและอวัยวะภายใน เช่น ระบบประสาทส่วนกลาง ไต ตับ ตับอ่อน ม้าม

รายละเอียด	ความเป็นพิษและอาการที่แสดง				
<p>LD50 คือ ปริมาณที่สัตว์ทดลองได้รับแล้วทำให้สัตว์ตาย 50% ของทั้งหมด และ LC50 คือ ความเข้มข้นของสารในอากาศที่ทำให้สัตว์ตาย 50% ของทั้งหมด</p> <p>กรณีทดลองในหนู ชนิด Rat พบว่า</p> <p>LD50 ทางปาก</p> <p>LD50 ทางผิวหนัง</p> <p>LD50 ในเยื่อช่องท้อง</p> <p>LD50 ฉีดเข้าใต้ผิวหนัง</p> <p>LC50 ทางการสูดดม</p>	<p>พิษเฉียบพลัน</p> <p>317 mg/kg แสดงอาการชัก</p> <p>669 mg/kg สิ้น ผิวหนังระคายเคือง</p> <p>127 mg/kg</p> <p>460 mg/kg</p> <p>316 mg/L</p>				
<p>การได้รับฟีนอลแบบเรื้อรัง</p>	<ul style="list-style-type: none"> - จัดเป็นสารก่อมะเร็งตามข้อกำหนดของ RTECS ก่อให้เกิดเนื้องอกในหนูชนิด mouse - เป็นสารก่อการกลายพันธุ์ ชนิด HeLa เซลล์ และเม็ดเลือดขาวในคน สามารถทำลายดีเอ็นเอของสัตว์ได้ - เป็นสารก่อวิรูปทำให้เกิดความผิดปกติของทารกในครรภ์ และเป็นอันตรายต่อระบบสืบพันธุ์ 				
<p>สัญลักษณ์แสดงอันตรายตามระบบ NFPA ของสารฟีนอล ใน MSDS</p>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  <div style="margin-left: 20px;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="background-color: blue; color: white;">Health</td></tr> <tr><td style="background-color: red; color: white;">Fire</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow; color: black;">Reactivity</td></tr> <tr><td style="background-color: white; color: black;">Personal Protection</td></tr> </table> </div> </div>	Health	Fire	Reactivity	Personal Protection
Health					
Fire					
Reactivity					
Personal Protection					

เมื่อละลายฟีนอลในน้ำด้วยโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก ไฮโดรเจนอะตอมที่สร้างพันธะกับออกซิเจน สามารถแตกตัวออกจากโมเลกุลของฟีนอลได้โปรตอน ฟีนอลจึงแสดงสมบัติเป็นกรดอ่อน ๆ เกิดเป็นสารประกอบประจุลบ (phenoxide anion) จากนั้นอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของออกซิเจนอะตอมที่ตำแหน่งหมู่ให้อิเล็กตรอน (nucleophiles) จะเคลื่อนที่ไปสร้างพันธะคู่กับคาร์บอนอะตอมที่อยู่ตำแหน่งหมู่รับอิเล็กตรอน (electrophile) ในวงอะโรมาติก อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวสามารถ

เคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ ตามตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมเพื่อลดพลังงาน ทำให้เกิดโครงสร้างเรโซแนนซ์ โมเลกุลจึงมีความเสถียรมากขึ้น [7] ดังแสดงในภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของฟินอลที่เกิดขึ้นค่อนข้างยากและต้องใช้เวลาเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ดังกล่าว



ภาพที่ 2.2 การเกิดเรโซแนนซ์ของฟีนอกไซด์แอนไอออน

เนื่องจากฟินอลมีความเป็นพิษสูง องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (USEPA) จึงพิจารณาให้ฟินอลเป็นของเสียอันตรายที่ต้องควบคุมและจำกัดก่อนปล่อยทิ้งออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ [8] สำหรับประเทศไทยมีบทบัญญัติทางกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2539 โดยกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งต้องมีสารประกอบฟินอลไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร [9] เพื่อควบคุมปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการวิจัยจำนวนมากเพื่อพัฒนากระบวนการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟินอลด้วยวิธีการที่หลากหลาย โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำให้มีประสิทธิภาพดี รวดเร็ว ประหยัด และลดความยุ่งยากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.2 การกำจัดฟินอลในน้ำเสีย

ฟินอลในน้ำเสียถูกกำจัดได้ด้วยหลายวิธี ได้แก่ การสกัดด้วยตัวทำละลาย การดูดซับด้วยวัสดุดูดซับ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการย่อยสลายทางชีวภาพ [10] โดยแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป การเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการบำบัดน้ำ เช่น ค่าใช้จ่าย ชนิดและปริมาณสารเคมี ความยุ่งยาก และเวลาที่ใช้

2.1.1 พอลิเมอไรเซชัน

เป็นวิธีการที่ทำให้พินอลเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้น โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (peroxidases) เกิดเป็นเอนไซม์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยจะจับกับวงอะโรมาติกของพินอลกับบริเวณตำแหน่งว่องไวของเอนไซม์ (active site) เกิดเป็นอนุมูลอิสระของพินอลแล้วหลุดออกสู่สารละลายในขณะที่เอนไซม์จะกลับคืนสภาพเป็นเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสดังเดิมอย่างรวดเร็ว จากนั้นอนุมูลอิสระตัวอื่นจะมาจับกับพินอลเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นภายในเวลาไม่กี่นาที เนื่องจากพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่ละลายในน้ำจึงสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอน เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสนี้ได้มาจากพืชจำพวก Horseradish (HRP), Coprinus macrorhizus (CMP), Arthromyces ramosus (ARP) และ soybean (SBP) ซึ่งใช้กำจัดพินอลและสารประกอบพินอลในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11] อย่างไรก็ตามต้องปรับความเป็นกรดต่าง รวมทั้งปริมาณของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ดีและรวดเร็ว และยังเป็นกรยากสำหรับการใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เนื่องจากเอนไซม์เหล่านี้เป็นผลผลิตจากพืชบางกลุ่มเท่านั้น นอกจากนี้การใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในปริมาณที่ต่ำยังไม่สามารถกำจัดพินอลได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย จึงมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดพอลิเมอไรเซชันของพินอลได้ที่ปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ำ ๆ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มสารเคมีที่ต้องใช้ในกระบวนการกำจัดพินอล

2.1.2 การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้ากระบวนการหนึ่งที่สามารถประยุกต์กำจัดพินอลในน้ำเสียได้โดยต่อโลหะเข้ากับขั้วแคโทด (ขั้วบวก) และแอโนด (ขั้วลบ) โลหะที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้าคืออะลูมิเนียมเนื่องจาก Al^{3+} จากแอโนดจะทำปฏิกิริยากับ OH^- จากแคโทด เกิดเป็น $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเป็นเจลซึ่งสามารถรวมตัวกับสารอินทรีย์หรือโลหะอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำได้แล้วตกตะกอนออกมาเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น [12] โดยความสามารถในการกำจัดพินอลขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ระยะเวลา ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอล แม้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพ กำจัดสีและกลิ่นได้ดี ตะกอนมีขนาดใหญ่กรองออกได้ง่าย แต่วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีข้อเสียคือต้องเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดเมื่อเวลาผ่านไปเพราะขั้วไฟฟ้าจะถูกทำลายไปบางส่วน

บางกรณีอาจเกิดฟิล์มออกไซด์ชั้นที่ขี้วแคโทดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของเสียลดลงและการใช้ไฟฟ้าสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าวิธีอื่น

2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย

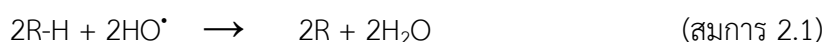
เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการของตัวทำละลายและตัวถูกละลายในสารละลายที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงกันเพื่อให้สารที่ต้องการสกัดแยกออกมาจากสารละลายชนิดหนึ่งและแพร่เข้ามาละลายในตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่งให้มากที่สุด โดยตัวทำละลายที่ใช้ต้องทำละลายได้ดีแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด หากต้องการแยกสีหรือกลิ่น ตัวทำละลายไม่ควรมีสีหรือกลิ่น มีจุดเดือดต่ำและราคาถูก โดย Rao และคณะ [13] ทดลองสกัดฟีนอลในน้ำเสียกรดเซบาซิกด้วยตัวทำละลายนอร์มัลแอลกอฮอล์เทียบกับตัวทำละลายผสมแอมมีนพบว่าสามารถใช้สกัดฟีนอลความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 2500 ส่วนในล้านส่วนได้ถึง 76-96% แม้ใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อยเมื่อเทียบกับน้ำเสียแต่อย่างไรก็ตามการสกัดแบบ liquid-liquid extraction อาจพบปัญหาการแยกชั้นของตัวทำละลายไม่ชัดเจน เนื่องจากหลายปัจจัย เช่นการเขย่าที่รุนแรง ในระบบมีสารที่เป็นตัวก่ออิมัลชัน (emulsifier) มีอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ หรืออาจเป็นธรรมชาติของตัวทำละลายบางชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรมีเทน หากใช้สกัดสารที่เป็นเบสจะเกิดอิมัลชันได้ง่าย สามารถแก้ปัญหาได้โดยหลายวิธี ได้แก่ ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้นซึ่งอาจใช้เวลานาน เติมน้ำเกลือในระบบจนอิมัลชันแตก ความถ่วงจำเพาะและความเป็นไอออนิกของชั้นตัวทำละลายน้ำเพิ่มมากขึ้นและมีความแตกต่างจากชั้นตัวทำละลายอินทรีย์มากขึ้น

2.1.4 วิธีการทางชีววิทยา

วิธีการทางชีวภาพอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มมากขึ้นการย่อยสลายของแบคทีเรียจะแย่งเพราะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียถูกยับยั้งหรือทำให้ตายจากความเป็นพิษของสารอินทรีย์ [14] ดังนั้นการใช้แบคทีเรียในการกำจัดสารอินทรีย์ต้องปรับภาวะให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละชนิด นอกจากนี้การใช้กระบวนการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียบางชนิดยังใช้ระยะเวลาที่นานหลายสิบชั่วโมงจึงเกิดการใช้อเอนไซม์หรือสารตัวเติมชนิดอื่นมาช่วยการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.1.5 กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advance oxidation processes)

กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อกำจัดสารอินทรีย์โดยอาศัยสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดีเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ อาทิ ไฮดรอกซิลแรดิคัลซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษเพื่อให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงดังแสดงในสมการ 2.1



สารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์แล้วมีขนาดและความเป็นพิษลดลงจนท้ายที่สุดเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [15] กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันสามารถแบ่งได้หลายวิธี ได้แก่

2.1.5.1 การออกซิเดชันด้วยโอโซน (Ozonation)

เป็นกระบวนการที่อาศัยการออกซิไดซ์ของโอโซนด้วยหลักการที่เป็นไปได้ 2 ประการคือ

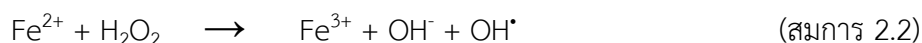
- 1) โอโซนออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์โดยตรง
- 2) กระบวนการสลายโอโซนก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลจากนั้นไฮดรอกซิลแรดิคัลจึงเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์

2.1.5.2 การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

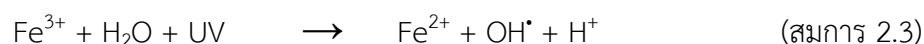
เป็นกระบวนการที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลเพื่อใช้เป็นสารออกซิไดซ์สารอินทรีย์

2.1.5.3 ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's reagent)

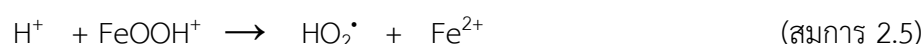
เป็นกระบวนการที่ใช้ Fe^{2+} กับ H_2O_2 ทำปฏิกิริยากันก่อให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลเพื่อใช้กำจัดสารอินทรีย์ [16]



และเมื่อเวลาผ่านไป Fe^{3+} จะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่ง Fe^{2+} หมดไปแก้ปัญหาด้วยการฉายแสงยูวีเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.3

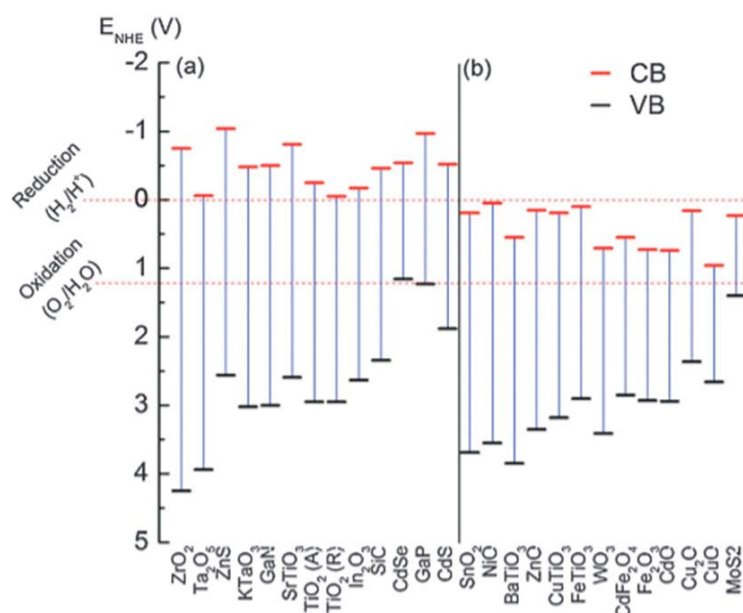


ดังนั้นจึงเกิดวิธีการรวมที่ใช้ $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$ (Fe^{3+}) / UV เรียกว่า Photo assisted Fenton นอกจากนี้การปรับความเป็นกรดให้อยู่ในช่วง $\text{pH} = 2.7-2.8$ จะเกิดปฏิกิริยา Fenton-like ดังแสดงในสมการ 2.4 และ 2.5



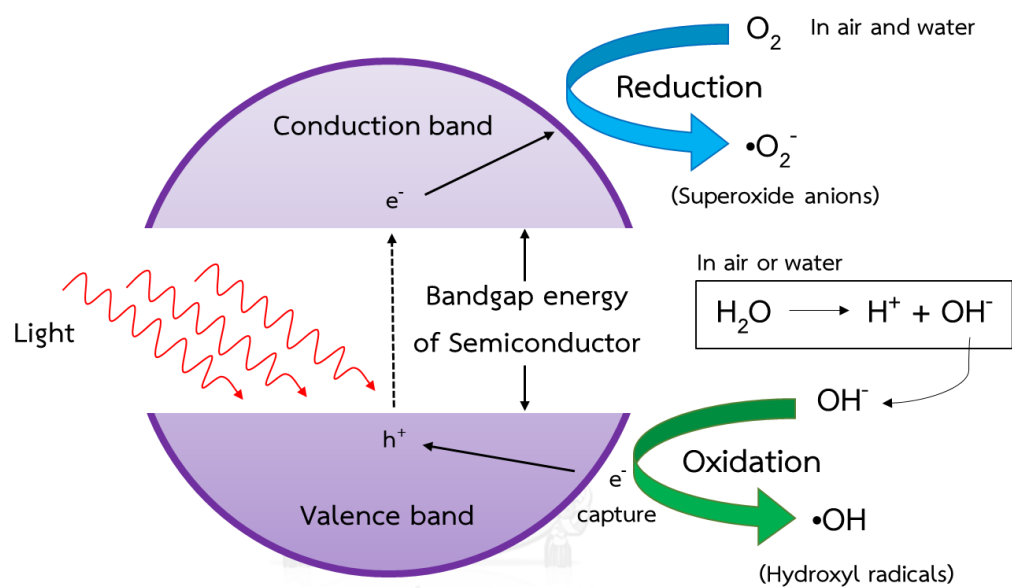
2.1.5.4 โฟโตคะตะลิสต์

โฟโตคะตะลิสต์เป็นกระบวนการที่อาศัยสารกึ่งตัวนำทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารกึ่งตัวนำที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากพอ สำหรับการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปยังแถบการนำ (Conduction Band) [17] เพื่อให้โฟโตคะตะลิสต์ช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้ด้วยการผลิตตัวออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ดี โดยระยะห่างของแถบวาเลนซ์กับแถบการนำมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุกึ่งตัวนำ ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (VB) กับแถบการนำ (CB) ที่ต่างกันของวัสดุโฟโตคะตะลิสต์แต่ละชนิด [18]

หากระดับพลังงานต่างกันมาก ต้องใช้พลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนมากขึ้น จึงสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้กระตุ้นมากขึ้น นอกจากนี้ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้ ต้องมีค่าครอบคลุมค่าศักย์ไฟฟ้าคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ต้องการให้เกิดด้วยเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ และได้ตัวออกซิไดซ์ตามต้องการ สำหรับการประยุกต์วัสดุกึ่งตัวนำเป็น โฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดมลพิษที่เป็นสารประกอบอินทรีย์อาศัยน้ำ ความชื้นในอากาศ และก๊าซออกซิเจนเป็นแหล่งกำเนิดตัวออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ดี โดยมีกลไกการกระตุ้นและผลิตตัวออกซิไดซ์ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กลไกการเกิดตัวออกซิไดซ์ภายหลังการกระตุ้นโฟโตคะตะลิสต์ ด้วยแสงที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

เริ่มจากมีแสงที่มีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำ จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาวคลื่นแสง [19]

$$E_g \text{ (J)} = hc/\lambda \quad (\text{สมการ 2.6})$$

$$E_g \text{ (J)} = (1.98 \times 10^{-16})/\lambda \quad (\text{สมการ 2.7})$$

$$E_g \text{ (eV)} = (1237.5)/\lambda \quad (\text{สมการ 2.8})$$

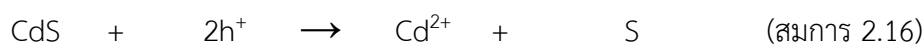
เมื่อ E_g คือพลังงานขั้นต่ำที่ใช้ในการกระตุ้นโฟโตคะตะลิสต์หรือช่องว่างระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (พลังงาน $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

ที่น่าสนใจและใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่นบำบัดน้ำ และ กำจัดมลพิษทางอากาศ

2.1.5.5 ไททาเนีย

ไททาเนียเป็นวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ไททาเนียที่พบในธรรมชาติมี 3 เฟส ได้แก่ อะนาเทส รูไทล์ และบรูไคต์ โดยเฟสที่ในงานโฟโตคะตะลิสต์มากที่สุดคืออะนาเทส [22] ซึ่งมีช่องว่างระดับพลังงาน 3.2 eV จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.8 ไททาเนียจึงสามารถถูกกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอินทรีย์ได้ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 387 นาโนเมตรซึ่งเป็นแสงยูวี (ความยาวคลื่นแสง 200-400 นาโนเมตร) ซึ่งแสงยูวีมีอยู่ร้อยละ 3-5 ในแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ไททาเนียยังมีราคาถูก การละลายต่ำ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทนทานต่อสารเคมีและการกัดกร่อนจึงมีความเสถียรเมื่อเทียบกับวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ชนิดอื่น อาทิ CdS, ZnS และ Fe₂O₃

จากการวิจัยของ B. Neppolian และคณะ [23] เปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมผ้าอินทรีย์ด้วยโฟโตคะตะลิสต์หลายชนิดเมื่อฉายแสงอาทิตย์ 8 ชั่วโมง เทียบกับฉายแสงยูวี 5 ชั่วโมง พบว่าความสามารถในการเร่งการย่อยสลายสีย้อมของโฟโตคะตะลิสต์เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งสองชนิดแหล่งกำเนิดแสง โดยไททาเนีย P25 มีความสามารถในการเร่งการสลายตัวของสีย้อมได้ดีที่สุด ลำดับถัดมาคือ ZnO CdS ZrO₂ และ WO₃ ตามลำดับ โดย ZnO และ CdS ถูกกัดกร่อนและก่อให้เกิดการปนเปื้อนโลหะในน้ำได้ตั้งสมการ



Renata Kaplan และคณะ [24] เปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายบิสฟีนอลเอ ความเข้มข้น 10 ส่วนในน้ำล้านส่วน ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยไททาเนีย 125 มิลลิกรัม/ลิตรโดย เทียบกันระหว่างเฟสอะนาเทส รูไทล์ บรูไคต์ และ P25 ซึ่งเป็นไททาเนียทางการค้าที่เป็นเฟสผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์ พบว่าเฟสที่มีความสามารถในการเร่งการสลายตัวของบิสฟีนอลเอได้ดีที่สุดคือ P25 เนื่องจากเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ช่วยลดการเกิด recombination ในงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ไททาเนีย P25 เป็นวัสดุโฟโตคะตะลิสต์เพื่อใช้สำหรับเร่งการสลายตัวของพีนอลเนื่องจากประสิทธิภาพการเร่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดและ

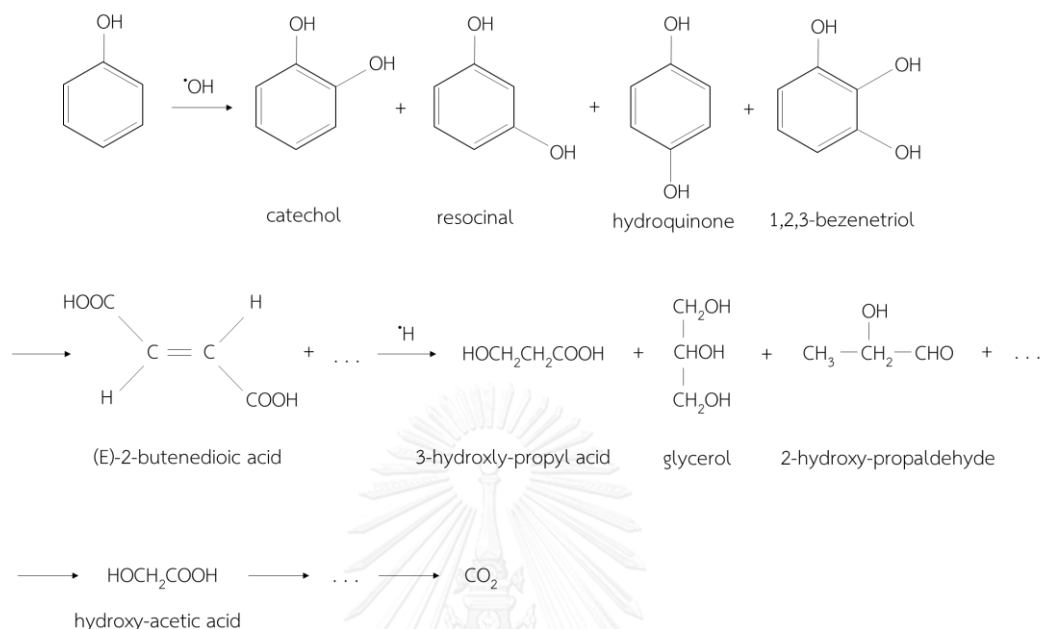
ความเสถียรของตัววัสดุเมื่อเทียบกับโฟโตคะตะลิสต์ชนิดอื่น โดยไททาเนีย P25 มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของไททาเนีย P25 [25]

Properties and Contents	TiO ₂ (Degussa, P25)
Grain size	20 nm
Purity	99+%
Appearance	White Powder
Anatase/Rutile	85:15
Specific Surface Area	>30 m ² /g
Apparent density	0.3 g/cm ²
pH value	7-8 (untreated type)
Loss of weight in drying	≤0.5 %
Loss of weight in burning	≤1.0 %
Bulk density	0.15 – 0.25 g/cm ³
True density	3.9 g/cm ³
TiO ₂	99.9%
Aluminium	< 15ppm
Magnesium	< 30ppm
Silicon	< 50ppm
Calcium	< 35ppm
Sulfur	< 84ppm
Manganese	< 15ppm

Zhifeng Guo และคณะ [26] ศึกษาการสลายตัวของฟีนอลด้วยไททาเนียในน้ำ โดยใส่ผงไททาเนียในน้ำฟีนอลความเข้มข้นต่ำกว่า 100 mg/L ในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกวนตลอดเวลา จากนั้นฉายแสงยูวี เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง จึงแยกสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายฟีนอลด้วย Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC-MS) เทียบกับการใช้ High Pressure Liquid Chromatography (HPLC) พบว่าเกิด catechol resocinal hydroquinone 1,2,3-bezenetriol

(E)-2-butenedioic acid 3-hydroxy-propyl acid glycerol 2-hydroxy-propaldehyde
hydroxy-acetic acid โดยมีกลไกการสลายตัวดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กลไกการสลายตัวของฟินอลเกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก

2.1.6 การดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน

เป็นวิธีการกำจัดสารโดยการดูดซับสารปนเปื้อนเข้าไปในโพรงของตัวดูดซับหรือแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารปนเปื้อนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีส่วนประกอบที่มีประจุอยู่เพื่อให้สารปนเปื้อนเข้ามาติดอยู่กับตัวดูดซับ วัสดุที่ใช้ดูดซับมีอยู่หลายชนิดโดยประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับความจำเพาะเจาะจงระหว่างตัวดูดซับกับสารปนเปื้อน พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ อัตราการไหลของสารละลายที่ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรดเบส ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ขนาดและลักษณะโพรงของตัวดูดซับ โดยขนาดของโพรงสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท [27] ดังนี้

1) โพรงชนิดแมโครพอร์ (macropores)

เป็นโพรงที่มีขนาดโพรงมากกว่า 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงมากกว่า 25 นาโนเมตร

2) โพรงชนิดเมโซพอร์ (mesopores)

เป็นโพรงที่มีขนาดโพรงตั้งแต่ 2 ถึง 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงระหว่าง 1 ถึง 25 นาโนเมตร

3) โพรงชนิดไมโครพอร์ (micropores)

เป็นโพรงที่มีขนาดโพรงเล็กกว่า 2 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงน้อยกว่า 1 นาโนเมตร

นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้วัสดุดูดซับคือราคาวัสดุ เพื่อลดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย วัสดุดูดซับที่มีราคาถูกจึงเป็นตัวเลือกอันดับต้น ๆ สำหรับงานกำจัดและบำบัดน้ำเสีย และเพื่อลดความยุ่งยากในการเตรียมหรือปรับแต่งผิวของวัสดุดูดซับ จากตัวอย่างวัสดุดูดซับราคาถูกที่แสดงในตารางที่ 2.4 พบว่าถ่านกัมมันต์เป็นหนึ่งในวัสดุดูดซับที่ได้จากอุตสาหกรรมการเกษตร มีรูพรุนสูงจึงดูดซับได้ดีมาก นอกจากถ่านกัมมันต์แล้วยังมีซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการดูดซับจากลักษณะความเป็นโพรงที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน วัสดุดูดซับทั้งสองชนิดนี้จึงเป็นที่สนใจในงานการดูดซับฟีนอลเพื่อกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างวัสดุดูดซับ [28]

วัสดุดูดซับ ราคาถูก	ตัวอย่างวัสดุดูดซับ	ข้อดี	ข้อจำกัด
วัสดุดูดซับจากธรรมชาติ	ดิน ได้แก่ ดินที่ประกอบไปด้วย มอนต์โมริลโลไนต์ ซาโปไนต์ อิลไลต์ เคโอลิไนต์ เซอร์เพนไทน์ ทัลค์ เวอร์มิคูไลต์	ถูกและหาได้ง่ายโดยราคาขึ้นอยู่กับแหล่งที่ขายและชนิดของดิน	- ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ในดิน โครงสร้างดินและแร่ธาตุในดิน - การกรองยากเนื่องจากดินมีอนุภาคขนาดเล็ก
	วัสดุที่มีซิลิกาสูง ได้แก่ ซิลิกาบีด แก้ว อะลูไนต์ เพอร์ไลต์ โดโลไมต์	ถูกและหาได้ง่าย	- ซิลิกาบีดไม่ทนภาวะที่เป็นเบส - ถ้าพึ่งวัสดุที่มีซิลิกาสูงดูดซับฟีนอลได้ไม่ดีต้องปรับแต่งพื้นผิวก่อนนำไปใช้งาน
	ซีโอไลต์ ได้แก่ แร่ตามธรรมชาติ หรือสังเคราะห์จากเกลือ จากดิน สารที่มีซิลิกา อะลูมินาสูง ๆ	สังเคราะห์ง่าย บางชนิดเกิดเองได้ตามธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แลกเปลี่ยนไอออนได้	- การดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดตัวถูกดูดซับและชนิดของซีโอไลต์เนื่องจากโครงสร้างโพรง และ Si/Al ที่ต่างกัน
วัสดุชีวภาพ	ไคตินและไคโตซาน สกัดจากเปลือกแข็งของสัตว์ในคลาสครัสเตเชียน เช่น ปู กุ้ง เคย	นำของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารมาใช้ให้เกิดประโยชน์	- ต้องใช้เอนไซม์ช่วยให้ฟีนอลเปลี่ยนรูปก่อนถูกดูดซับแบบจำเพาะเจาะจงกับไคโตซาน

วัสดุดูดซับ ราคาถูก	ตัวอย่างวัสดุดูดซับ	ข้อดี	ข้อจำกัด
	ฟีด เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์	ใช้ดูดซับสารมีขี้วัวได้ เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน คาร์บอกซิลิก ฟีนอลิก และอีเทอร์	- มีข้อจำกัดจากความเสถียรทางเคมีที่ต่ำ ต้องผ่านการปรับแต่ง เช่น ทำเป็นเรซิน โดยผสมฟีดที่ผ่านการออกซิไดซ์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
	ชีวมวล ทั้งที่ตายแล้วและมีชีวิตอยู่	ทำได้ครั้งละมาก ๆ ในราคาที่ถูกลง ผ่านกระบวนการหมักระหว่างยาปฏิชีวนะกับเอนไซม์	- ต้องควบคุมภาวะให้เหมาะสมต่อการทำงานของชีวมวล เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเบส
วัสดุเหลือใช้/ผลพลอยได้จากภาคเกษตรและอุตสาหกรรม	ถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ใช้ดูดซับสารได้ดีมาก	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีอาจมีสารเคมีที่ใช้หลงเหลืออยู่เล็กน้อย
	ของเสียทางการเกษตร ได้แก่ ชีเล็กน้อย แกลบ เปลือกไม้ ชานอ้อย	หาได้ง่ายในประเทศ เกษตรกรรมอย่างไทย ตัวดูดซับบางชนิด จำเพาะเจาะจงกับสารประกอบฟีนอลิก	- อาจดูดซับได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์เล็กน้อย ชีเล็กน้อย และเปลือกไม้บางชนิดมีองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันความสามารถในการดูดซับจึงแตกต่างกัน
	ของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ชีไถ่ลอย กากตะกอน	นำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ใหม่ได้	- ต้องเลือกของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมที่เหมาะสมไม่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ - การดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลน้อยกว่าฟีนอลหลายเท่า - ความสามารถในการดูดซับฟีนอลต่ำกว่าวัสดุเหลือใช้ชนิดอื่น

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) เป็นสารประกอบคาร์บอนที่ไม่มีความเป็นผลึก มีลักษณะพิเศษคือ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก จึงมีความสามารถใน

การดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กได้ดี [29] ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงถูกนำไปใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ดูดซับสารพิษ สี และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ โดยถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากการนำอินทรีย์วัตถุที่มีตามธรรมชาติ เช่น กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ชี้อ้อย ถ่านหิน กระจุก เป็นวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนในเซชัน ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มาก จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์หรือการกระตุ้นให้ถ่านมีพื้นที่ผิวมากขึ้น โดยแบ่งการกระตุ้นได้เป็น 2 วิธี คือ [30]

1) การกระตุ้นทางเคมี

เป็นการกระตุ้นโดยใช้สารเคมี เช่น KOH NaOH H_3PO_4 หรือ กรดคาร์บอกซิลิก ผสมให้แทรกซึมในถ่านจากนั้นจึงเผา 400-900 องศาเซลเซียสในบรรยากาศรีดิกชัน จึงนำไปล้างเพื่อกำจัดสารเคมีที่ใส่ไปในขั้นตอนแรก

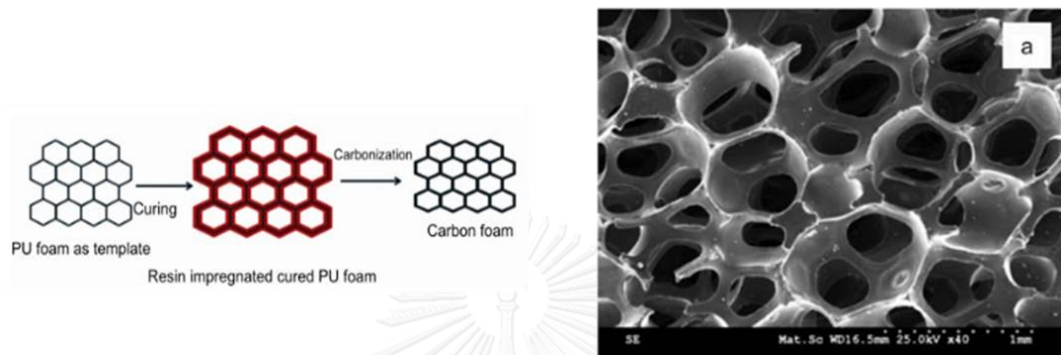
2) การกระตุ้นทางกายภาพ

เป็นการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำ หรือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และให้ความร้อนสูงไปพร้อม ๆ กันที่ประมาณ 600-1000 องศาเซลเซียส วิธีนี้มีข้อจำกัดคือวัตถุดิบต้องมีสารระเหยต่ำ มีความพรุนตัวสูง แข็ง ไม่เปราะ ทนการขัดสี แต่วิธีนี้มีข้อดีคือไม่ต้องล้างสารเคมีและไม่มีสารเคมีตกค้าง นอกจากนี้ยังได้ถ่านกัมมันต์ที่มีโพรงขนาดเล็กอีกด้วย

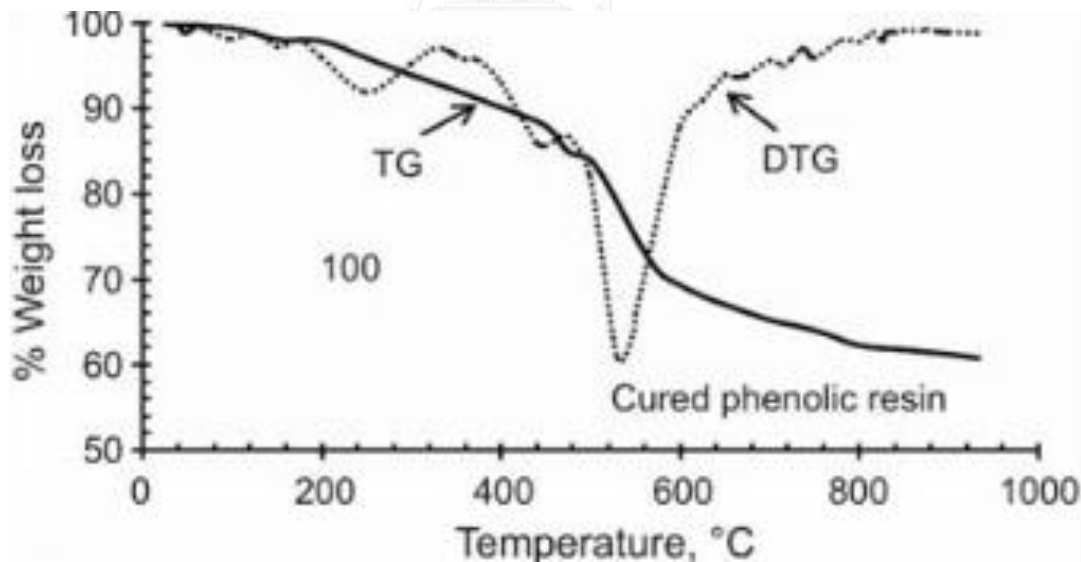
จากการวิจัยของ Somnath Mukherjee และคณะ [31] เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเพื่อกำจัดฟีนอลในน้ำ โดยใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด โดยใช้น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากันพบว่าถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุดถึงร้อยละ 95-98 มากกว่าถ่านขานอ้อยซึ่งดูดซับได้ ร้อยละ 85 และน้อยที่สุดคือ ถ่านไม้ ได้ร้อยละ 65 ตามลำดับ

ถ่านกัมมันต์ได้รับการยอมรับจากองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (USEPA) ให้เป็นวิธีการกำจัดสารอินทรีย์ที่ตีเยี่ยม [31] ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการนำถ่านกัมมันต์มาใช้กำจัดฟีนอลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวและผ่านการก่อกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ เนื่องจากได้โพรงขนาดเล็กและสามารถใช้ดูดซับฟีนอลได้โดยไม่มีสารเคมีปนเปื้อนมาจากถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้อยู่ในรูปแบบผง ดังนั้นการเก็บกำจัดภายหลังการดูดซับจึงทำได้ยาก ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะขึ้นรูปถ่านกัมมันต์ด้วยการใช้ฟีนอลิกเรซินซึ่งเป็นเทอร์โมเซทพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

จากการวิจัยของ Satish M Manocha และคณะ [32] สังเคราะห์คาร์บอนโฟมจากฟีนอลิกเรซินด้วยวิธีการใช้โครงร่างพอลิยูรีเทนโฟมและเผาฟีนอลิกเรซินในบรรยากาศรีดักชันได้คาร์บอนโฟมมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.6 และแสดง Thermo Gravimetric Analysis (TGA) ของฟีนอลิกเรซินภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนในภาพที่ 2.7 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ 25 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง ฟีนอลิกเรซินสูญเสียน้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ประมาณร้อยละ 40



ภาพที่ 2.6 การสังเคราะห์คาร์บอนโฟมและโครงสร้างจุลภาพของคาร์บอนโฟม [32]



ภาพที่ 2.7 สมบัติทางความร้อนของฟีนอลิกเรซินภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน [32]

2.4 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1756 เป็นของแข็งที่มีโครงร่างผลึกเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างเตตระฮีดรอลของซิลิกา $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และอะลูมินา $[\text{AlO}_4]^{5-}$ เกิดเป็นโครงข่าย 3 มิติ

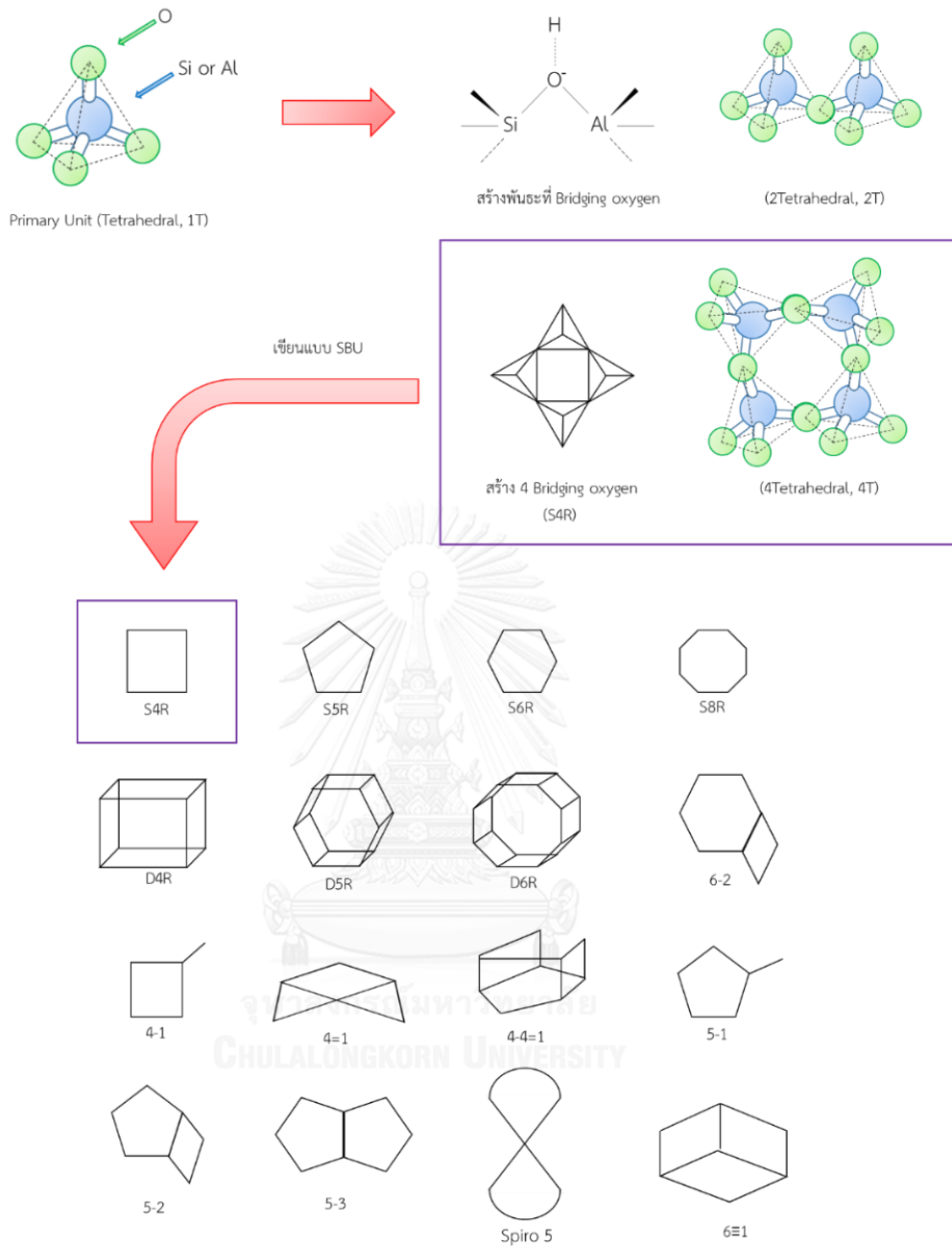
อะลูมิเนียมซิลิเกต โดยโครงข่ายที่เกิดขึ้นจะเป็นโครงข่ายต่างกันขึ้นกับชนิดของซีโอไลต์ ซึ่งช่องว่างหรือโพรงเหล่านี้จะถูกทำให้เสถียรอยู่ได้ด้วยสมดุลประจุเมื่อมีประจุบวกอยู่ภายใน [33] ซีโอไลต์จึงประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้



ประจุบวกที่ดุลโครงสร้างหลัก โครงสร้างหลัก น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ภายในโพรงของซีโอไลต์

2.4.1 โครงสร้างซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Unit, PU) เกิดจากเททระฮีดรอลของอะลูมินา $[AlO_4]^{5-}$ หรือซิลิกา $[SiO_4]^{4+}$ สร้างพันธะโควาเลนต์ต่อกันบริเวณตำแหน่งของออกซิเจนที่มุมของเททระฮีดรอลเกิดเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิหรือโครงสร้างพื้นฐาน 16 แบบ (Secondary Building Unit, SBU) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 นอกจากนี้ยังมีหน่วยโครงสร้างผสม (Composite Building Unit, CBU) อีก 47 หน่วย และโครงสร้างผสมชนิดโซ่ (Chain) อีก 5 หน่วย [34] ดังนั้นรูปแบบและขนาดโพรงของซีโอไลต์จึงแตกต่างกันไปจากหน่วยโครงสร้างหลายรูปแบบ



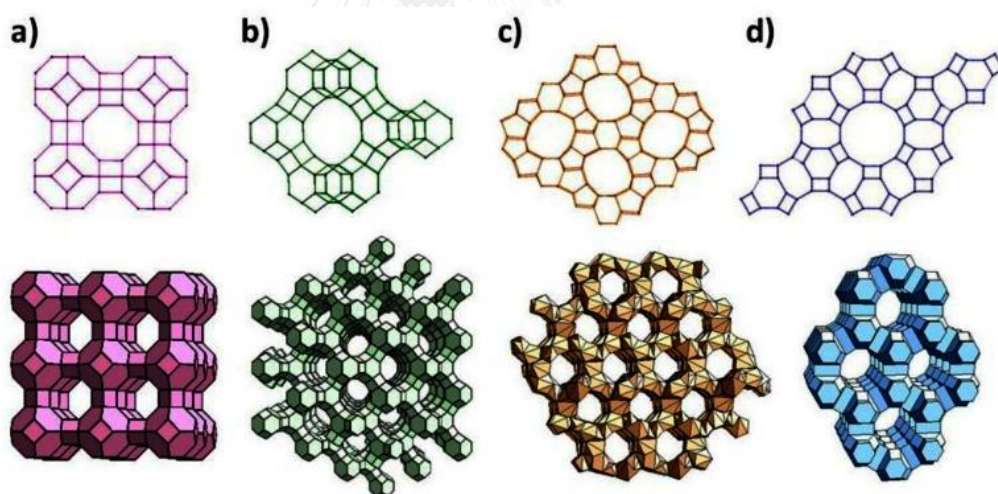
ภาพที่ 2.8 การเกิดหน่วยโครงสร้างพื้นฐาน (SBU) ของซีโอไลต์

2.4.2 ชนิดและสมบัติของซีโอไลต์

ซีโอไลต์บนโลกมีมากกว่า 600 ชนิด โดยสามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซีโอไลต์มีทั้งชนิดที่เกิดเองตามธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อการใช้งานที่

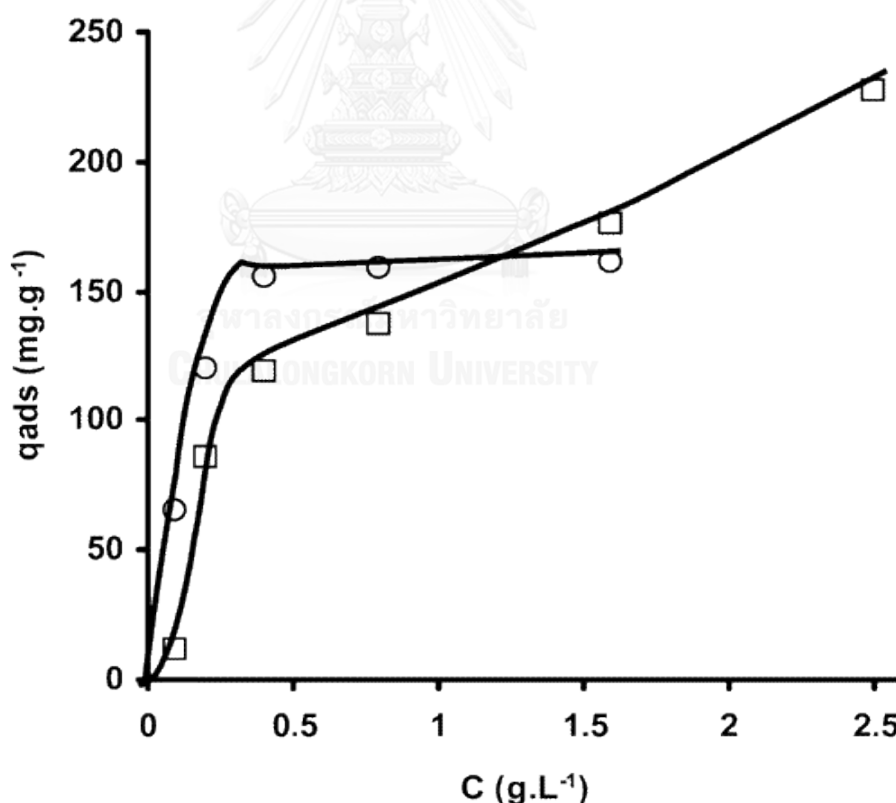
จำเพาะเจาะจง โดยมีกรรมวิธีการผลิตที่ไม่ยุ่งยากนัก เริ่มจากใช้สารที่เป็นแหล่งอะลูมินาและซิลิกาละลายในเบส มีน้ำในระบบ ควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นเบส และระยะเวลาให้เหมาะสม จึงเกิดการตกผลึกซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [33] แยกตามลักษณะและขนาดของโพรงที่เกิดจากการสร้างพันธะของอะลูมินาและซิลิกา

จากภาพที่ 2.9 ซีโอไลต์มีโพรงและขนาดโพรงต่างกันมีความสามารถในการดูดซับและคัดกรองสารได้ต่างกัน ดังนั้นสมบัติอีกประการของซีโอไลต์คือ การเลือกจำเพาะขนาด (Size selective) นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์กับประจุบวกชนิดอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อม หรือที่เรียกว่าสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จากสมบัติเลือกจำเพาะรูปร่าง (Shape selectivity) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างโมเลกุลตามต้องการ



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ a) zeolite A (3D, 4.2 Å), (b) zeolite Y (3D, 7.4 Å), (c) Zeolite L (1D, 7.1 Å), (d) ZSM-5 (silicalite) (2D, 5.3 × 5.6 Å, 5.1 × 5.5 Å) เมื่อ D คือ dimensions of channel system [35]

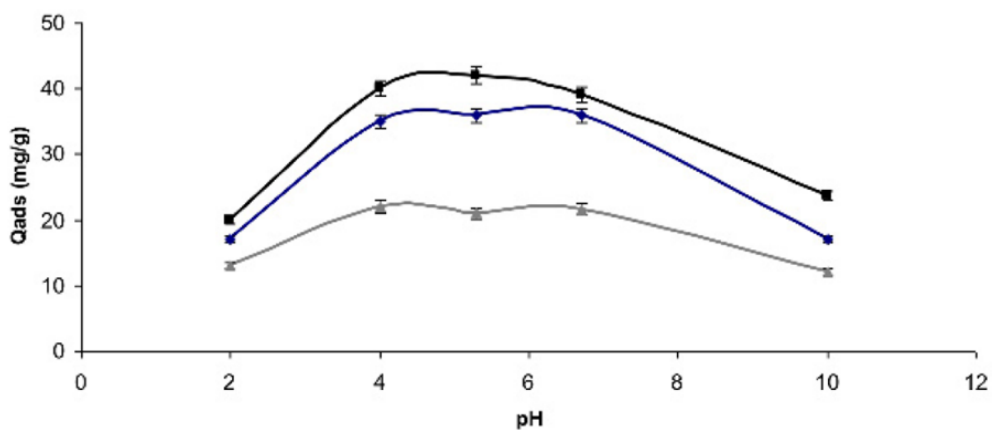
Mohamed Khalid และคณะ [36] ใช้ซีโอไลต์ที่มีโพรงขนาดกลางหลายชนิดดูดซับฟีนอล โดยฟีนอลสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของซีโอไลต์และถูกดูดซับไว้ภายในโพรง จากการเปรียบเทียบค่าสัดส่วน Si/Al ของซีโอไลต์ชนิด HFAU พบว่า ยิ่ง Si/Al มีค่ามาก จะสามารถดูดซับฟีนอลไว้ในโพรงได้ดี เนื่องจากปริมาณ Si ในโครงสร้างของซีโอไลต์ช่วยเพิ่มความเป็น hydrophobicity ของซีโอไลต์ส่งผลให้ฟีนอลแพร่เข้ามาในโครงสร้างของซีโอไลต์และดูดซับอยู่ในโพรงของซีโอไลต์ได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบซีโอไลต์ต่างชนิดกันพบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ $BEA(2000) > MFI(500) > FAU(100) > MOR(80)$ เนื่องจากซีโอไลต์แต่ละชนิดมีค่า (Si/Al) เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟีนอลของซีโอไลต์เทียบกับถ่านกัมมันต์คุณภาพ พบว่าซีโอไลต์ BEA ดูดซับฟีนอลได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (ต่ำกว่า 1.6 กรัม/ลิตร) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อถ่านกัมมันต์มากขึ้นจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นจึงดูดซับฟีนอลได้มากกว่า



ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหล

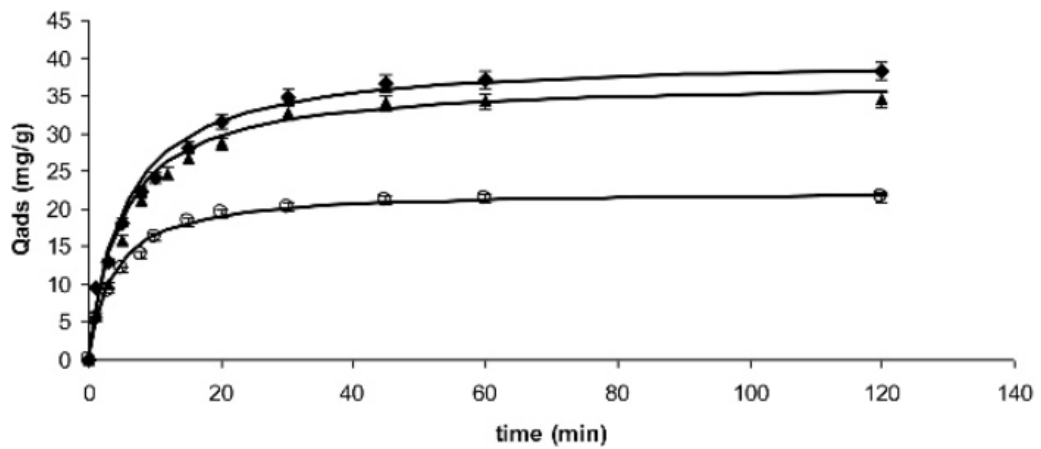
โดย (o) คือ BEA (∞) และ (□) คือถ่านกัมมันต์ [36]

Bachar Koubaissy และคณะ [37] ทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัด ฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ด้วยการดูดซับบนซีโอไลต์ 3 ชนิดคือ HBEA HFAU และ HMOR ที่ภาวะกรดเบสต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.11 พบว่าความสามารถในการดูดซับ ฟีนอลในช่วงที่เป็นกรด (pH 4-7) ค่อนข้างใกล้เคียงกันเนื่องจากฟีนอลมีไฮโดรเจนที่หมู่ ไฮดรอกซิลทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) ภายในโครงสร้างซีโอไลต์ แต่ ที่ความเป็นกรดมาก ๆ การดูดซับของฟีนอลลดลงเนื่องจากโปรตอนอิสระในน้ำไปแย่งฟีนอล รับอิเล็กตรอนจากหมู่ซิลอกเซน ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความเป็นเบสให้ระบบทำให้ ฟีนอลเริ่มแตกตัวกลายเป็นฟีนอกไซด์แอนไอออนและไม่ดูดซับบนซีโอไลต์



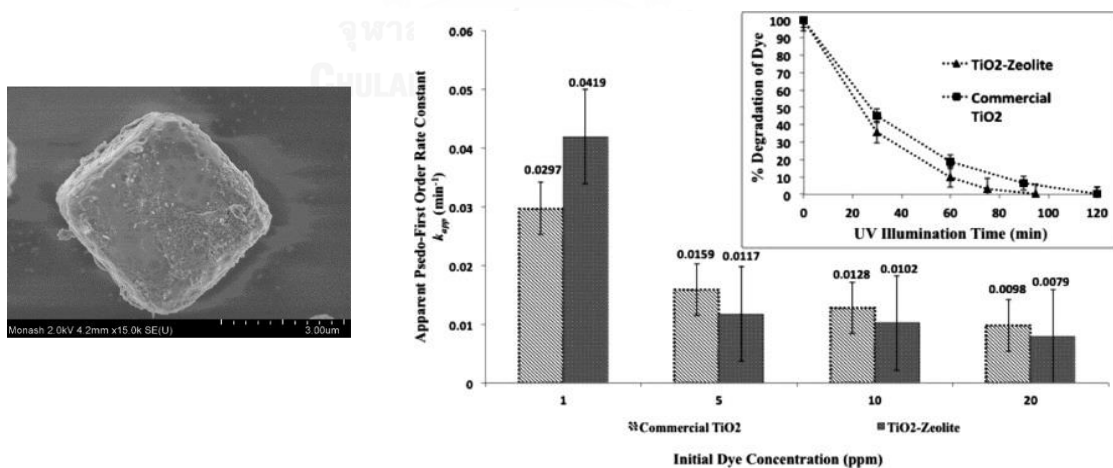
ภาพที่ 2.11 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอล บน HBEA(■), HFAU(◆) และ HMOR(▲) [37]

และจากการเปรียบเทียบลักษณะโพรงที่แตกต่างกันของซีโอไลต์แต่ละชนิดที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร พบว่า HBEA(19) > HFAU(19) > HMOR(18) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 เนื่องจาก HBEA และ HFAU เป็น 12-MR ซีโอไลต์มี ปริมาตรโพรงขนาดเล็ก 0.245 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ในขณะที่ HMOR เป็น 10-MR ซีโอไลต์ซึ่งเล็กกว่ามีโพรงขนาดเล็ก 0.170 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม จึงดูดซับฟีนอลได้น้อย กว่าอย่างเห็นได้ชัด ส่วน HBEA แม้จะมีปริมาตรโพรงน้อยกว่า HFAU เล็กน้อยแต่ด้วยแรง ดึงดูดของความเป็นประจุระหว่างโมเลกุลของฟีนอลกับโพรงเกิดได้ดีกว่าจึงดูดซับฟีนอลได้ ดีกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 2.12 จลนศาสตร์ของการดูดซับฟีนอลความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตรบน HBEA(◆) HFAU(◆) และ HMOR(○) โดยเส้นที่ลากได้จากการจำลองจลนศาสตร์การดูดซับแบบ pseudo second-order [37]

Meng Nan Chong และคณะ [38] สังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์ด้วยวิธีการโซลเจลเพื่อใช้เร่งการย่อยสลายสีย้อมซึ่งเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่ง พบว่าลักษณะของวัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์ที่ได้เป็นดังภาพที่ 2.13 (ซ้าย) และมีความสามารถในการเร่งการย่อยสลายสีย้อมภายใต้แสงยูวี $300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ ด้วยวัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์ดีกว่าไททาเนียทางการค้าดังแสดงในภาพที่ 2.13 (ขวา)



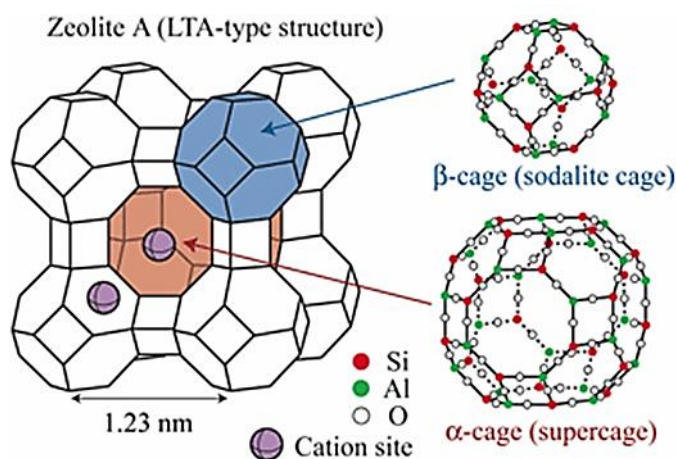
ภาพที่ 2.13 วัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์และการเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งวัสดุเชิงประกอบไททาเนียซีโอไลต์กับไททาเนียทางการค้าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 g/L สีย้อมความเข้มข้น 1 ppm ที่ pH 5 [38]

นอกจากซีโอไลต์จะเป็นตัวดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีแล้วเมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุเชิงประกอบกับวัสดุโพโตคะตะลิสต์ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดได้อย่างรวดเร็วขึ้นอีกด้วย

2.4.3 ซีโอไลต์ เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์เอ ประกอบไปด้วยวงแหวน 4T 6T และ 8T เกิดเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย

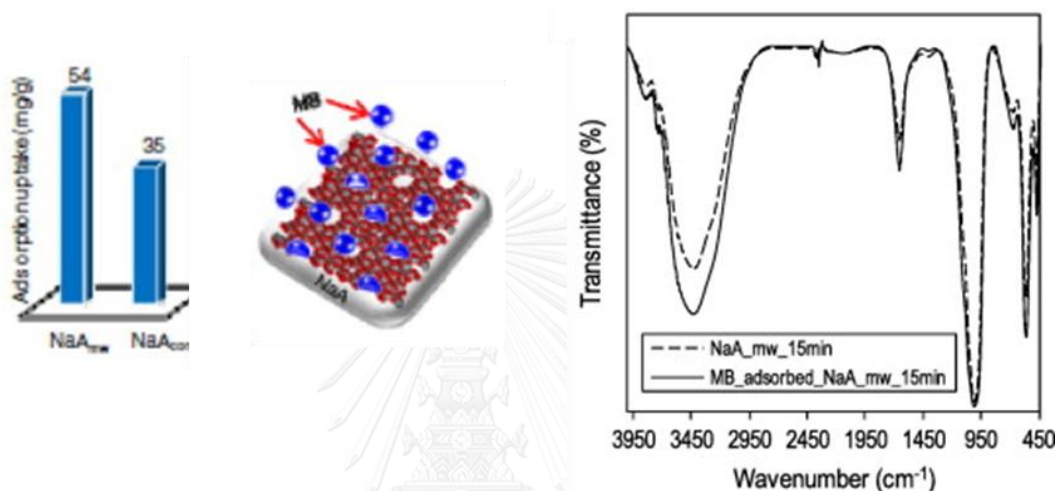
- 1) หน่วย Double 4-Rings (D4R)
- 2) กรงโซดาไลต์ (SOD) เรียกว่ากรงชนิดบีตาและ
- 3) Linde Type A (LTA) เรียกว่ากรงชนิดแอลฟา [33] ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างซีโอไลต์เอ [39]

เนื่องจากขนาดของรูพรุนที่สม่ำเสมอประมาณ 4.1 อังสตรอม สมบัติการดูดซับน้ำ และการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี ซีโอไลต์เอหรือที่เรียกอีกชื่อว่า LTA ซีโอไลต์ จึงนิยมใช้ในงานทางด้านการบำบัดน้ำ [40] เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อดูดซับโลหะหนักจำพวก Pb^{2+} Hg^{2+} Cd^{2+} ในน้ำเพื่อลดความเป็นพิษของน้ำเสีย หรือกรองน้ำเพื่อปรับลดความกระด้างของน้ำ โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ ได้แก่ Na^+ หรือ H^+ กับแคตไอออนอื่น ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ ได้แก่ Ca^{2+} Sr^{2+} เมื่อไดวาเลนต์แคตไอออนลดลงความกระด้างของน้ำจึงลดลง

N. Sapawe และคณะ [41] ทดลองสังเคราะห์โซเดียมเอซีโอไลต์ด้วยเทคนิคพิเศษโดยใช้ไมโครเวฟร่วมด้วยพบว่าซีโอไลต์ 1 กรัม/ลิตร สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 120 มิลลิกรัม/ลิตร เพิ่มขึ้นกว่าซีโอไลต์ปกติร้อยละ 20 โดยมีรูปแบบการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดก่อนและหลังดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพที่ 2.15 แม้ว่าขนาดโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโพรงซีโอไลต์แต่ยังสามารถเกิดการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้

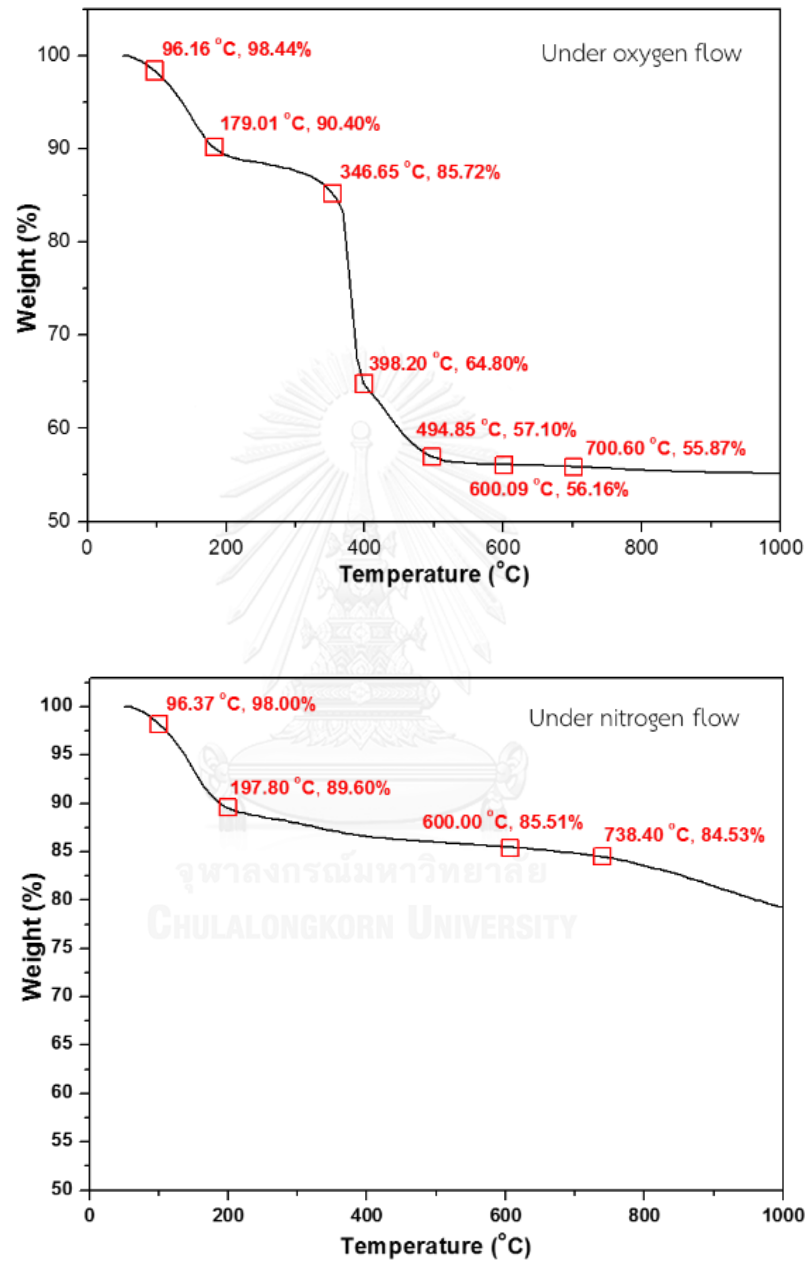


ภาพที่ 2.15 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนโซเดียมเอซีโอไลต์และรูปแบบการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดของซีโอไลต์ก่อนและหลังใช้ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู [41]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนากร เทพามาตย์ [42] ทดลองวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบซีโอไลต์โซเดียมเอและคาร์บอนภายใต้บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชันดังแสดงในภาพที่ 2.16 พบว่าภายใต้ทั้งสองบรรยากาศที่อุณหภูมิประมาณ 90-180 องศาเซลเซียสวัสดุสูญเสียน้ำหนักจากความชื้นที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์และในคาร์บอน แต่สำหรับภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 350-495 องศาเซลเซียสเกิดปฏิกิริยา dehydration ของซีโอไลต์และเกิด oxidation ของคาร์บอนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้น้ำหนักของวัสดุลดลงไปประมาณร้อยละ 40 ซึ่งต่างกับภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยหลังจากน้ำภายในวัสดุระเหยไปหมดที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ที่ความร้อนสูงขึ้นจนถึงประมาณ 600 องศาเซลเซียส น้ำหนักของวัสดุลดลงน้อยกว่าร้อยละ 5 จาก dehydration และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกวัสดุสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าร้อยละ 1 เนื่องจากภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนคาร์บอนถูกออกซิไดซ์น้อยมากจึงเหลือปริมาณคาร์บอนอยู่ใน

วัสดุจำนวนมากจึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือฟีนอลิกเรซิน ควรทำในบรรยากาศที่เป็นรีดักชันเพื่อลดการสูญเสียปริมาณวัสดุ



ภาพที่ 2.16 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบซีไอโกลด์โซเดียมเอและคาร์บอน ในบรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน [42]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเพื่อใช้กำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์เอ โดยใช้ฟีนอลิกเรซินและดินดำสุราษฎร์ธานีเป็นวัสดุเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานหลังเผา ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาเพื่อให้ได้วัสดุดูดซับที่มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้ในน้ำ จากนั้นจึงเคลือบชิ้นงานวัสดุที่ขึ้นรูปได้ด้วยไททาเนีย P25 เพื่อให้วัสดุมีความสามารถเร่งการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

- ถ่านกัมมันต์ (PA-1, Zenith Science Co., Ltd.)
- ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Advera 401PS, PQ Chemicals Thailand Co., Ltd.)
- ฟีนอลิกเรซิน (Neolite KC-3019, Kangnam Chemical Co., Ltd. Korea)
- ดินดำสุราษฎร์ธานี
- ไททาเนีย (TiO₂-P25, Degussa, Germany)
- น้ำรีเวอร์สออสโมซิส (RO water)
- ฟีนอล (>99.5%, Aldrich)
- Hydroxypropyl Methylcellulose (HMC, Shin-Etsu, Japan)
- Poly(vinyl alcohol) 1000 (PVA, Wako Pure Chemical Industries)
- Polyethylene glycol 1000PS (PEG, Panreac)
- Glycerol (GLY, Ajax Finechem Pty)
- Polyurethane foam (PU-foam, Besband, Thailand)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ซ้อนตักสาร ปีกเกอร์ กระบอกตวง
- ขวดกำหนดปริมาตร กรวย หลอดหยดสาร แท่งแก้วคนสาร
- ปีเปตต์ และ ไมโครปีเปตต์

- เครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- หลอดทดลอง
- แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) และ เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer)
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
- ลูกบด หม้อบด และ เครื่องบดความเร็วสูง (high speed ball mill)
- ตู้ดูดควัน
- เตาอบ
- เตาเผา
- เครื่องอัดรีด (extruder)
- หลอดยูวี 18 วัตต์ (Phillips)
- เครื่องวัดความเข้มแสงยูวี

3.2 ขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปวัสดุและทดสอบการกำจัดฟีนอล

3.2.1 เตรียมวัตถุดิบและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ด้วยการอัดรีด

1) ผสมผงวัตถุดิบสูตรฟีนอลิกเรซินด้วยเครื่องบดความเร็วสูง 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่าง ถ่านกัมมันต์ ฟีนอลิกเรซินและซีโอไลต์ และพิจารณาปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซิน ในแต่ละสูตรเป็นร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่สัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ ปรับเป็น 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก

2) ผสมผงวัตถุดิบสูตรดินคำสุราษฎร์ธานีด้วยเครื่องบดความเร็วสูง 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างดินคำสุราษฎร์ธานีต่อโซเดียมเฮซีโอไลต์เป็น 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก

3) ผสมตัวเชื่อมประสานอินทรีย์เพื่อใช้สำหรับผสมผงวัตถุดิบก่อนขึ้นรูปและเผาวัสดุเชิงประกอบโดยใช้สูตรของ วิลรัตน์ โกสุพรรณ [43] ประกอบไปด้วย ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส (HMC), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA), น้ำมันกลีเซอรอล (GLY), พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และน้ำ ในสัดส่วน 7 กรัม, 1 กรัม, 1 กรัม, 0.5 กรัม และ 150 กรัม กวนให้เข้ากันแล้วบ่มไว้ 3 วันเพื่อให้ตัวเชื่อมประสานรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

4) ผสมตัวประสานที่เตรียมขึ้นกับผงวัตถุดิบแต่ละสูตรที่ผ่านการบดด้วยความเร็วสูงแล้วมานวดให้เข้ากัน หมักไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปอัดรีดขึ้นรูปเป็นท่อทรงกระบอกกึ่งกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเป็น 13 และ 8 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดรีด

5) นำชิ้นงานไปผึ่งให้แห้ง 12 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำระเหยออกไปจากชิ้นงานอย่างช้า ๆ และอบ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นที่เหลือออก

6) ตัดชิ้นงานให้สั้นลง โดยมีความยาวเฉลี่ยชิ้นละ 2 เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัดความเร็วต่ำ 100 รอบต่อนาที

7) เคลือบชิ้นวัสดุที่ตัดแล้วด้วยไททาเนีย (P25, Degussa) ร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำด้วยวิธีการ จุ่ม ทา และพ่นเคลือบผิวด้านนอกวัสดุ เพื่อพิจารณาวิธีการเคลือบที่ดีที่สุด จากนั้นนำชิ้นงานไปผึ่งเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง 12 ชั่วโมง โดยน้ำระเหยออกไปจากชิ้นงานอย่างช้า ๆ และอบ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นที่เหลือออก

8) เนื่องจากการเผาแบบออกซิเดชันจะทำให้ถ่านกัมมันต์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซีเถ้าและเสียสมบัติการเป็นตัวดูดซับที่ดี จึงเผาวัสดุในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน และที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส ทำให้ซีเถ้าโอไซด์เสถียรเสียความเป็นผลึก [44] ในขณะที่ไททาเนียจะเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสไปเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียสส่งผลให้ความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ต่ำลง [24] จึงเผาวัสดุที่ขึ้นรูปได้แต่ละชุดที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที โดยใช้ระยะเวลาในการเผานาน 1, 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของวัสดุแต่ละชุดการทดลอง

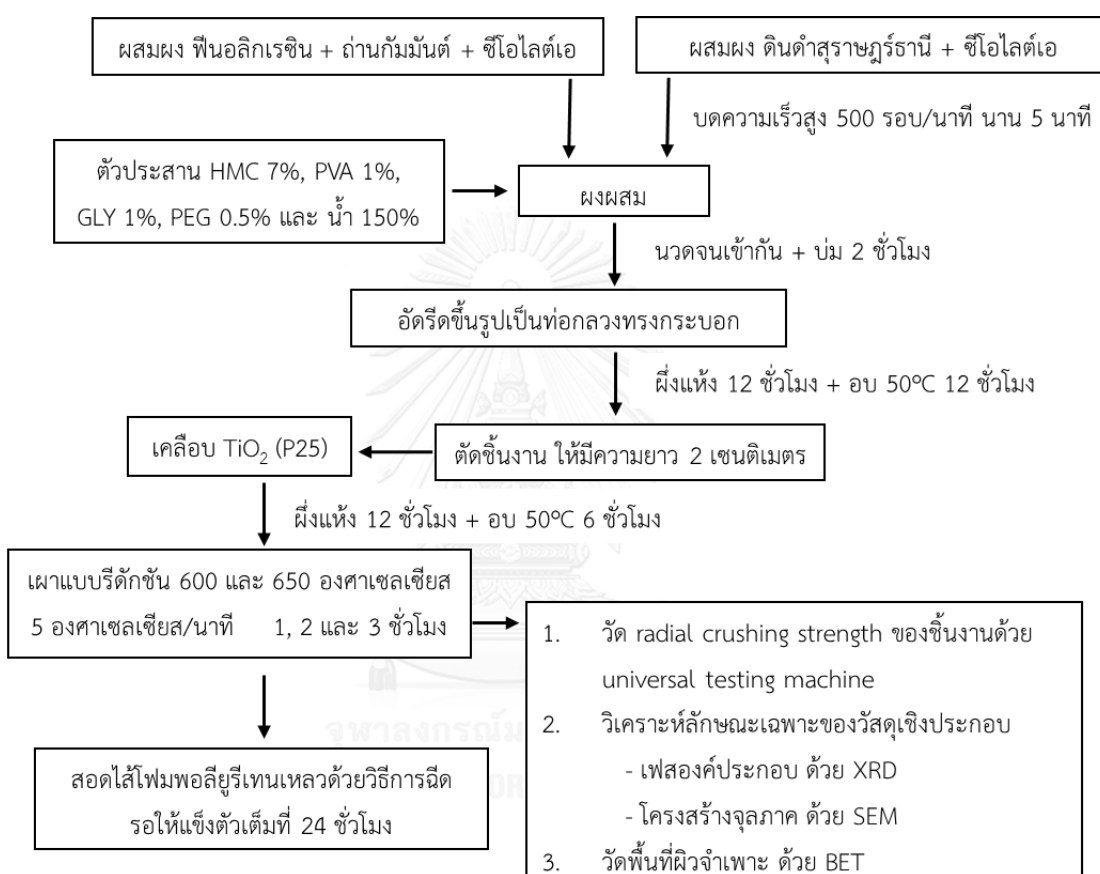
9) วัดความแข็งแรงของชิ้นงานจากความต้านทานแรงกดด้านข้าง (radial crushing strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 6175 – 03 ด้วย เครื่อง universal testing machine (Instron5843)

10) วิเคราะห์เฟสของวัสดุด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD, Bruker model D8)

11) ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและการเคลือบติดของไททาเนียบนวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM 6480 LV)

12) วัดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุด้วยเครื่อง BET analyzer

13) ฉีดโพลีเมอร์เทรนเหลวในท่อกลางเนื่องจากเป็นโพลีเมอร์ที่คงทนต่อการใช้งาน มีน้ำหนักเบา โดยรอให้โพลีเมอร์แข็งตัวเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งานกำจัดฟีนอลในน้ำ โพลีเมอร์ทำหน้าที่ช่วยให้วัสดุสามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้ ดังนั้นไททาเนียที่เคลือบบริเวณผิววัสดุจึงได้รับการกระตุ้นจากแสงยูวีได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับไททาเนียที่จมอยู่ในน้ำ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำสามารถดูดซับความเข้มแสงยูวีได้ ส่งผลให้ที่ระดับน้ำลึกมีความเข้มแสงยูวีลดลง [45]



ภาพที่ 3.1 แผนผังการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย

3.2.2 การทดสอบการกำจัดฟีนอล

1) วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค UV absorption spectroscopy โดยปรับความเข้มข้นของฟีนอลเป็น 10-300 ppm เลือกค่าการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมเพื่อทำกราฟมาตรฐาน และใช้ความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรงเพื่อทำการทดลอง

2) จุ่มชิ้นงานที่จะใช้กำจัดฟีนอลจำนวน 1 ชิ้นลงในสารละลายฟีนอลเข้มข้น 80 ส่วนในน้ำ ล้านส่วน ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ในที่มืดเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยวัดความเข้มข้น

พินอลจากค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของพินอลที่ 270 นาโนเมตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer (Perkins Elmer, Lambda35) เพื่อศึกษาการกำจัดพินอลในวัสดุเชิงประกอบด้วยการดูดซับ

3) หลังจากจุ่มในที่มีดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงเปิดไฟฉายแสงยูวีด้วยหลอดยูวี (Phillips) 18 วัตต์ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ห่างจากภาชนะบีกเกอร์ 5 เซนติเมตร โดยปล่อยให้ชิ้นงานที่ลอยอยู่บนผิวน้ำในบีกเกอร์ วัดความเข้มข้นพินอลจากค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของพินอลที่ 270 นาโนเมตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาความสามารถในการเร่งการสลายตัวของพินอลด้วยไททาเนียโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนวัสดุเชิงประกอบภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี

4) ศึกษาความสามารถในการเร่งการสลายตัวของพินอลทุก ๆ ชั่วโมง ด้วยชุดการทดลองที่ใส่ผงไททาเนีย P25 0.01 กรัมในสารละลายพินอลเข้มข้น 80 ส่วนในน้ำล้านส่วนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ปากภาชนะบีกเกอร์ห่างจากหลอดยูวี 5 เซนติเมตร เปิดฉายแสงยูวี 18 วัตต์ เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง โดยดูดสารละลายพินอลมา 3 มิลลิลิตรแล้วปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาทีให้ผงไททาเนียตกตะกอน จากนั้นนำสารละลายส่วนที่ใสมาวัดความเข้มข้นพินอลจากค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของพินอลที่ 270 นาโนเมตรด้วย UV-VIS spectrophotometer (Perkins Elmer, Lambda35) ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งการย่อยสลายพินอลด้วยไททาเนียโฟโตคะตะลิสต์แต่ละชนิด โดยแต่ละชุดการทดลองปรับเปลี่ยนผงไททาเนีย P25 ที่ใช้เป็น 1. ผงที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา 2. ผงที่ผ่านกระบวนการเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน 3. ผงที่ผ่านกระบวนการเผาในบรรยากาศรีดักชัน และ 4. ผงที่ผสมถ่านกัมมันต์แล้วเผาในบรรยากาศรีดักชัน ผงไททาเนียที่เผาทุกชุดการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลานาน 3 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 ชุดการทดลองฉายแสงยูวีเพื่อทดสอบการกำจัดพินอล

3.3 การวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของวัสดุ

3.3.1 องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุ

ศึกษาเฟสและความเป็นผลึกของซีโอไลต์และไททาเนียในวัสดุเชิงประกอบ ด้วย X-ray Diffractometer (XRD, Bruker model D8) โดยใช้รังสี Cu K α ที่ความยาวคลื่น 1.5406 Å ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ และกระแส 40 มิลลิแอมแปร์ ค่า 2 θ ตั้งแต่ 10-60 องศา

3.3.2 ความแข็งแรงของวัสดุ

วัดค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย ตามมาตรฐาน ASTM D 6175 – 03 ด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron5843) โดยการกดชิ้นงานรูปทรงกระบอกกลวงจนกว่าชิ้นงานจะเสียหายและบันทึกเป็นค่าแรงกดสูงสุดต่อความยาวในหน่วย นิวตัน/เซนติเมตร ทำซ้ำจำนวน 5 ชิ้นต่อชนิดตัวอย่าง และเทียบค่าความแข็งแรงที่วัดได้กับชิ้นงานที่จุ่มในน้ำโดยสังเกตจากการแตกของชิ้นงานในน้ำเพื่อพิจารณาชิ้นงานที่สามารถนำมาใช้ในน้ำได้ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานกำลังอัดคือ

$$\text{Radial crushing strength} = \frac{\text{Maximum loading}}{\text{Sample length}}$$

เมื่อ Maximum loading คือ ค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเสียหายที่วัดได้ (N)

Sample length คือ ความยาวด้านข้างของชิ้นงาน (cm)



ภาพที่ 3.3 การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานด้วย Universal Testing Machine (Instron5843)

3.3.3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุและการเคลือบติดของไททาเนียบนวัสดุเชิงประกอบ

ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์

ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบและการเคลือบติดของไททาเนียด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM 6400 LV)

3.3.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย

ตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียด้วยเครื่อง Brunauer Emmett Teller (BET analyzer, YUASA IONICS Co./NOVA-4200e) โดยใช้ตัวอย่างที่เป็นผงหนัก 0.02-0.05 กรัมในการวิเคราะห์ และวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้งต่อตัวอย่าง

3.3.5 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังเผา โดยแสดงเป็น ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\% \text{ weight loss} = \frac{W_B - W_A}{W_A} \times 100$$

เมื่อ W_A คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังเผา (g)

W_B คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนเผา (g)

3.3.6 ความหนาแน่น

ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (Archimedes) ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 โดยอบชิ้นงานและชั่งน้ำหนักแห้ง จากนั้นดูดสุญญากาศชิ้นงานเป็นเวลา 2 ชั่วโมงในภาวะปิดแล้วเทน้ำให้ท่วมชิ้นงานในภาวะสุญญากาศโดยดูดสุญญากาศต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ เพื่อนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำ และน้ำหนักในอากาศในลำดับถัดไป ความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถคำนวณได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{D}{W - S}$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งชิ้นงาน ชั่งในอากาศ (g)

W คือ น้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ ชั่งในอากาศ (g)

S คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ ชั่งในน้ำ (g)

3.3.7 การดูดซึมน้ำ

ศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 จากการศึกษาจำนวนร้อยละการดูดซึมน้ำดังสมการ

$$\% \text{ Water Absorption} = \frac{W - D}{D} \times 100$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งชิ้นงาน ชั่งในอากาศ (g)

W คือ น้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ ชั่งในอากาศ (g)

3.3.8 ความพรุนตัว

ศึกษาความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผา ตามมาตรฐาน ASTM C20-00 โดยคำนวณค่าความพรุนตัวของชิ้นงานดังสมการ

$$\% \text{ Apparent porosity} = \frac{W - D}{W - S} \times 100$$

เมื่อ D คือ น้ำหนักแห้งชิ้นงาน ชั่งในอากาศ (g)

W คือ น้ำหนักเปียกของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ ชั่งในอากาศ (g)

S คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำ ชั่งในน้ำ (g)

3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลด้วย UV-Vis absorption spectrometer

สารที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis absorption spectroscopy ต้องมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีหรือวิสิเบิล ในงานวิจัยนี้ติดตามความเข้มข้นของฟีนอลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 270 nm ซึ่งอยู่ในช่วงยูวี จึงวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี (200-400 nm) โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารและความหนาของสารละลายที่ลำแสงผ่าน โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต [46] ดังแสดงในสมการ

$$A = \epsilon bc$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร

ϵ คือ สมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง

เรียกว่า molar absorptivity ($L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$)

b คือ ระยะทางที่แสงผ่านสารหรือความกว้างของเซลล์ที่ใช้บรรจุสาร (cm)

c = ความเข้มข้นของสาร (M)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารอยู่ในหน่วยอื่นจะแทนค่า ϵ ด้วย a เรียกว่า absorptivity เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่งเช่นกัน แต่มีหน่วยสัมพันธ์กับหน่วยของความเข้มข้น โดยในการวิจัยนี้จะใช้ฟิโนลความเข้มข้นในหน่วย ส่วนในล้านส่วน หรือ ppm

จากสมการแสดงร้อยละการกำจัดสารที่ปนเปื้อน

$$\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ % คือร้อยละของปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกกำจัดหรือดูดซับออกไปจากน้ำเสีย

C_0 คือ ความเข้มข้นสารเริ่มต้น

C_t คือความเข้มข้นสารที่เวลา t

เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเข้มข้นของแสงจึงนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณเปรียบเทียบความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสาร โดยเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลายฟิโนลชุดการทดลองที่ไม่ได้จุ่มวัสดุเชิงประกอบกับชุดที่จุ่มวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟิโนลที่เวลาใด ๆ จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ

$$\text{Relative Concentration} = 1 - \frac{(A_b - A_c)}{A_b}$$

เมื่อ A_b คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดการทดลองที่ไม่จุ่มวัสดุเชิงประกอบ (Blank)

A_c คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดการทดลองที่จุ่มวัสดุเชิงประกอบ

จากนั้นนำค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ไปวาดกราฟที่เวลาต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไปหากค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ลดลง หมายถึง ปริมาณสารเหลือน้อยลงเมื่อเทียบกับ blank แสดงว่าวัสดุเชิงประกอบช่วยดูดซับหรือย่อยสลายสารได้ทำให้สารหายไปเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับ blank

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) พบว่าโซเดียมเอซีโอไลต์และดินดำสุราษฎร์ธานีมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่

4.1

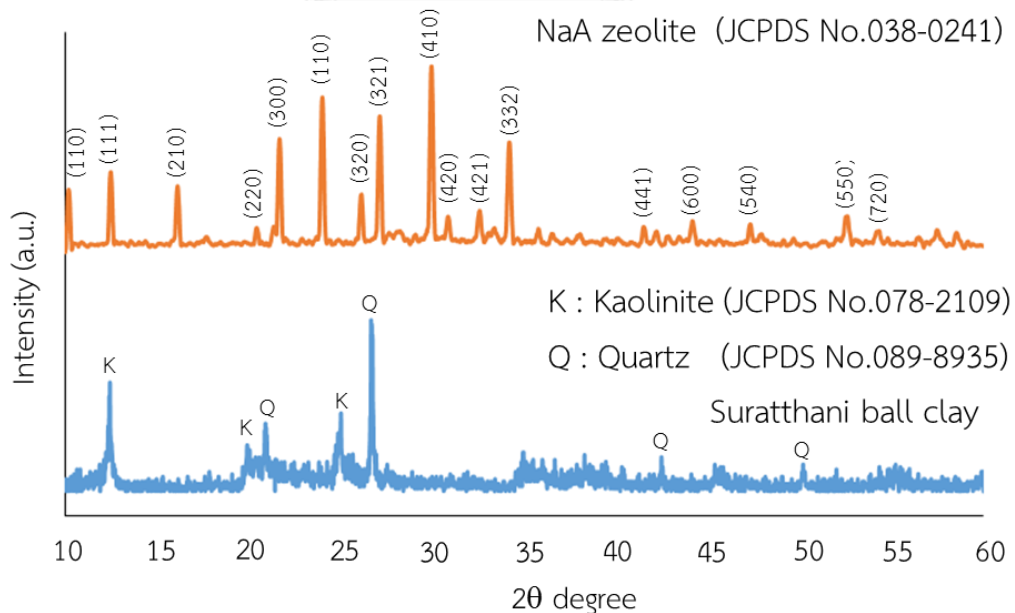
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมเอซีโอไลต์และดินดำสุราษฎร์ธานี

องค์ประกอบทางเคมี	โซเดียมเอซีโอไลต์ ปริมาณที่พบ (%)	ดินดำสุราษฎร์ธานี ปริมาณที่พบ (%)	
		ก่อนเผา	หลังเผา
SiO ₂	42.70	58.20	57.60
Al ₂ O ₃	35.80	34.90	34.80
K ₂ O	0.03	3.03	3.24
Fe ₂ O ₃	-	2.14	2.40
TiO ₂	0.02	0.58	0.62
MgO	-	0.37	0.40
CaO	0.02	0.27	0.30
Na ₂ O	21.40	0.25	0.23
SO ₃	-	0.07	0.10
P ₂ O ₅	-	0.04	0.06
BaO	-	0.03	0.03
ZrO ₂	0.01	0.03	0.03
MnO	-	0.02	0.03

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุพบว่ามีซิลิกอนออกไซด์ที่มีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1.19 ซึ่งสอดคล้องกับค่า Si/Al ของซีโอไลต์เอทีที่มีค่า Si/Al ใกล้เคียง 1 และเมื่อเทียบระหว่างดินก่อนเผาและหลังเผาแสดงให้เห็นว่าสารประกอบอนินทรีย์ได้แก่ออกไซด์ของโลหะมีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงอนุมานว่าน้ำหนักของดินที่หายไปหลังการเผา (LOI) เนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซ

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัตถุ

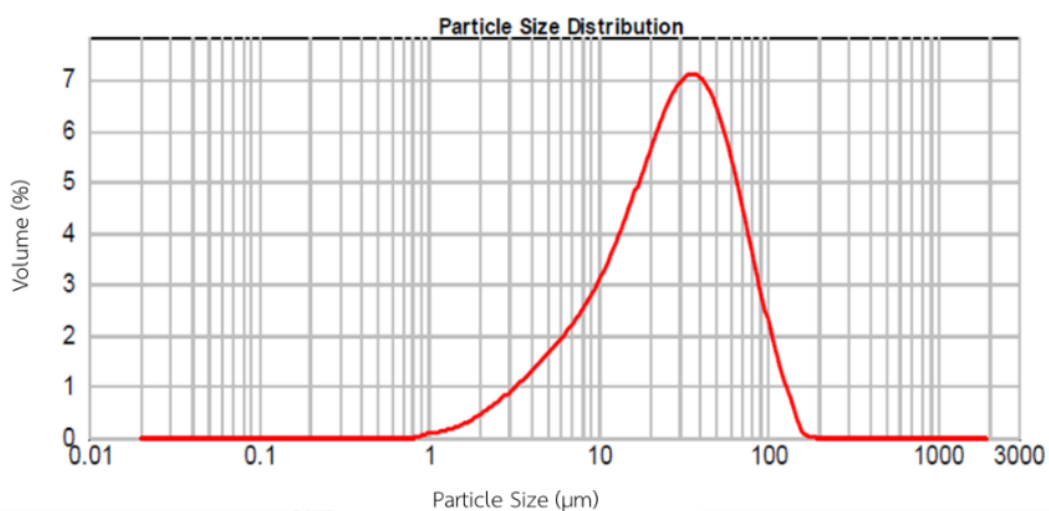
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเฟสดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าซิลิกอนออกไซด์มีโครงสร้างที่เป็นผลึกเนื่องจากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของ Si-O-Al ที่ต่อกันเป็นโครงข่ายที่มีระเบียบ ในขณะที่ดินดำสุราษฎร์ธานีแม้จะมีปริมาณ SiO₂ และ Al₂O₃ ในปริมาณที่สูงแต่ไม่ได้ต่อกันเป็นโครงข่ายแบบซีโอไลต์ และมีองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งไม่มีความเป็นผลึกจึงปรากฏแถบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กว้าง รวมทั้งสารอนินทรีย์ชนิดอื่นที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์และไม่ปรากฏพีค แต่ในดินดำมีเคโอลิไนต์มีสูตรทางเคมีคือ Al₂Si₂O₅(OH)₄ ซึ่งมีความเป็นผลึกประกอบไปด้วยชั้นเทระฮีดรอลของซิลิกาและชั้นออกตะฮีดรอลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ [47] นอกจากนี้ยังมีควอตซ์ซึ่งเป็นซิลิกาต่อกันเป็นโครงข่ายบริเวณออกซิเจนอะตอมเกิดเป็นผลึกควอตซ์



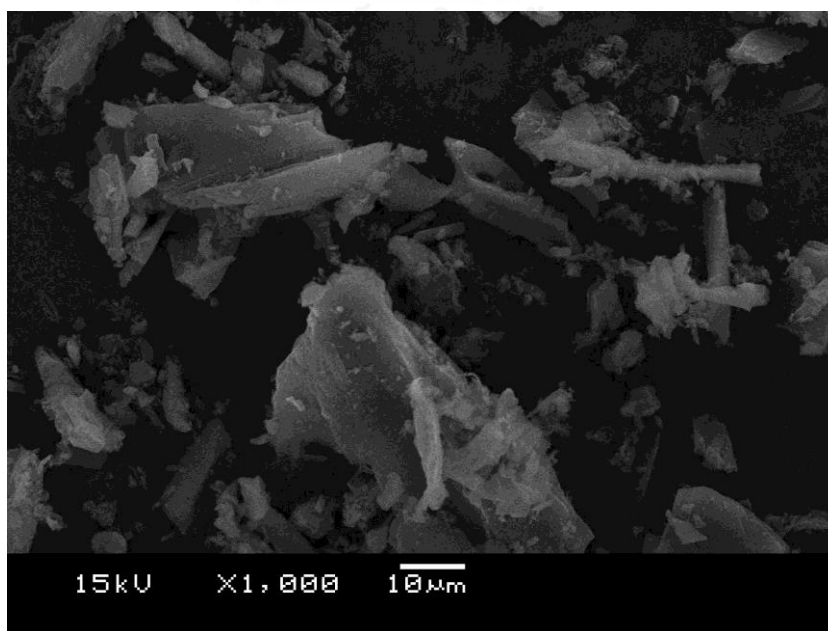
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบเฟสของซิลิกอนออกไซด์และดินดำสุราษฎร์ธานี

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบจากการกระเจิงของแสงเลเซอร์ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 Malvern เทียบกับโครงสร้างทางจุลภาคดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.3 ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.955-138.038 ไมครอน โดยมีค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90} เท่ากับ 6.437, 27.984 และ 73.228 ไมครอนตามลำดับ เมื่อเทียบกับภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีรูปร่างไม่แน่นอนและขนาดหลากหลายตั้งแต่ระดับนาโนไปจนถึงหลักร้อยไมครอน

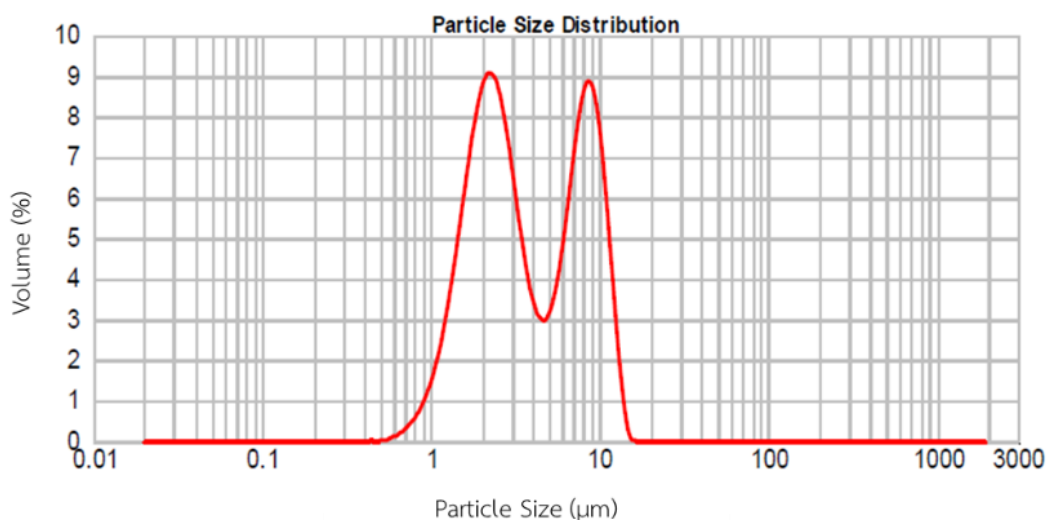


ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์

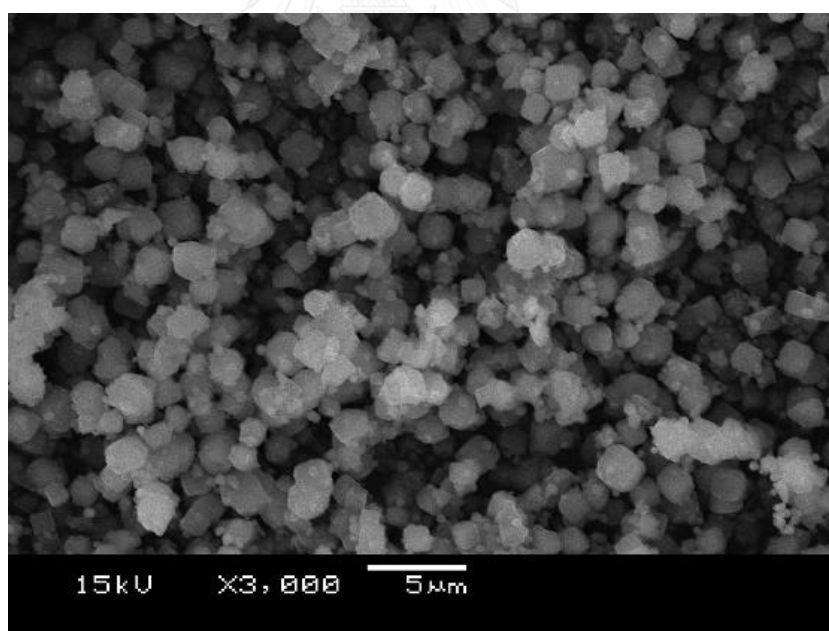


ภาพที่ 4.3 ลักษณะจุลภาคของถ่านกัมมันต์

ในขณะที่จากภาพที่ 4.4 โซเดียมเอซีโอไลต์มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.550-13.183 ไมครอน โดยมีค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90} เท่ากับ 1.474, 3.227 และ 9.807 ไมครอนตามลำดับ และจากภาพที่ 4.5 พบว่าลักษณะทางจุลภาคของซีโอไลต์เป็นลูกบาศก์ขนาดเล็ก



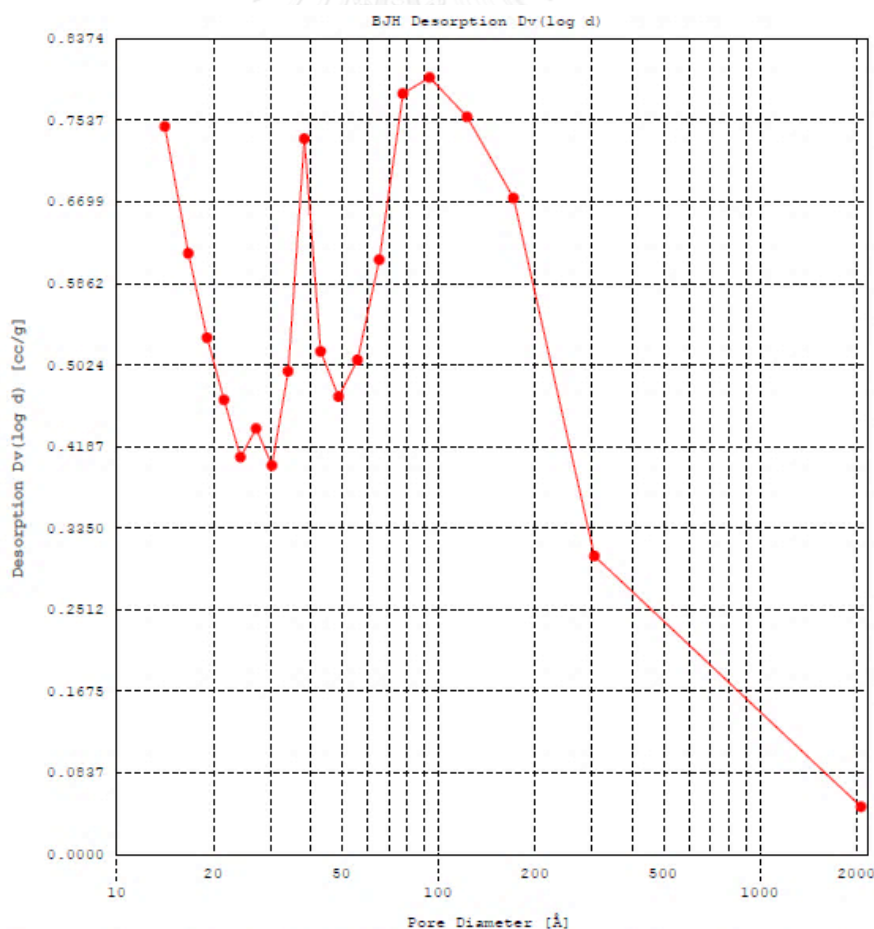
ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของโซเดียมเอซีโอไลต์



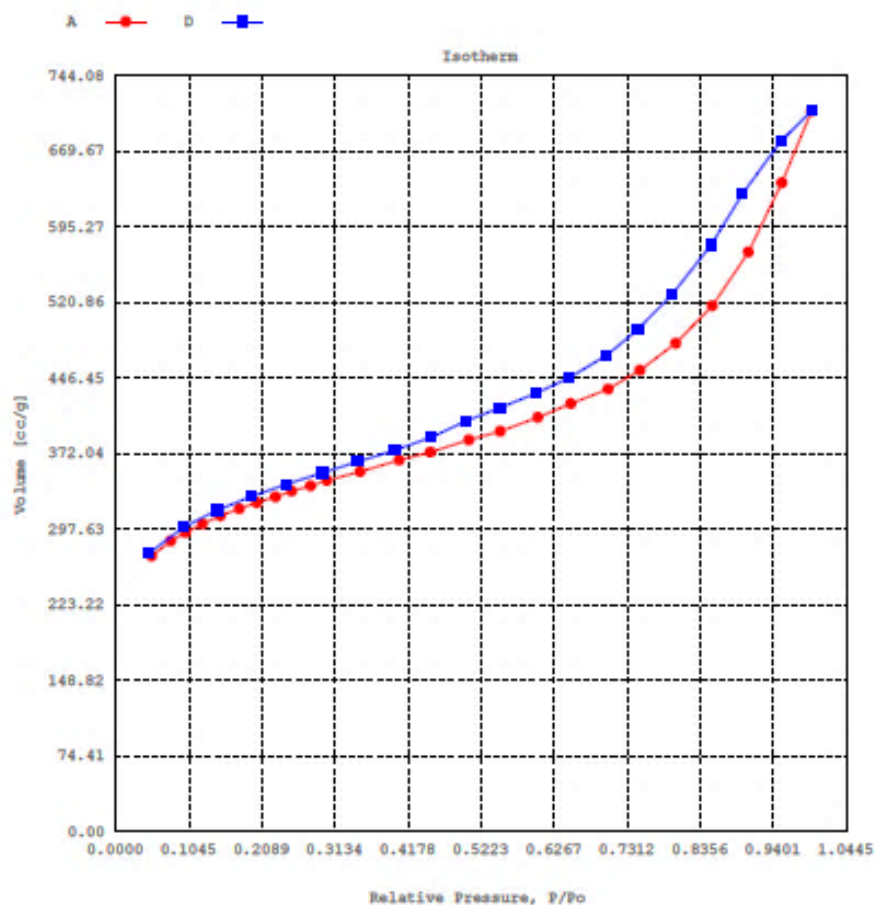
ภาพที่ 4.5 ลักษณะจุลภาคของโซเดียมเอซีโอไลต์

4.1.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของวัสดุดิบ

จากการดูดซับแบบบีอีทีไอโซเทอร์ม (BET : Brunauer, Emmett and Teller) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับเพื่อหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์พบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1067 ตารางเมตร/กรัม และมีการกระจายตัวของขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในภาพที่ 4.6 เมื่อจำแนกประเภทไอโซเทอร์มของการดูดซับตามการจำแนกของบรูเนาเออร์ จากภาพที่ 4.7 พบว่าถ่านกัมมันต์มีรูปแบบการดูดซับเป็นการดูดซับชนิดที่ 2 [34] คือ เกิดการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่ความดันต่ำและเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น โดยมีฮิสเทอรีซิสของการดูดซับเป็นแบบกราฟบรรจบกัน (loop) โดยในช่วงแรกการคายซับของก๊าซไม่ทับกับการดูดซับที่ความดันเดียวกันทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีลักษณะโพรงที่เชื่อมต่อถึงกันตั้งแต่ขนาดใหญ่ (แมโครพอร์) ไปจนถึงขนาดเล็ก (ไมโครพอร์) ทำให้ก๊าซบางส่วนยังดูดซับติดอยู่กับโพรงขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์จนกระทั่งความดันก๊าซต่ำมากพอ ก๊าซที่เหลือจึงคายซับหรือหลุดออกจากโพรงของถ่านกัมมันต์จึงได้กราฟที่บรรจบกันเมื่อลดความดันมาถึงจุดเริ่มต้น



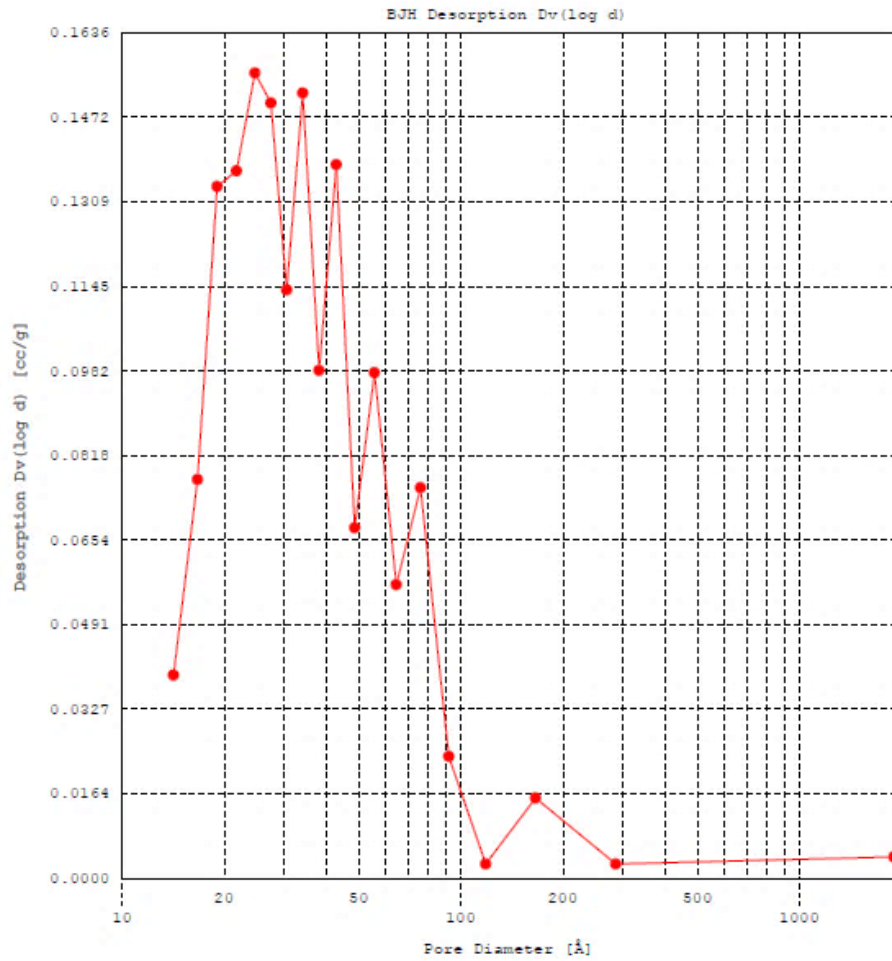
ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์



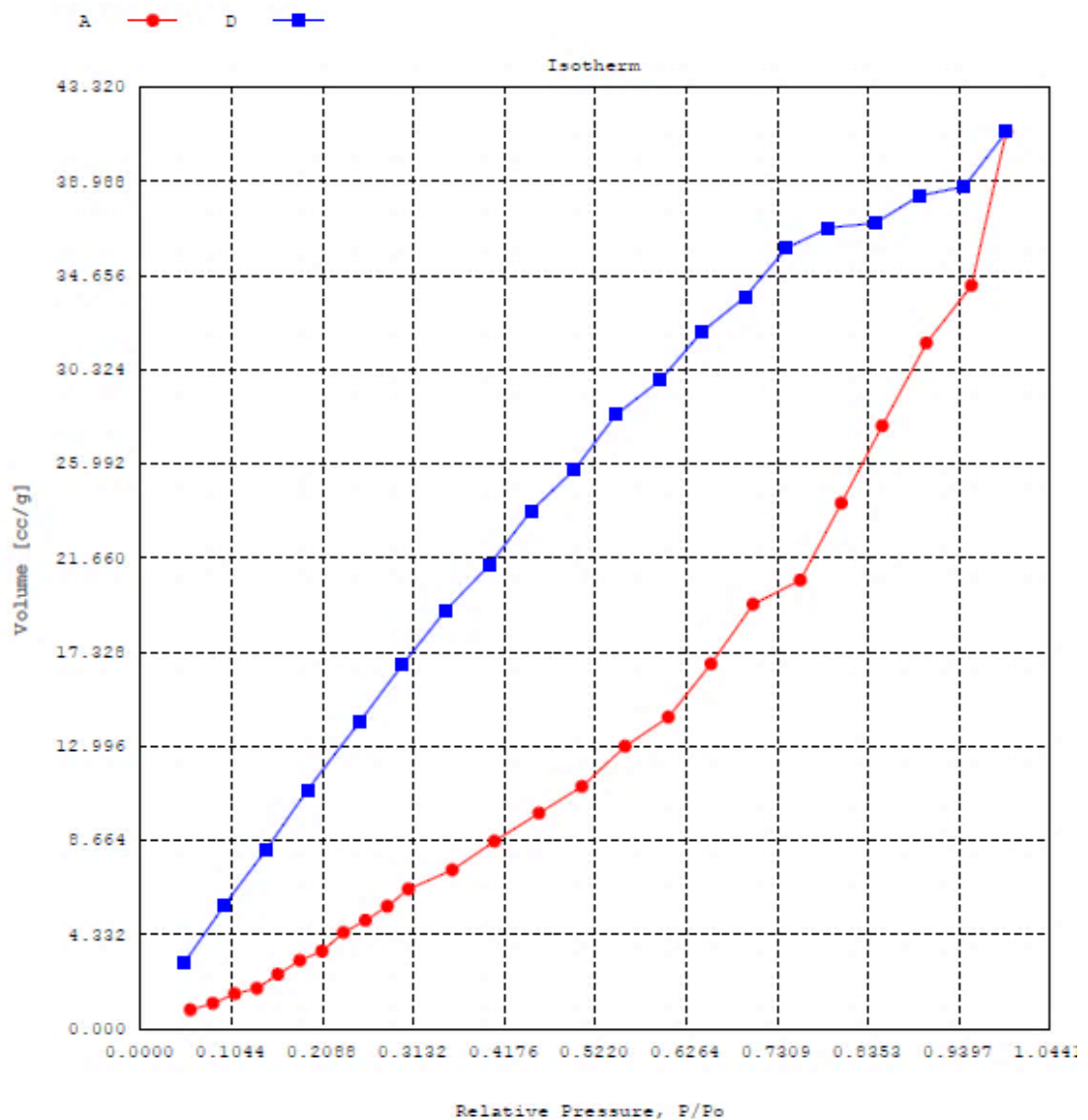
ภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในโพรงของ ถ่านกัมมันต์กับความดัน (P) เมื่อ P_0 เป็นความอิมตัว ณ จุดกลั่นตัวของก๊าซ

และจากการวิเคราะห์ซีโอไลต์พบว่า ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 47.44 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งน้อยกว่าถ่านกัมมันต์มากแม้จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะพบว่าซีโอไลต์ มีขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างหลักที่ประกอบไปด้วยอะลูมิโน ซิลิเกตซึ่งทั้งอะลูมิเนียมและซิลิกอนมีมวลอะตอมมากกว่าเมื่อเทียบกับคาร์บอนที่เป็น องค์ประกอบหลักของถ่านกัมมันต์ พื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์จึงน้อยกว่าเนื่องจากพื้นที่ผิว จำเพาะคิดเทียบต่อน้ำหนักหนึ่งกรัมของวัสดุ โดยมีขนาดโพรงใกล้เคียงกันในระดับอังสตรอมดัง แสดงในภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณาการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของซีโอไลต์ดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่า การดูดซับก๊าซไนโตรเจนในโพรงของซีโอไลต์มากขึ้นเมื่อความดันก๊าซสูงขึ้น และเนื่องจากซีโอไลต์ เอเป็นซีโอไลต์ที่มีโพรงขนาดเล็ก (ไมโครพอร์) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันโดยบริเวณรูเปิดของโพรงจะ แคบกว่าขนาดโพรงภายในเล็กน้อย ดังนั้นรูปแบบฮิสเทอรีซิสของการดูดซับจึงเป็นแบบกราฟไม่ บรรจบกัน (unloop) โดยการลดความดันส่งผลให้ก๊าซเกิดการคายซับหรือหลุดออกจากโพรงแต่

ยังมีก๊าซบางส่วนที่หลงเหลืออยู่ในโพรงด้านในของซีโอไลต์ จนกระทั่งความดันลดลงมาเหลือเท่ากับช่วงเริ่มต้น



ภาพที่ 4.8 การกระจายตัวขนาดโพรงของโซเดียมเอซีโอไลต์



ภาพที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในโพรงของโซเดียมเอซีโอไลต์กับความดัน (P) เมื่อ P₀ เป็นความอิมิตัว ณ จุดกลั่นตัวของก๊าซ

4.2 ศึกษาการขึ้นรูปและการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย

การเตรียมและขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเพื่อใช้สำหรับกำจัดน้ำเสียฟีนอลต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาเพื่อการใช้งานในน้ำ ดังนั้นจึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานเป็นอันดับแรก โดยศึกษาสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์และปริมาณฟีนอลิกเรซิน รวมทั้งปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา

4.2.1 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์

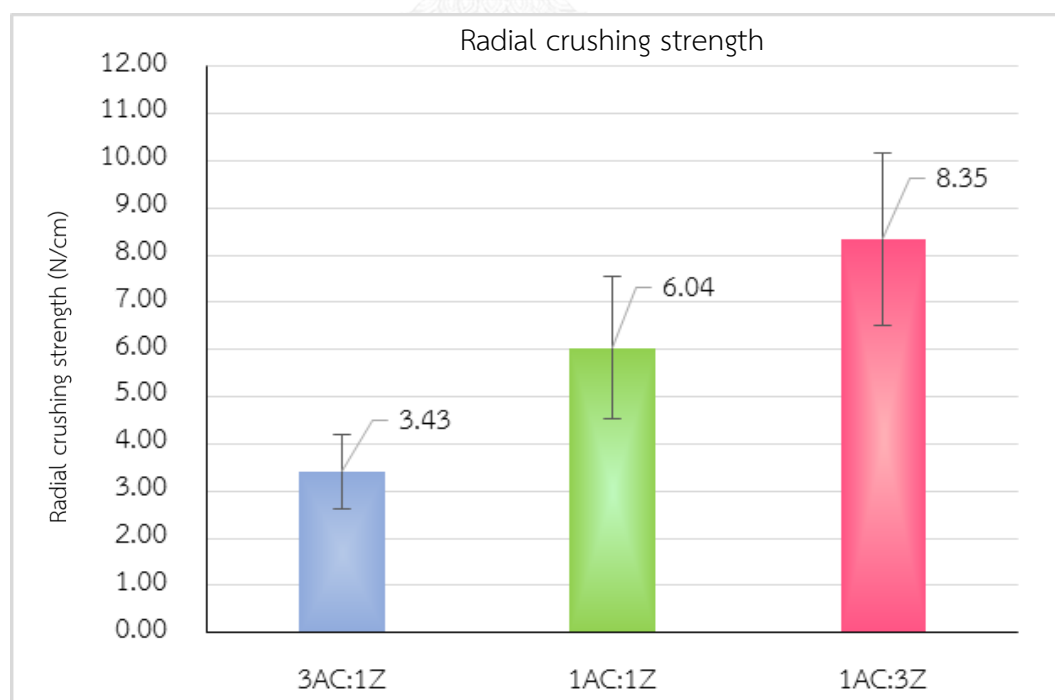
ในขั้นตอนการผสมผงวัสดุด้วยการปั่นหรือคลุกแล้วใช้ตะแกรงร่อนไม่เพียงพอที่จะทำให้ผงวัสดุแต่ละชนิดกระจายตัวได้เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการมีจุดขาวในเนื้อของวัสดุหลังการอัดรีด เพราะการเกาะตัวกันของ โซเดียมเอซีโอไลต์ที่ยังกระจายตัวไม่ดี จึงใช้การบดด้วยหม้อบดความเร็วสูงเพื่อผสมแทนทุกสูตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยผสมพินอลิกเรซินปริมาณเท่ากันคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ของน้ำหนักรวม (น้ำหนักแห้งของผงวัสดุผสม) จากนั้นจึงขึ้นรูปวัสดุและเผาในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที่ พบว่าเมื่อผสมผงวัสดุที่ติดกับสารเชื่อมประสานอินทรีย์ที่เตรียมไว้ จะได้ลักษณะเนื้อวัสดุก่อนการอัดรีดที่แตกต่างกัน โดยในสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์มากจะมีเนื้อวัสดุค่อนข้างแน่น และจะนวดได้ยากมากขึ้นเมื่อซีโอไลต์มีปริมาณมากขึ้น

จากตารางที่ 4.2 เมื่อหมักผงวัสดุที่นวดผสมกับตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ไว้ 3 ชั่วโมงแล้วนำไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีดพบว่าสูตรที่มีเพียงซีโอไลต์เพียงอย่างเดียว (ไม่ได้ผสมถ่านกัมมันต์) ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากเนื้อวัสดุที่ผสมได้ขาดความเป็นพลาสติก (nonplasticity) เนื้อวัสดุจึงไม่มีความยืดหยุ่นไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างไปตามแม่แบบได้ เมื่ออัดรีดออกมาจะแตกออกจากกันไม่เป็นรูปร่างตามต้องการ สำหรับในสูตรที่มีเพียงถ่านกัมมันต์ (ไม่ผสมซีโอไลต์) มีความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่ต่ำกว่าสูตรอื่น สังเกตจากชิ้นงานแตกเสียหายภายหลังการทดลองจุ่มชิ้นงานลงในน้ำ เมื่อนำแต่ละสูตรที่ขึ้นรูปได้ไปเผาและนำมาทดลองจุ่มน้ำพบว่า มีฟองอากาศเกิดขึ้นแสดงว่าเกิดการดูดน้ำเข้าสู่ชิ้นงานอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิของชิ้นงานจึงสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการดูดซับน้ำเข้าสู่โพรงเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นจึงผสมสูตรที่มีสัดส่วนถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์เป็น 3:1, 1:1 และ 1:3 แล้วอัดรีดขึ้นรูป ทำให้แห้งและเผาในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลความต้านทานกำลังอัดด้านข้างดังแสดงในภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบมากกว่าช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.2 ผลการผสมผงวัสดุกับตัวประสานอินทรีย์และการทดสอบความแข็งแรงเบื้องต้นของ
ชั้นงานหลังเผา

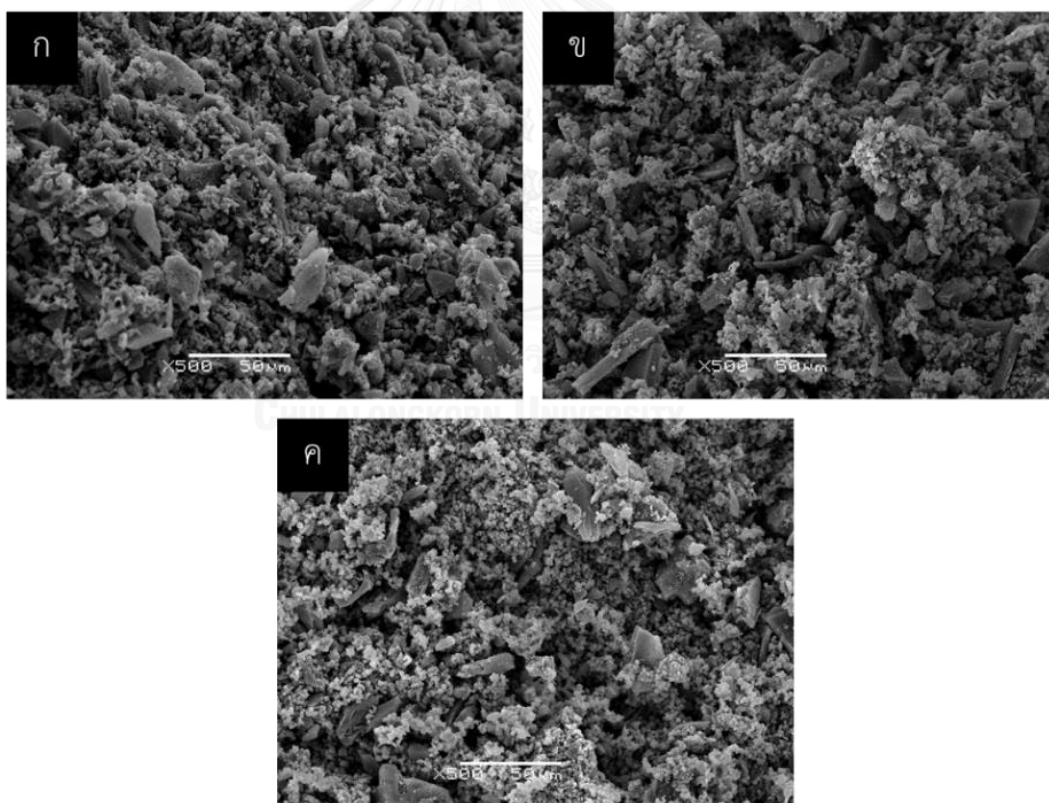
ถ่านกัมมันต์: ซีโอไลต์	การนวดและการอัดรีดขึ้นรูป	ทดลองจุ่มในน้ำหลังเผา
1AC:0Z	นวดง่าย ขึ้นรูปและคงรูปอยู่ได้	ชั้นงานเสียหายทันทีเมื่อจุ่มลงในน้ำ
3AC:1Z	นวดง่าย ขึ้นรูปและคงรูปอยู่ได้	ชั้นงานเสียหายเมื่อกวนน้ำแรง ๆ
1AC:1Z	นวดง่าย ขึ้นรูปและคงรูปอยู่ได้	ชั้นงานไม่เสียหาย
1AC:3Z	นวดยาก ขึ้นรูปค่อนข้างยาก เนื่องจากเสียรูปบางส่วนในขั้นตอนการ ผึ่งแห้ง	ชั้นงานไม่เสียหาย
0AC:1Z	นวดยากที่สุด ไม่สามารถขึ้นรูปได้	-

หมายเหตุ : สัดส่วนโดยน้ำหนักของ AC คือ ถ่านกัมมันต์ Z คือ ซีโอไลต์



ภาพที่ 4.10 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบ
ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

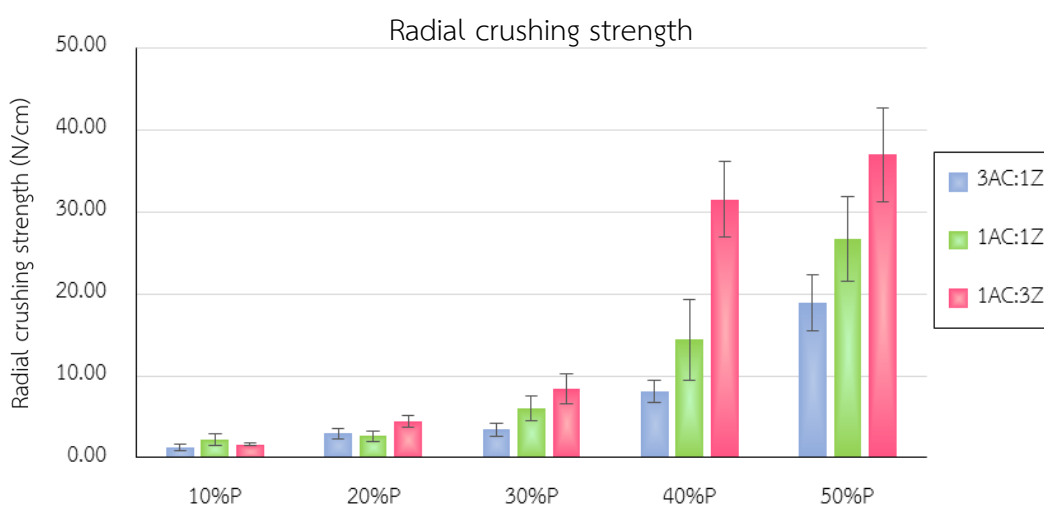
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ขึ้นรูปได้และเผา 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากภาพที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของผลึกโซเดียมเอซีโอไลต์ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กเกาะอยู่กับอนุภาคของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าและรูปร่างไม่แน่นอน ในขณะที่ฟีนอลิกเรซินซึ่งเป็นคาร์บอนอสัณฐานเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์จึงจำแนกออกจากถ่านกัมมันต์ได้ยาก โดยปริมาณโซเดียมเอซีโอไลต์ที่พบเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่ผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ก), 4.11 ข) และ 4.11 ค) ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ว่าภาพที่ 4.11 ค) เนื้อวัสดุค่อนข้างแน่นและมีผลึกโซเดียมเอซีโอไลต์มากที่สุด เนื่องจากผลึกโซเดียมเอซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบและอนุภาคผลึกมีการจัดเรียงตัวที่แน่นทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงสอดคล้องกับค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างที่วัดได้และแสดงไว้ในภาพที่ 4.10 ว่าสูตรที่มีปริมาณซีโอไลต์มากจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนต่อไปจึงปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินเพื่อศึกษาผลของปริมาณฟีนอลิกเรซินที่มีต่อความแข็งแรงของวัสดุหลังเผา



ภาพที่ 4.11 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ผ่านการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอซีโอไลต์ เป็น ก) 3:1 ข) 1:1 และ ค) 1:3

4.2.2 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของ ชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์

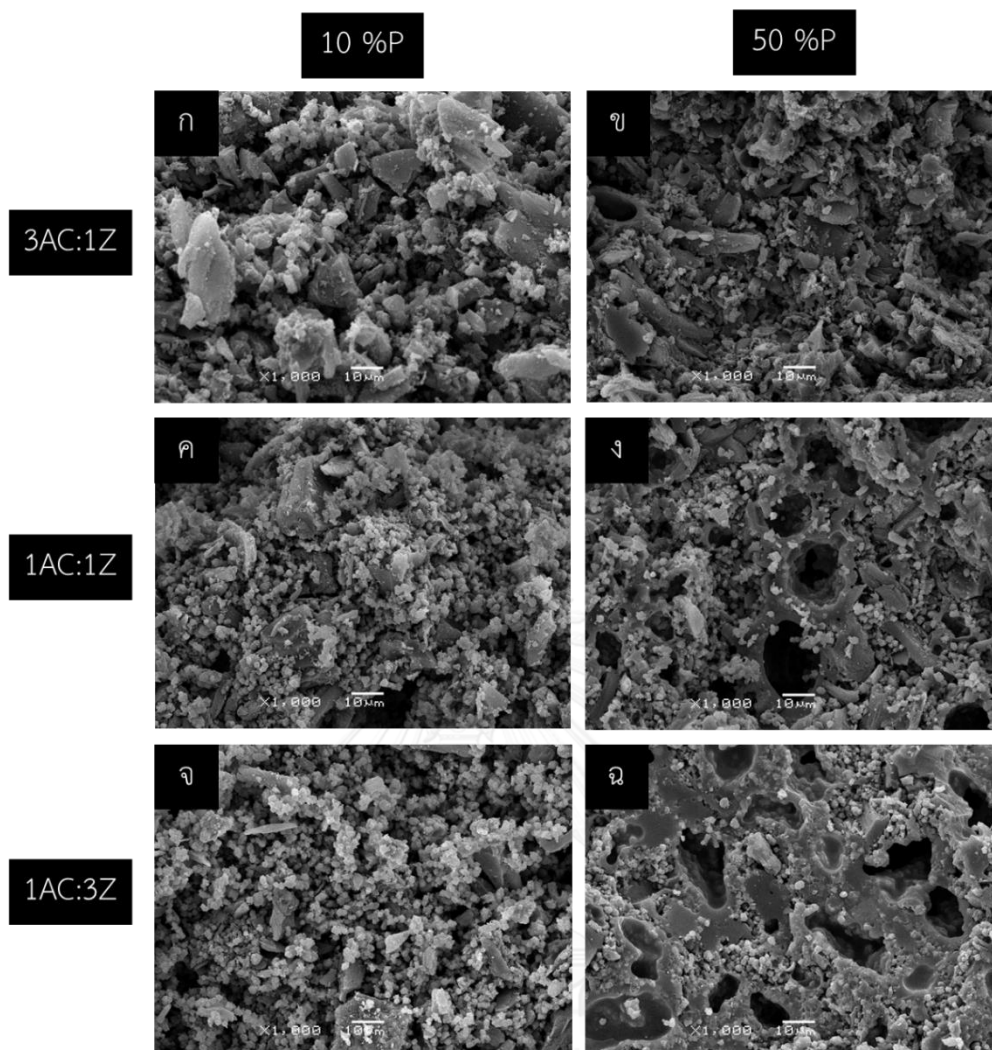
จากการปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าฟีนอลิกเรซินสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาได้ โดยทุกสูตรมีแนวโน้มเช่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ เเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีฟีนอลิกเรซินปริมาณต่างกัน

เนื่องจากฟีนอลิกเรซินจะสลายตัวไปประมาณร้อยละหกสิบ [32] โดยคาร์บอนที่เหลืออยู่จะทำหน้าที่คงโครงสร้างไว้จากพันธะโควาเลนต์ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนอะตอม ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง แต่ต้องมีปริมาณฟีนอลิกเรซินมากถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักขึ้นไปจึงช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตรที่มีฟีนอลิกเรซินน้อย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากลักษณะสีฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่มีปริมาณฟีนอลิกเรซินต่างกัน สำหรับสูตรที่มีถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบมาก การเพิ่มขึ้นของฟีนอลิกเรซินทำให้เนื้อวัสดุแน่นมากขึ้น จากการเปรียบเทียบ ภาพที่ 4.13 ก) กับ ภาพที่ 4.13 ข) (รูปฝั่งซ้ายกับฝั่งขวา) แต่เนื้อวัสดุยังมีความพรุนตัวมากกว่าสูตรที่มีซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบจาก ภาพที่ 4.13 ก), 4.13 ค) และ 4.13 จ) สำหรับฟีนอลิกเรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และ ภาพที่ 4.13 ข), 4.13 ง) และ 4.13 ฉ) สำหรับฟีนอลิกเรซินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (เทียบจากรูปด้านบนบนลงด้านล่าง)



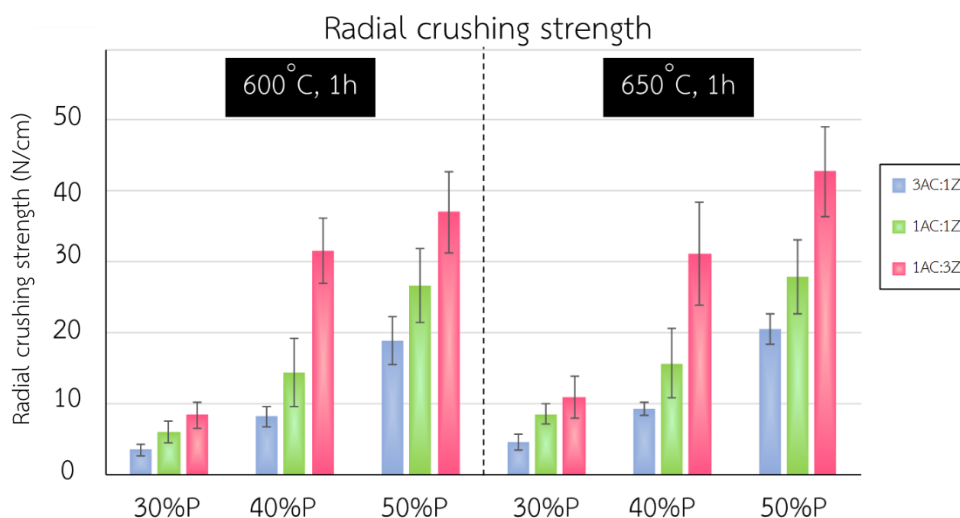
ภาพที่ 4.13 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่มีฟินอลิกเรซินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก(ซ้าย) และร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก(ขวา) เเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีสัดส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอซีโอไลต์ เป็น ก),ข) 3:1 ค),ง) 1:1 และ จ),ฉ) 1:3

4.2.3 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์

ในการเผาชิ้นงานควรเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่ผสมไปในขั้นตอนแรกก่อนการอัดรีดชิ้นรูปจะสลายตัวไปภายหลังการเผา และไม่สามารถเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 680 องศาเซลเซียส เนื่องจากเฟสของไททาเนียจะเปลี่ยนจากอนาเทสไปเป็นรูไทล์และเสถียรสมบัติโพโตคะตะลิสต์ที่ดี [22] นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โซเดียมเอซีโอไลต์จะเสถียรภาพโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงข่ายที่เชื่อมต่อกันและเสถียรความเป็น

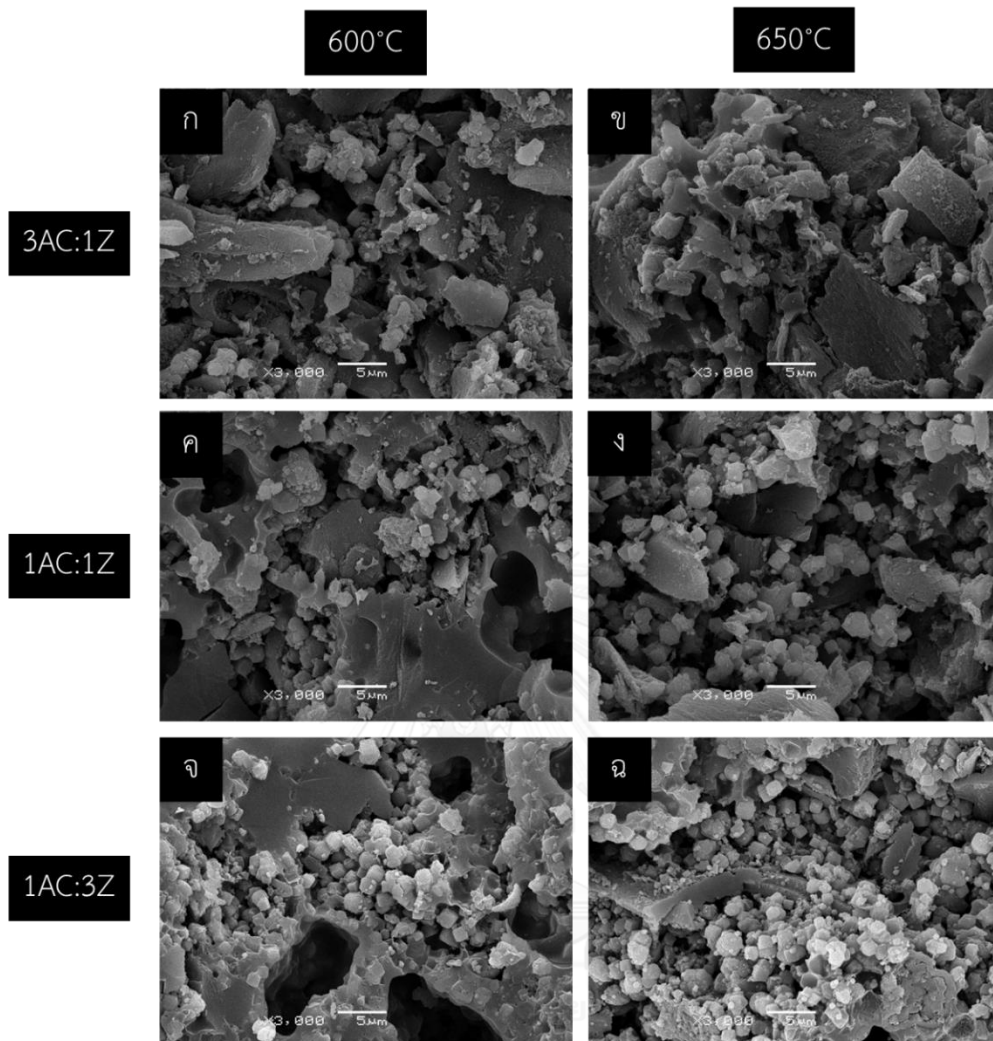
ผลึก [35] ส่งผลให้เสียสมบัติการเป็นตัวดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีเนื่องจากโครงสร้างที่บิดเบี้ยวผิดปกติ

จากผลการทดสอบความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุที่แสดงในภาพที่ 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาช่วยให้วัสดุมีแนวโน้มมีความแข็งแรงมากขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 4.14 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เผาที่อุณหภูมิต่างกัน

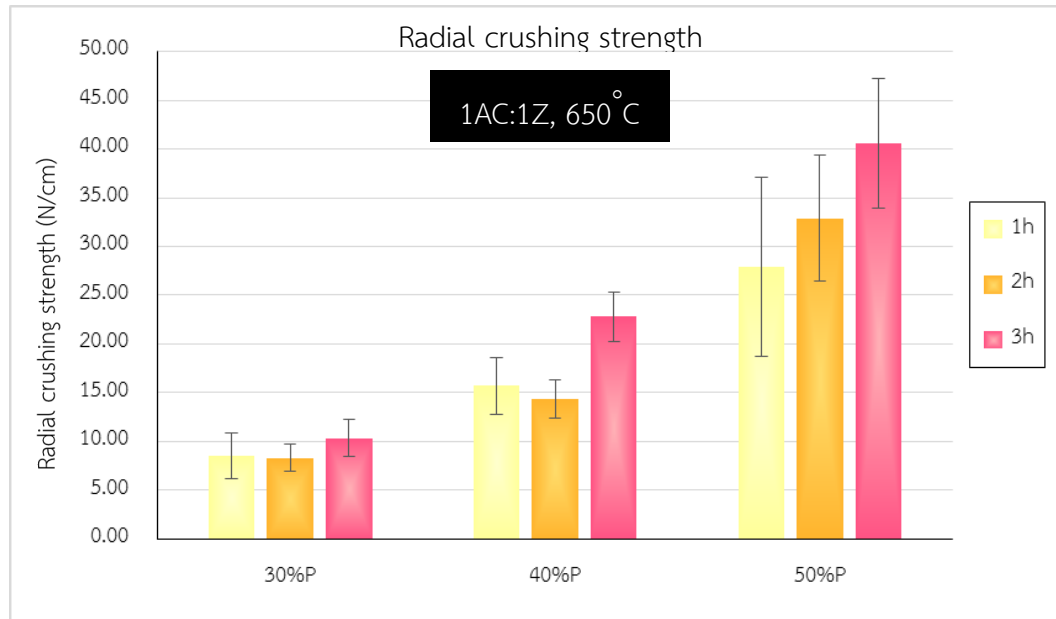
โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายกับวัสดุที่เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มากขึ้นเล็กน้อยอาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิสูงขึ้นการหลอมติดของฟีนอลิกเรซินที่มากขึ้นช่วยให้การยึดระหว่างอนุภาคของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ดีขึ้นได้ไม่มากนัก ทั้งนี้ลักษณะทางจุลภาคที่สังเกตได้แต่ละสูตรที่เผาอุณหภูมิต่างกัน (ด้านซ้ายและขวา) ไม่เห็นความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากโครงสร้างของฟีนอลิกเรซินที่เกิดการหลอมตัวก่อนการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิของซีโอไลต์ไว้บางส่วน นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงเช่นเดียวกับฟีนอลิกเรซินจึงจำแนกเนื้อวัสดุและสังเกตการเชื่อมติดระหว่างถ่านกัมมันต์กับฟีนอลิกเรซินได้ยาก



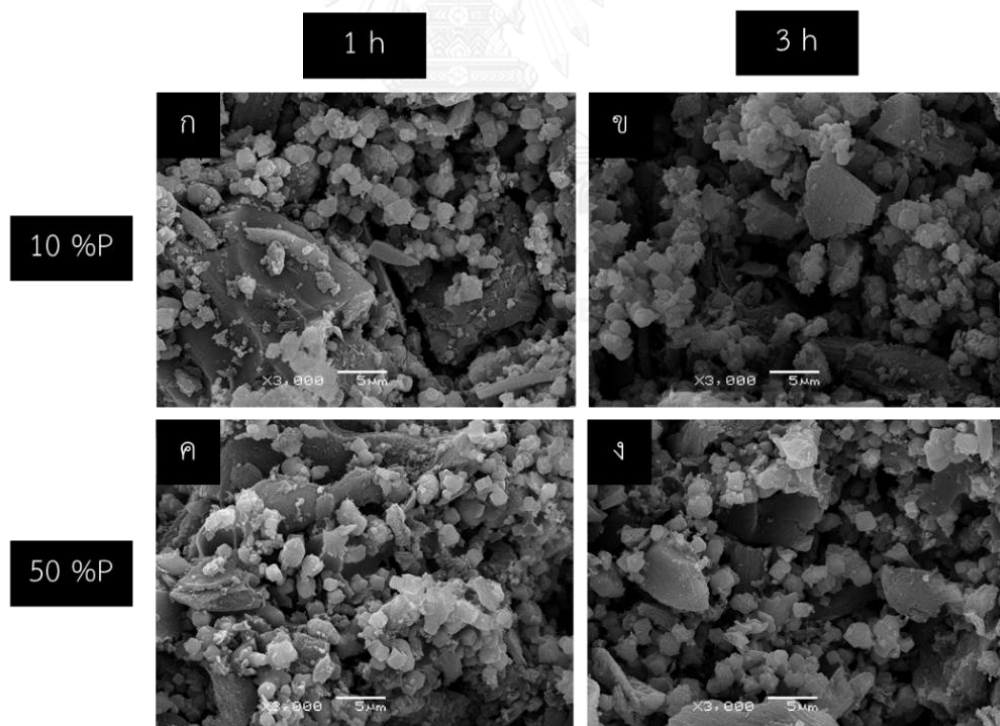
ภาพที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์เผา 600 องศาเซลเซียส (ซ้าย) 650 องศาเซลเซียส (ขวา) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีสัดส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์:ไซเดียมเอซีโอไลต์เป็น ก),ข) 3:1 ค),ง) 1:1 และ จ),ฉ) 1:3

4.2.4 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการเผาที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรถ่านกัมมันต์ผสมซีโอไลต์

จากภาพที่ 4.16 พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการเผาช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเชื่อมติดระหว่างอนุภาควัสดุที่ดีขึ้นเมื่อได้รับความร้อนนานขึ้นแต่ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ผ่านการเผาระยะเวลาต่างกัน 1-3 ชั่วโมง มีลักษณะคล้ายคลึงกันไม่เห็นความแตกต่างเมื่อสังเกตด้วย Scanning electron microscope ดังแสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.16 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานานต่างกัน

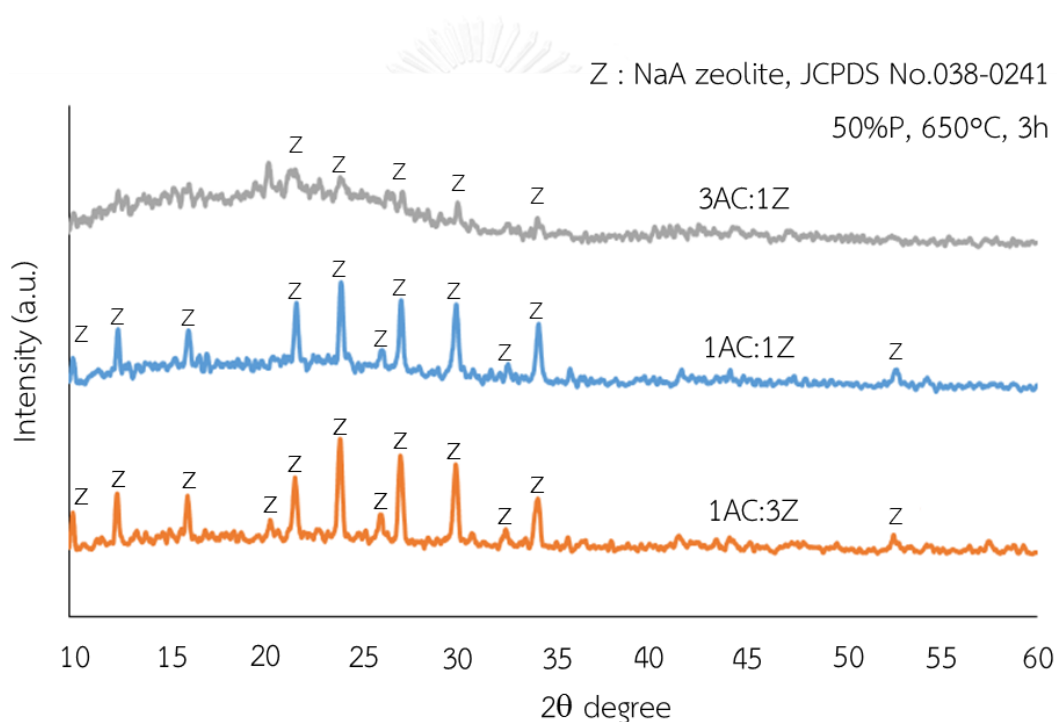


ภาพที่ 4.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่มีถ่านกัมมันต์: โซเดียมเอซีโอไลต์เท่ากับ 1:1 เเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ก),ค) 1 ชั่วโมง และ ข),ง) 3 ชั่วโมง

4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะจำเพาะ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของวัสดุเชิงประกอบ

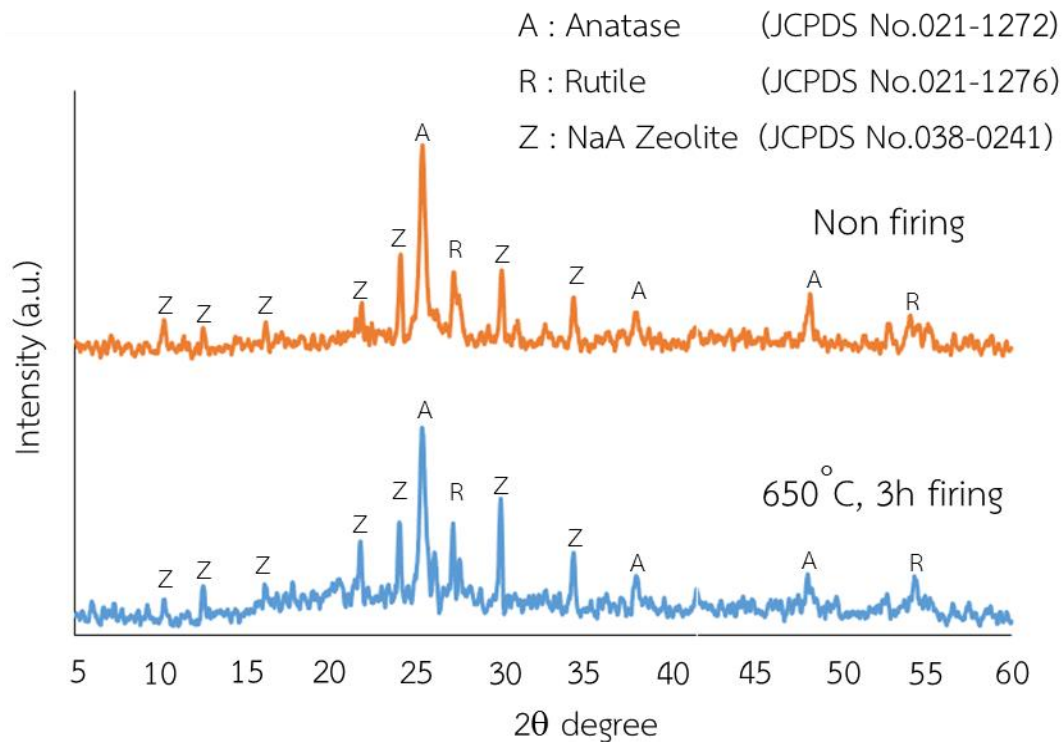
วัสดุหลังเผามีเพียงโซเดียมเอซีโอไลต์ที่มีความเป็นผลึกในขณะที่ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐานและฟีนอลิกเรซินเป็นเทอร์โมเซตพลาสติกที่เผาแล้วเหลือเพียงคาร์บอนอสัณฐาน ดังนั้นเฟสที่ปรากฏและยังคงอยู่ภายหลังกระบวนการเผาดังแสดงในภาพที่ 4.18 คือซีโอไลต์เอ (NaA zeolite, JCPDS No.038-0241) โดยความสูงพีคที่เด่นจะลดลงเมื่อวัสดุมีปริมาณของซีโอไลต์น้อยลง เนื่องจากถูกบดบังจากเฟสที่เป็นอสัณฐาน ได้แก่ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนหลงเหลือจากฟีนอลิกเรซิน



ภาพที่ 4.18 องค์ประกอบเฟสของวัสดุเชิงประกอบหลังเผา 650 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.19 แสดงการวิเคราะห์ไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่ามีไททาเนียเคลือบติดอยู่บนผิววัสดุภายหลังจากเผาและมีอัตราส่วนระหว่างเฟสของไททาเนียที่เป็นเฟสอานาเทส (Anatase, JCPDS No.021-1272) ต่อรูไทล์ (Rutile, JCPDS No.021-1276) เท่าเดิมแสดงว่าไททาเนีย P25 มีการเปลี่ยนแปลงเฟสหลังเผาน้อยมาก ทั้งนี้จากรูปแบบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์พบผลึกโซเดียมเอ

ซีโอไลต์เนื่องจากรังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านชั้นเคลือบไททาเนียไปยังชั้นวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่เป็นวัสดุรองรับได้



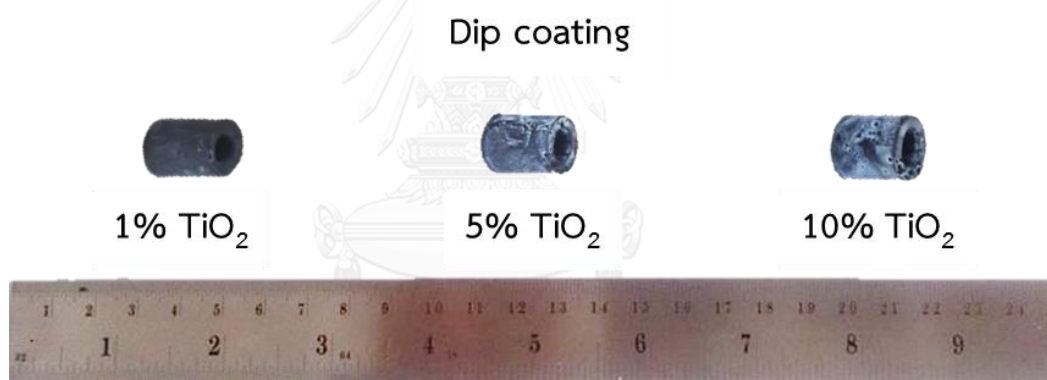
ภาพที่ 4.19 องค์ประกอบเฟสของไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุเชิงประกอบก่อน และหลังเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4.4 ผลการศึกษาวิธีการเคลือบ และ ปริมาณไททาเนีย ที่ใช้เคลือบลงบนวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ

เคลือบชิ้นงานด้วยไททาเนียและเผาในขั้นตอนเดียวหลังจากอัดรีดและผึ่งชิ้นงานให้แห้งแล้วเพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการขึ้นรูป ประหยัดเวลา และ ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการเผาวัสดุ โดยทดลองเคลือบไททาเนียด้วย การจุ่ม การทาด้วยแปรง และ ฟันเคลือบ

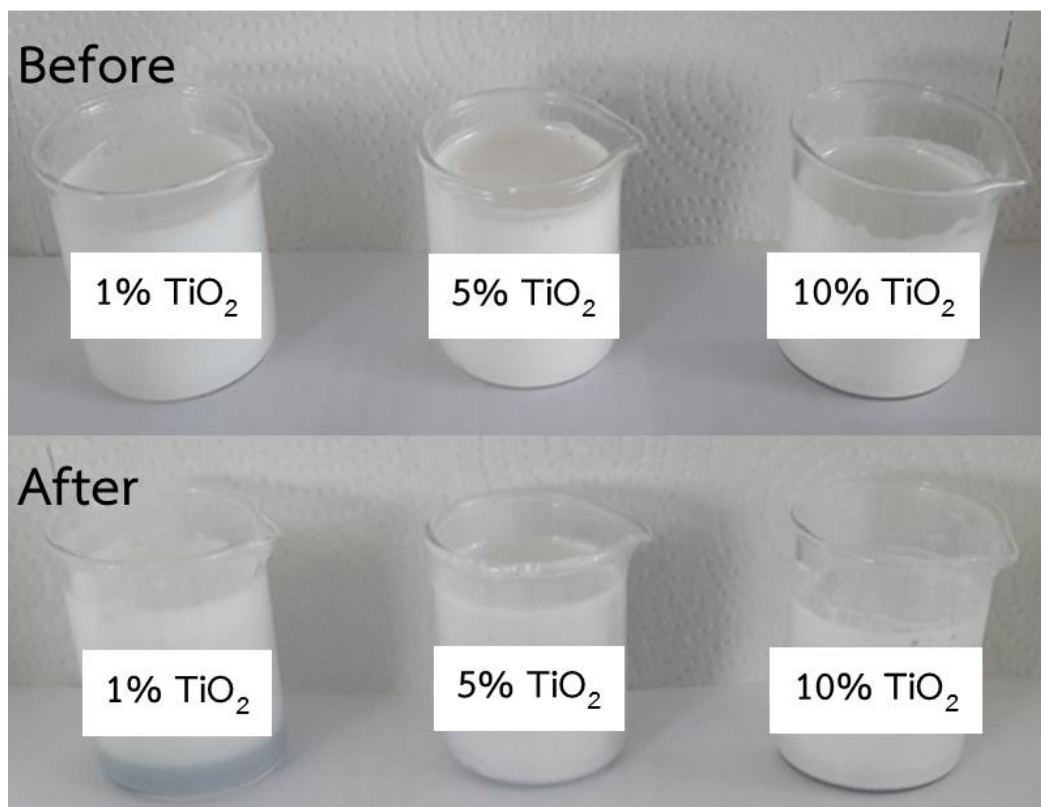
4.4.1 วิธีการจุ่ม

จากการทดลองเคลือบไททาเนียด้วยวิธีการจุ่มลงในสารแขวนลอยไททาเนียในน้ำพบว่าสามารถเคลือบขึ้นวัสดุได้ดังภาพที่ 4.20 โดยหลังจากจุ่มชิ้นงาน 2-3 ชิ้น ไททาเนียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอนดังภาพที่ 4.21 เนื่องจากถ่านกัมมันต์บางส่วนหลุดออกมาจากชิ้นงานและดูดซับอนุภาคของไททาเนียไว้ ทำให้อนุภาคไททาเนียที่รวมกับถ่านกัมมันต์มีน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนในที่สุด ในกรณีที่เผาชิ้นงานก่อนแล้วจึงเคลือบไททาเนีย วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์หลังเผามีความสามารถในการดูดซับได้ดีจึงดูดน้ำเข้าไปในตัววัสดุมาก โดยในแต่ละครั้งที่ทำการจุ่มเคลือบไททาเนียจะสูญเสียน้ำเข้าไปในตัววัสดุ ทำให้ควบคุมปริมาณไททาเนียที่กระจายตัวอยู่ในน้ำได้ยากเนื่องจากทุก ๆ ครั้งที่จุ่มปริมาณไททาเนียในน้ำจะมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นสารแขวนลอยไททาเนียที่เตรียมมาเพื่อจุ่มเคลือบจึงสามารถใช้จุ่มเคลือบวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ได้เพียงไม่กี่ชิ้นเท่านั้น



ภาพที่ 4.20 การเคลือบติดไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำตามลำดับ ด้วยวิธีการจุ่ม

นอกจากนี้ในขั้นตอนการผึ่งให้แห้งบริเวณผิวของน้ำที่เคลือบอยู่บนวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์จะมีแรงตึงผิวมากทำให้อนุภาคไททาเนียเกิดการกระจุกตัวกันเพื่อลดพลังงานผิวระหว่างอนุภาคของไททาเนียกับผิวของน้ำก่อนที่น้ำจะค่อย ๆ ถูกดูดซึมไปบางส่วนและระเหยไปหมด จึงได้แผ่นฟิล์มไททาเนียเคลือบที่ไม่มีความสม่ำเสมอทำให้การเกาะติดบริเวณที่เกิดการรวมตัวของไททาเนียไม่ดีอีกด้วย

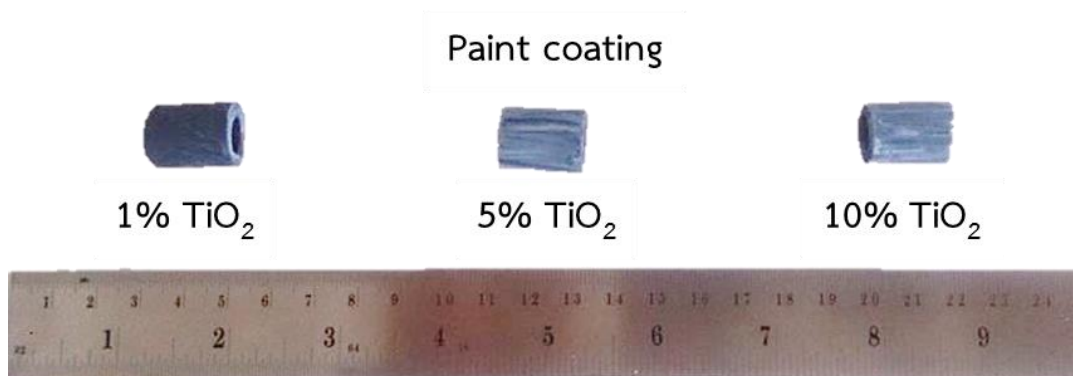


ภาพที่ 4.21 ไททาเนียร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำก่อนและหลังทำการจุ่มชิ้นงาน

4.4.2 วิธีการทาเคลือบ

จากการทดลองเคลือบไททาเนียด้วยวิธีการทาเคลือบได้ลักษณะชิ้นงานที่เคลือบไททาเนีย ดังแสดงในภาพที่ 4.22 พบว่าในขั้นตอนการทาทำให้ผิวด้านนอกของวัสดุติดมากับแปรงบางส่วน เนื่องจากไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ผสมในสารเชื่อมประสานอินทรีย์สามารถละลายออกมาได้เมื่อมีน้ำมาชะและสามารถถูกชะออกมาได้มากขึ้นเมื่อให้แรงกระทำลงไปบนชิ้นงาน ดังนั้นการทาหรือจุ่มจึงเปรียบได้กับการเพิ่มแรงกวนทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดีและไวขึ้น เนื่องจากบริเวณแปรงมีน้ำอยู่มากกว่าในชิ้นงาน จึงทำให้ผิวด้านนอกที่โดนแปรงทามีผิวที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้การเคลือบติดของไททาเนียยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยมีลักษณะเป็นรอย ตามการลากของแปรงที่ใช้ทาเพราะไททาเนียร้อยละ 10 ในน้ำที่ใช้เคลือบมีปริมาณไททาเนีย น้อยเกินไป หากทาซ้ำเปรียบเสมือนการเอาน้ำไปชะเพิ่ม ต้องรอให้วัสดุแห้งก่อนจึงสามารถทาซ้ำ ได้ แต่จะมีไททาเนียบางส่วนหลุดติดแปรงมาเช่นกันเนื่องจากการทาด้วยมือควบคุมแรงที่ใช้ในการทาได้ยาก ซึ่งการทาซ้ำหลายรอบเป็นการเพิ่มระยะเวลาและขั้นตอนในการเคลือบ ในกรณีที่เพิ่มปริมาณไททาเนียในน้ำจะต้องใช้ไททาเนียมากขึ้นเป็นการสิ้นเปลืองเมื่อเทียบกับวิธีพ่น

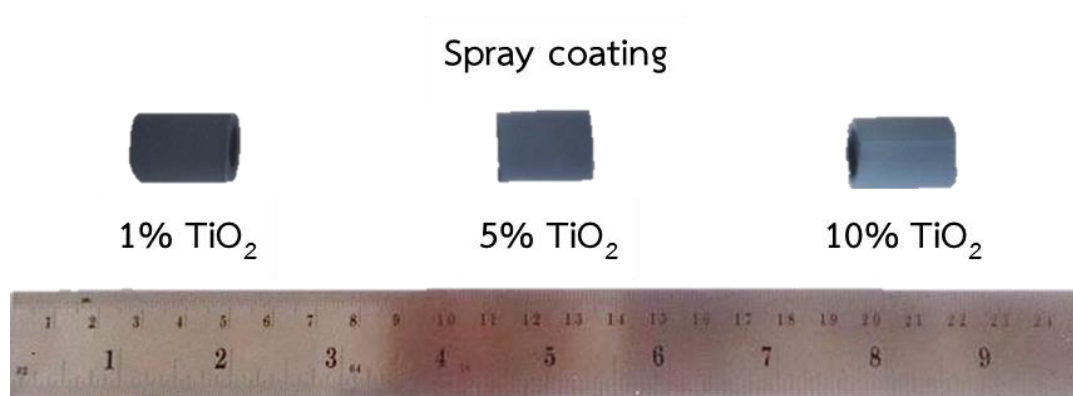
เคลือบที่จะกล่าวถึงในลำดับถัดไป ดังนั้นวิธีการทาเคลือบด้วยแปรงจึงเป็นวิธีการที่ควบคุมลักษณะผิว ความเรียบของผิวตัวรองรับ และการเคลือบติดของไททาเนียได้ยาก



ภาพที่ 4.22 การเคลือบติดไททาเนียร์้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนักในน้ำตามลำดับด้วยวิธีการทาด้วยแปรง

4.4.3 วิธีการพ่นเคลือบ

จากการทดลองเคลือบไททาเนียด้วยวิธีการพ่นเคลือบพบว่าอนุภาคไททาเนียสามารถเกาะติดได้ดีบนวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซิลิโคนที่ใช้เป็นวัสดุรองรับดังแสดงในภาพที่ 4.23 เนื่องจากละอองฝอยที่ผ่านหัวพ่นมีขนาดเล็ก สามารถแพร่กระจายลงบนผิววัสดุอย่างทั่วถึง และแรงลมที่ใช้เป่าพ่นละอองมีส่วนช่วยให้เกิดการติดลงบนผิวได้ดี เป็นวิธีการที่สะดวก และประหยัดไททาเนียเพราะสามารถขยายขนาดการทดลองไปเป็นระดับอุตสาหกรรมและยังสามารถควบคุมความหนาของชั้นไททาเนียที่เคลือบได้อย่างแม่นยำมากขึ้นจากอัตราการหมุนวัสดุรองรับขณะพ่นเคลือบ ระยะห่างระหว่างหัวพ่นกับวัสดุ แรงลมที่ใช้ในการพ่น นอกจากนี้การเคลือบด้วยวิธีพ่นเคลือบยังมีข้อดีอีกประการคือบริเวณผิวที่เคลือบแห้งอย่างรวดเร็ว หากสลับรูปแบบการพ่นโดยพ่นไททาเนียสลับกับพ่นลมสามารถเคลือบซ้ำได้เกือบทันที ทั้งนี้เนื่องมาจากลมที่พ่นออกมามีปริมาณมากทำให้น้ำบริเวณผิวของวัสดุเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วเหลือเพียงไททาเนียที่เกาะติดอยู่ที่ผิววัสดุ

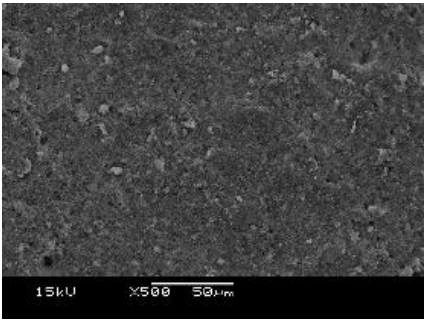
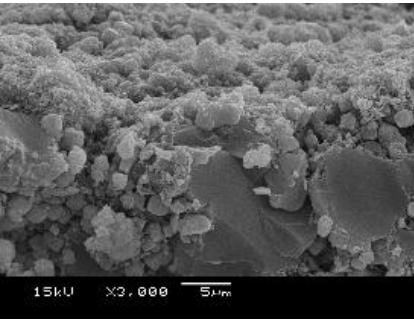


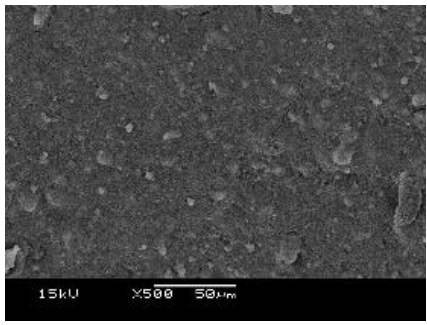
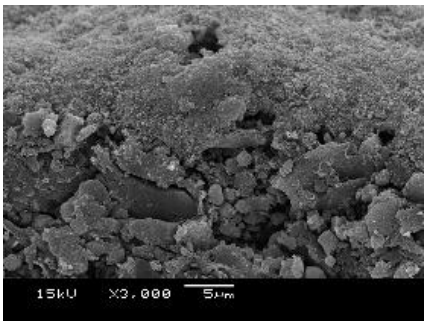
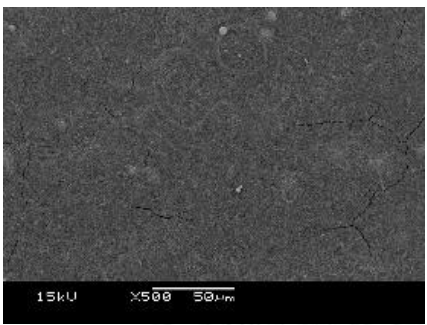
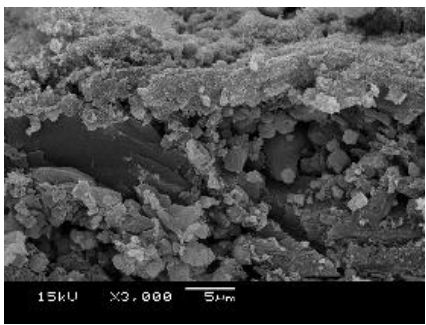
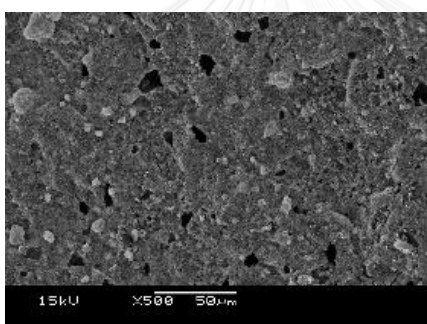
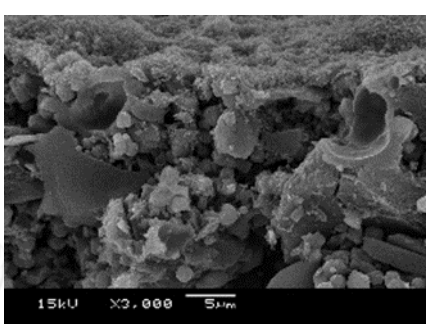
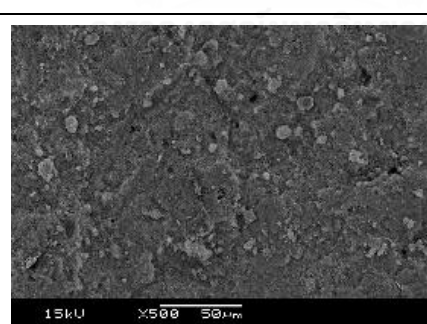
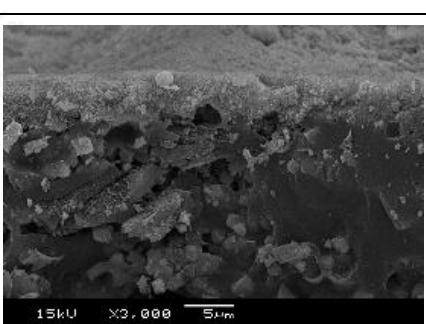
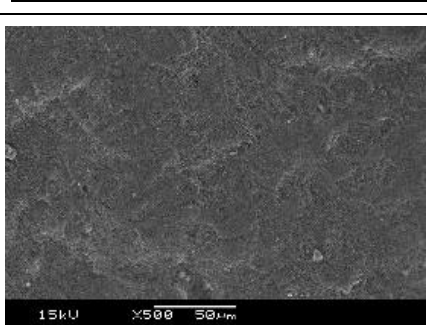
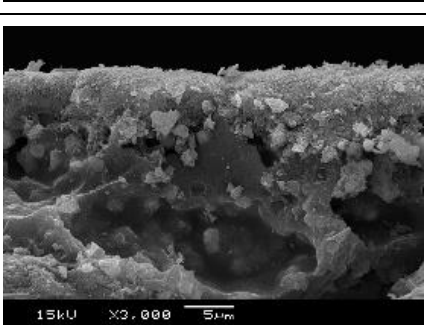
ภาพที่ 4.23 การเคลือบติดไททาเนีย ร้อยละ 1, 5 และ 10 ในน้ำตามลำดับ ด้วยวิธีการพ่น

4.4.4 ปริมาณไททาเนียที่เคลือบ

จากการทดลองใช้วิธีการพ่นเคลือบเพื่อเคลือบไททาเนียลงบนผิววัสดุโดยปรับเปลี่ยนปริมาณไททาเนียที่ใช้เคลือบด้วยการกำหนดร้อยละของไททาเนียในน้ำที่ใช้เคลือบเป็นร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ไททาเนียร้อยละ 1 ในน้ำได้ชั้นไททาเนียมีการกระจายตัวบนผิวไม่เป็นฟิล์ม ในขณะที่ไททาเนียร้อยละ 5 มีปริมาณไททาเนียมากกว่าและหนาแน่นกว่า และที่ร้อยละ 10 เกิดเป็นชั้นไททาเนียที่เรียบและหนาที่สุดประมาณ 5 ไมครอน โดยมีน้ำหนักไททาเนียที่เคลือบบนผิววัสดุเฉลี่ยประมาณ 0.01 กรัมต่อชิ้นดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไททาเนียร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในน้ำพ่นเคลือบวัสดุรองรับเพื่อการเคลือบที่สม่ำเสมอและความง่ายต่อการวัดปริมาณไททาเนียโดยการชั่งน้ำหนักเฉลี่ยต่อชิ้น

ตารางที่ 4.3 การเคลือบติดของไททาเนียบนผิววัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ด้วยวิธีการพ่นเคลือบ

การเผา	ไททาเนียที่ใช้พ่นเคลือบ	ลักษณะผิวเคลือบ	ภาคตัดขวาง
ก่อนเผา	1 wt%		

	5 wt%		
ก่อนเผา	10 wt%		
หลังเผา (650 °C, 3h)	1 wt%		
	5 wt%		
	10 wt%		

4.5 ผลการศึกษาความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และ ความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย

จากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของส่วนประกอบที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อโซเดียมเอซีโอไลต์พบว่าสูตรที่มีถ่านกัมมันต์:ซีโอไลต์เป็น 1:1 และ 1:3 มีความแข็งแรงค่อนข้างมาก และปริมาณฟิโนลิกเรซินที่สูงขึ้นจนสามารถทนการขยายตัวของชิ้นงานเมื่อจุ่มลงในน้ำได้เมื่อมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป โดยชิ้นงานไม่แตกหักเสียหาย จึงวัดความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงานสูตรดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 4.4 สังเกตได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานอยู่ในช่วงร้อยละ 3 - 4 เนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์เชื่อมประสานที่อุณหภูมิประมาณ 200 - 400 องศาเซลเซียสและฟิโนลิกเรซินบางส่วนเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส โดยคงเหลือคาร์บอนอยู่ในโครงสร้างเพื่อคงความแข็งแรงให้ชิ้นงานหลังเผา

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้หลังเผาพบว่าสูตรที่มีโซเดียมเอซีโอไลต์มากกว่าคือ 1AC:3Z มีความหนาแน่นมากกว่าเมื่อเทียบกับสูตร 1AC:1Z จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุที่วัดได้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟิโนลิกเรซินที่แตกต่างกันพบว่าสูตรที่มีฟิโนลิกเรซินมากจะมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น โดยสูตรที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ 1AC:3Z, 50%P และสูตรที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดคือ 1AC:1Z, 30%P ในทางกลับกันทั้งสองสูตรจะมีความพรุนตัวปรากฏน้อยที่สุดและมากที่สุดตามลำดับซึ่งสัมพันธ์กับร้อยละการดูดซึมน้ำที่คำนวณได้ เนื่องจากยิ่งวัสดุมีรูพรุนมากจะสามารถดูดซับน้ำได้ดีมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบหลังเผา 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง

ถ่านกัมมันต์ : โซเดียมเอ ซีโอไลท์	ปริมาณ ฟีนอลิกเรซิน (%)	การสูญเสีย น้ำหนัก หลังเผา (%)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความ พรุนตัว (%)
1AC:1Z	30	3.11 (± 0.1893)	0.7543 (± 0.0282)	69.11 (± 5.83)	52.62 (± 2.36)
	40	4.62 (± 0.2696)	0.7960 (± 0.0583)	53.52 (± 7.90)	42.30 (± 3.45)
	50	3.07 (± 0.2542)	0.8307 (± 0.0142)	51.88 (± 3.77)	43.07 (± 2.61)
1AC:3Z	30	3.90 (± 0.3517)	0.8751 (± 0.0065)	56.19 (± 0.96)	49.17 (± 0.50)
	40	3.71 (± 0.1375)	0.9268 (± 0.0029)	46.11 (± 2.96)	42.74 (± 2.85)
	50	3.34 (± 0.2066)	0.9555 (± 0.0061)	40.10 (± 0.64)	38.31 (± 0.37)

4.6 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและลักษณะโพรงของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ ซีโอไลท์/ไททาเนียด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller

จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสูตร 3AC:1Z เเผา 600 องศาเซลเซียสที่มีฟีนอลิกเรซินแตกต่างกันคือร้อยละ 30 และ 50 ตามลำดับวัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้เท่ากับ 583.45 และ 479.34 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับสูตรที่เผา 650 องศาเซลเซียส ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 518.88 และ 483.79 ตารางเมตร/กรัม แสดงให้เห็นถึงปัจจัยปริมาณฟีนอลิกเรซินในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเนื่องจากฟีนอลิกเรซินที่ถูกเผาเกิดการหลอมเชื่อมติดอนุภาคถ่านกัมมันต์และโซเดียมเอซีโอไลท์โดยคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่ภายหลังการเผาไม่ได้ผ่านการก่อกัมมันต์ส่งผลให้พื้นที่ผิวบางส่วนลดลง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจากสูตร 3AC:1Z ที่มีฟีนอลิกเรซิน ร้อยละ 30 เผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส วัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ได้ 583.45 และ 518.88 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ แสดงแนวโน้มว่าวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสูตร 3AC:1Z ที่มีฟีนอลิกเรซิน ร้อยละ 50 เผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดได้คือ 479.34 และ 483.79 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เผาวัสดุภายใต้บรรยากาศรีดักชันเป็น 650 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเนื่องจากฟีนอลิกเรซินเกิดการหลอมและสลายตัวที่ 600 องศาเซลเซียสใกล้เคียงกับที่ 650 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุสูตร 1AC:1Z กับ 1AC:3Z ที่มีฟีนอลิกเรซิน เท่ากันคือร้อยละ 30 และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสพบว่าสูตรที่มีถ่านกัมมันต์มากกว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าคือ 340.25 ตารางเมตร/กรัม เมื่อเทียบกับสูตรที่มีซีโอไลต์มากกว่าคือ 264.91 ตารางเมตร/กรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากถ่านกัมมันต์มีพร่องภายในที่ทำให้มีพื้นที่ผิวจำนวนมากว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนัก 1 กรัม จึงวิเคราะห์และแปลงค่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะได้มากกว่าโซเดียมเอซีโอไลต์

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย

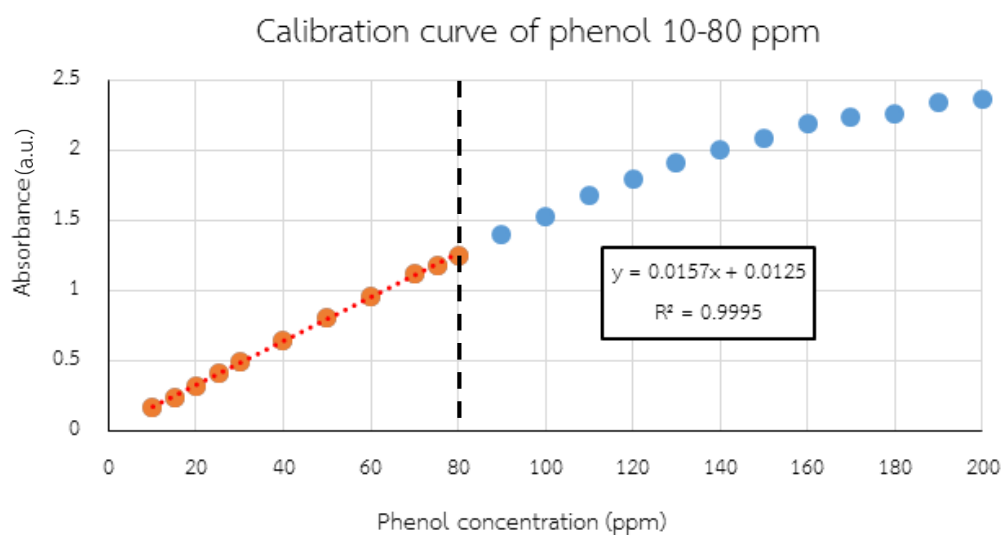
สูตรและอุณหภูมิที่เผา	3AC:1Z 600°C		3AC:1Z 650°C		30%P 650°C	
	30%P	50%P	30%P	50%P	1AC:1Z	1AC:3Z
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	583.45	479.34	518.88	483.79	340.25	264.91

4.7 ผลการนำวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียไปใช้กำจัดฟีนอลในน้ำ

ฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเคมีส่วนมากมีฟีนอลอยู่ในช่วงความเข้มข้นต่ำเพียงระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ยูวี-วิสิเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อติดตามความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นความเข้มข้นของฟีนอล ต้องมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ เป็นเส้นตรง สำหรับฟีนอลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 270 นาโนเมตรจึงวัด

ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ 270 นาโนเมตรเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของฟีนอลดังแสดงในภาพที่ 4.22

จากกราฟมาตรฐานสามารถใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจวัดความเข้มข้นของฟีนอลพบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มข้นของฟีนอลมากที่สุดเมื่อฟีนอลมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10 – 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ดังนั้นจึงติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน



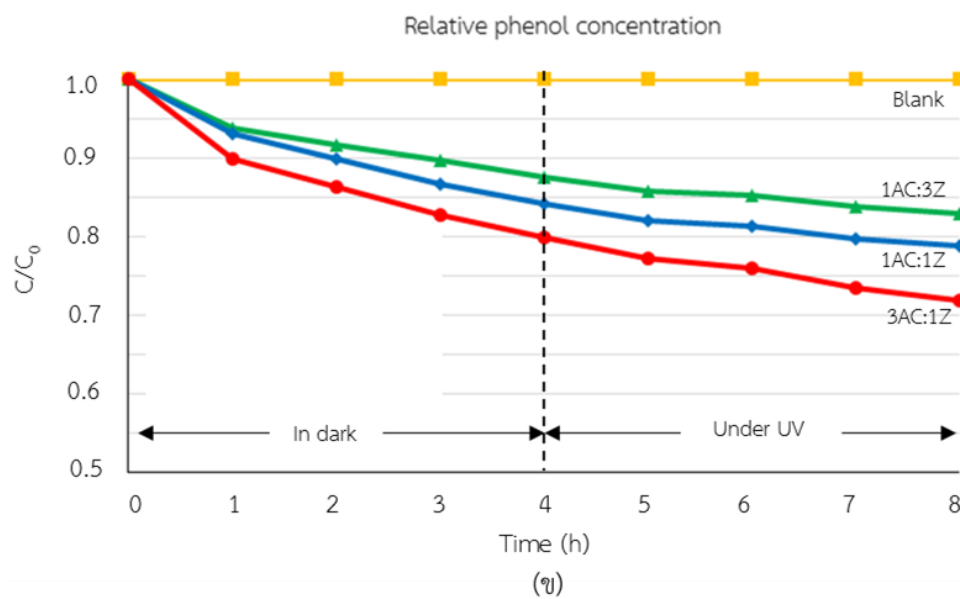
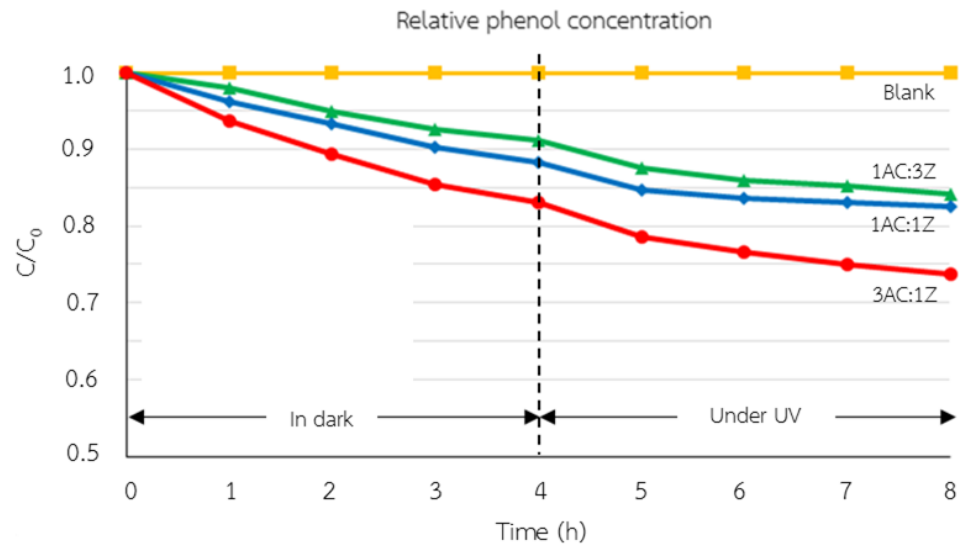
ภาพที่ 4.24 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตรกับความเข้มข้นของฟีนอลในช่วง 10-80 ส่วนในน้ำล้านส่วน

หลอดยูวีที่ใช้กระตุ้นให้ไททาเนียในงานวิจัยนี้มีความเข้มแสงประมาณ 1.900 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มแสงยูวีในประเทศไทยในวันที่มีแดดจัด โดยวัดในวันที่ 15 พฤษภาคม 2558 ณ กรุงเทพมหานคร ช่วงเวลา 10.00 น. มีค่าความเข้มแสงประมาณ 1.822-1.900 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงดูดซับฟีนอลได้ดี แต่หลังจากขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียแล้วอัตราการดูดซับฟีนอลเกิดอย่างช้า ๆ ใช้เวลาในการดูดซับนานหลายวันกว่าการดูดซับฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในน้ำล้านส่วนจะอิ่มตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดลองจึงกำหนดระยะเวลาที่จุ่มวัสดุในที่มี 4 ชั่วโมง และเปิดหลอดไฟฉายแสงยูวี 4 ชั่วโมง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟีนอลจากค่าการดูดกลืนแสงยูวีของสารละลายฟีนอลที่เวลาต่าง ๆ

จากการทดลองกำจัดฟีนอลความเข้มข้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้านส่วนพบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของวัสดุที่สังเคราะห์ได้แตกต่างกันไปดังแสดงใน ภาพที่ 4.25 เมื่อกำหนดให้ปัจจัยปริมาณฟีนอลิกเรซินคงที่ที่ร้อยละ 30 พบว่าสูตรที่มีถ่านกัมมันต์มากกว่าสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวมากกว่าโซเดียมเอซีโอไลต์จึงมีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าโซเดียมเอซีโอไลต์ และเมื่อเทียบกับสูตรที่มีฟีนอลิกเรซินร้อยละ 50 พบว่าปัจจัยเรื่องสัดส่วนของถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอซีโอไลต์เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ยังมีซีโอไลต์มากกว่าการลดลงของฟีนอลในน้ำจะช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าสำหรับสูตรที่มีถ่านกัมมันต์มากกว่า ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.6 จากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่แสดงในตารางที่ 4.5

หากพิจารณาปัจจัยปริมาณของฟีนอลิกเรซิน พบว่าการเพิ่มขึ้นของฟีนอลิกเรซินมีผลทำให้การดูดซับฟีนอลลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์:โซเดียมเอซีโอไลต์เท่ากันทั้งนี้อาจเป็นเพราะฟีนอลิกเรซินบางส่วนที่เกิดการหลอมติดกับถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ขัดขวางการดูดซับฟีนอลเข้าสู่โพรงของวัสดุ ฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ส่งผลให้การดูดซับช้าลงเล็กน้อยเท่าที่นั่นดังนั้นการเลือกใช้วัสดุสูตรที่ผสมฟีนอลิกเรซินถึงร้อยละ 50 จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในน้ำ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ผสมฟีนอลิกเรซินร้อยละ 50 มีความแข็งแรงของวัสดุมากกว่าสูตรที่มีฟีนอลิกเรซินร้อยละ 30 ค่อนข้างมากเมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุ ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 ภาพที่ 4.12

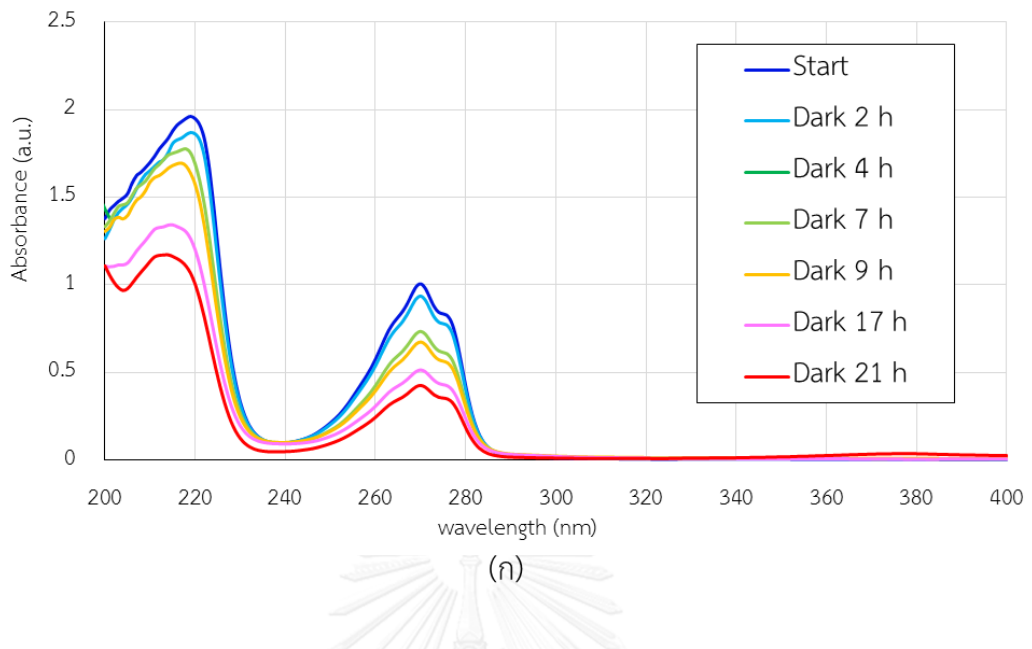
จากการสังเกตความเข้มข้นของฟีนอลที่ลดลงอย่างช้า ๆ ไปจนถึงชั่วโมงที่ 5 แล้วจึงเปิดหลอดยูวีให้พลังงานกระตุ้นแก๊สไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุ เพื่อให้ไททาเนียผลิตตัวออกซิไดซ์เข้าทำปฏิกิริยากับฟีนอลที่อยู่ในน้ำ แต่จากความชันของกราฟที่แสดงอัตราการลดลงของฟีนอลในน้ำในช่วงก่อนและหลังเปิดหลอดฉายแสงยูวีค่อนข้างใกล้เคียงกันแสดงว่าการลดลงของฟีนอลเกิดจากการดูดซับเท่านั้น ในกรณีที่การลดลงของฟีนอลเกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสความชันของกราฟจะมีความชันมากขึ้นเพราะอัตราการลดลงของฟีนอลที่เร็วขึ้นกว่าเดิม จากภาพที่ 4.24 แสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วง 200-400 นาโนเมตรซึ่งเป็นแสงยูวีแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยมีลักษณะแถบการดูดกลืนแสงเหมือนเดิมแต่ลดลงตามเวลาซึ่งเกิดจากโมเลกุลของฟีนอลถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์และเกาะติดบริเวณโพรงของโซเดียมเอซีโอไลต์ และเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงแถบการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่เกิดการสลายตัวจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่ใส่ผงไททาเนีย 0.01 กรัม พร้อมฉายแสงยูวีดังแสดงผลในภาพที่ 4.27



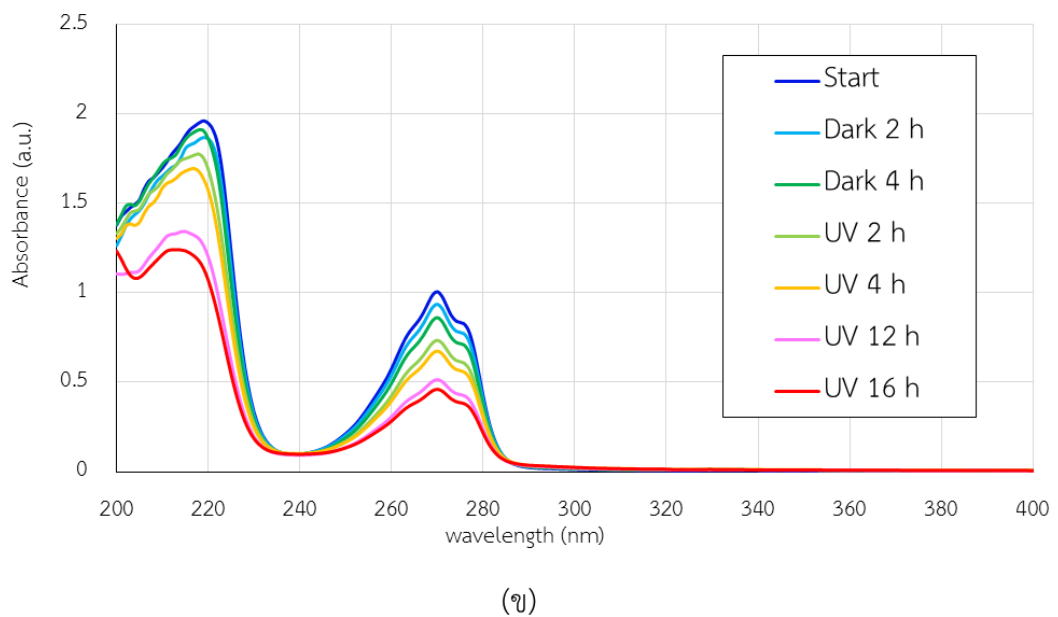
ภาพที่ 4.25 แผนภูมิแสดงการกำจัดฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ด้วยวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททานีที่ผ่านการเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

(ก) 50%P (ข) 30%P

UV absorption spectra of phenol (AC composite in dark)



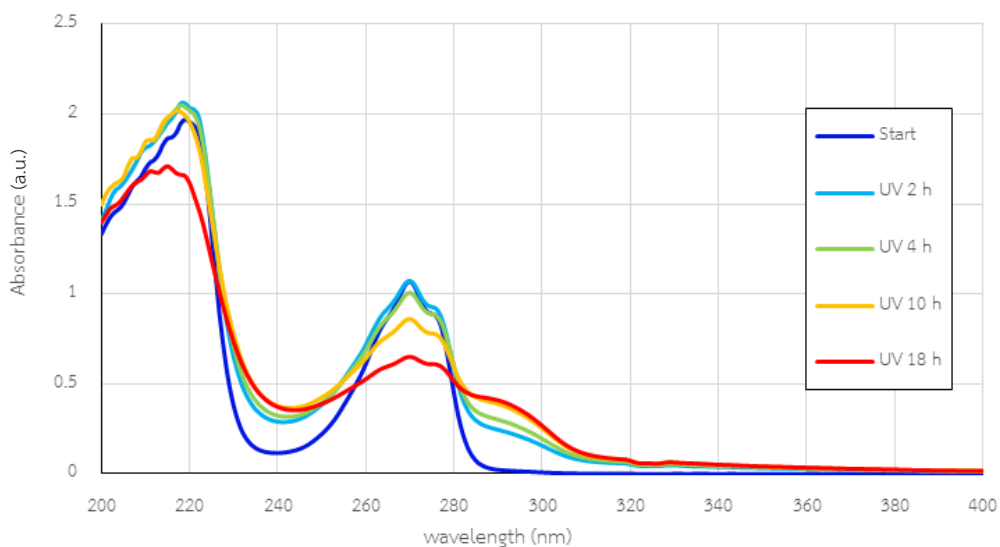
UV absorption spectra of phenol (AC composite under UV light)



ภาพที่ 4.26 แผนภาพแสดงแถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียสูตร 1AC:1Z 50%P ที่ผ่านการเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก) ในที่มืด และ ข) ฉายแสงยูวี

พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปไททาเนียถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัลทำหน้าที่ออกซิไดซ์ฟีนอลเกิดเป็นอนุพันธ์ของฟีนอลโดยช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาได้สารที่เป็นผลพลอยได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 270 นาโนเมตรในช่วง 2 ชั่วโมงแรกสูงขึ้นเล็กน้อยเพราะเกิดอนุพันธ์ของฟีนอลขึ้น [48] โดยอนุพันธ์ที่เกิดขึ้นเกิดจากการเข้าแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเกิดอนุพันธ์ของฟีนอล ได้แก่ ไฮโดรควิโนน (λ_{\max} ประมาณ 220, 290 นาโนเมตร) [49] เคทีคอล [50] และการดูดกลืนแสงมีลักษณะที่เปลี่ยนไปจากเดิมคือกว้างขึ้น และมีการดูดกลืนแสงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงความยาวคลื่นแสง 290 นาโนเมตร จากนั้นอนุพันธ์ฟีนอลที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อจนกลายเป็นกรดอินทรีย์ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจนกระทั่งสลายเหลือเพียงคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ [51] ค่าการดูดกลืนแสงยูวีจึงลดลงและมีแถบการดูดกลืนแสงกว้างมากขึ้นตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 270 นาโนเมตรในช่วงเวลาที่ 4 มีค่าต่ำกว่าช่วงเริ่มต้น และลดลงอีกเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง

UV absorption spectra of phenol (0.01 g P25 under UV light)



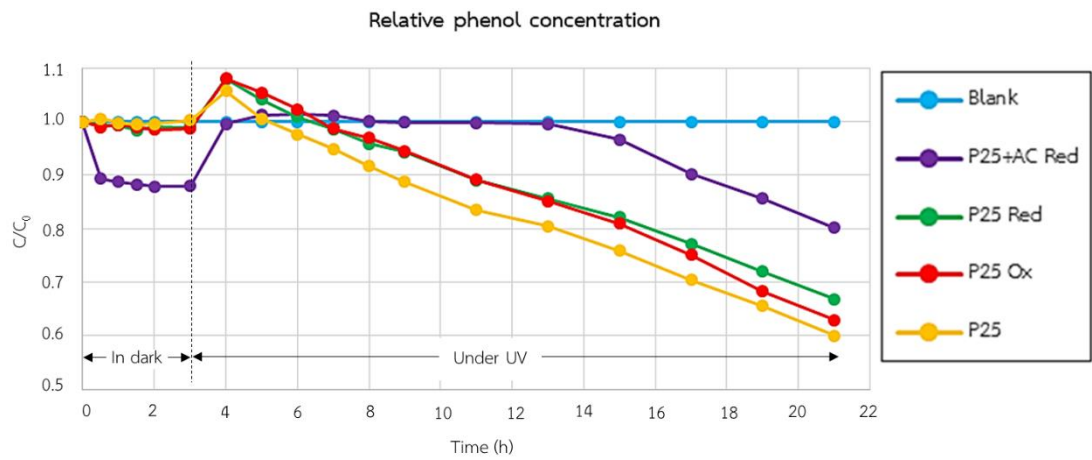
ภาพที่ 4.27 แผนภาพแสดงแถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้านส่วน ถูกกำจัดด้วยผงไททาเนีย P25 0.01 กรัม

4.8 ผลการนำผงไททาเนีย P25 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาใช้กำจัดฟีนอล

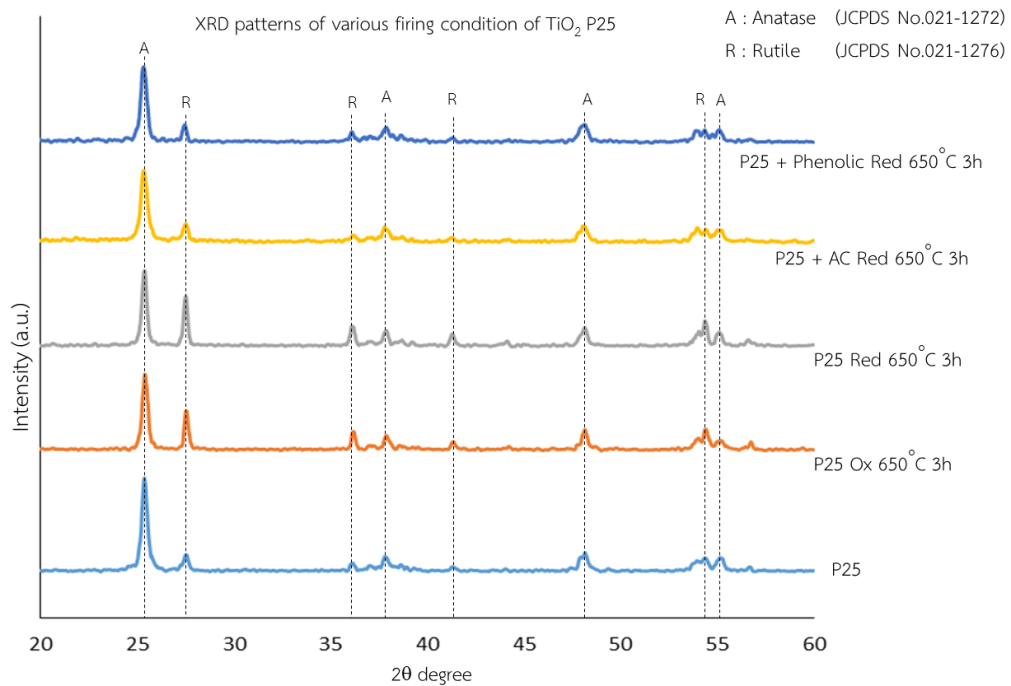
เนื่องจากผลการกำจัดฟีนอลโดยใช้วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียแสดงความสามารถในการกำจัดฟีนอลด้วยการดูดซับเพียงอย่างเดียวเท่านั้นจึงตรวจสอบสมบัติของไททาเนีย (P25) ที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การเผาที่ 650 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงในบรรยากาศออกซิเดชัน, ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน และผสมกับถ่านกัมมันต์แล้วเผาในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน พบว่าความสามารถในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของฟีนอลแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.28 โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟีนอลในระยะเวลา 3 ชั่วโมงแรกในที่มีด ความเข้มข้นของฟีนอลค่อนข้างคงที่ในชั่วโมงที่ 2 เนื่องจากผงไททาเนียมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยจึงดูดซับฟีนอลได้น้อย ความเข้มข้นของฟีนอลจึงค่อนข้างคงที่ในขณะที่ P25 ที่ผสมถ่านกัมมันต์แล้วเผาในบรรยากาศรีดักชัน 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงสามารถลดความเข้มข้นของฟีนอลได้ดีเนื่องจากฟีนอลถูกดูดซับเข้าไปในโพรงของถ่านกัมมันต์จนเต็มและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป แต่เมื่อฉายแสงยูวีพบว่าใน 1 ชั่วโมงแรกการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้นเกิดการการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟีนอลเกิดเป็นอนุพันธ์อื่นขึ้น จากนั้นจึงเกิดการย่อยสลายต่อทำลายโครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติกจึงทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง โดยไททาเนีย P25 เร่งให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ ไททาเนียที่เผาในบรรยากาศออกซิเดชัน และ รีดักชันตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไททาเนียที่ผ่านการเผาที่ 650 องศาเซลเซียสเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสไปเป็นรูไทล์บางส่วนซึ่งเป็นเฟสที่มีสมบัติโฟโตคะตะลิสต์ดีกว่า [24] ดังแสดงเฟสองค์ประกอบในภาพที่ 4.29 ส่วนไททาเนียที่ผสมถ่านกัมมันต์เผาในบรรยากาศรีดักชันมีการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของฟีนอลที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไททาเนียที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนชนิดอื่น

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงแถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ใส่ผงไททาเนีย P25 ผสมถ่านกัมมันต์เผาในบรรยากาศรีดักชันดังแสดงใน

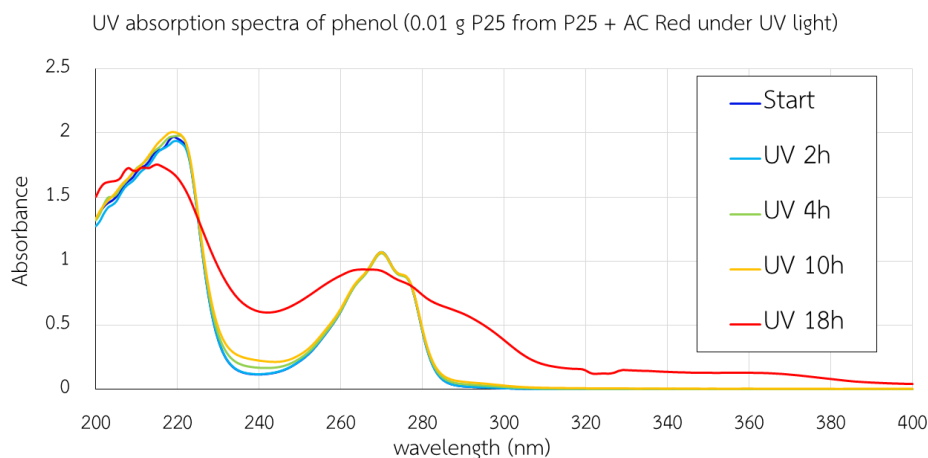
ภาพที่ 4.30 พบว่าในช่วงแรกที่ฉายแสงยูวีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแถบการดูดกลืนแสงแสดงว่าไม่เกิดสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์กับฟีนอลจนกระทั่งเวลาผ่านไปกว่าหลายชั่วโมงจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดูดกลืนแสงยูวี



ภาพที่ 4.28 แผนภูมิแสดงการสลายตัวของฟีนอลในน้ำเมื่อฉายแสงยูวี โดยใส่ผงไททาเนีย 0.01 กรัม ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.29 เฟสองค์ประกอบของไททาเนีย P25 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.30 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 ส่วนในน้ำล้าน ส่วนถูกกำจัดด้วยผงไททานเนียม P25 ผสมกับถ่านกัมมันต์เผาในบรรยากาศรีดักชันที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง โดยมีผงไททานเนียม P25 รวมอยู่ 0.01 กรัม

4.9 ศึกษาการขึ้นรูปและการใช้งานวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททานเนียม

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาไททานเนียมถูกลดประสิทธิภาพภายหลังการเผาถ่านกัมมันต์ในบรรยากาศรีดักชันจึงใช้ดินเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มความแข็งแรงหลังเผาทดแทนฟีนอลิกรีซินเนื่องจากไม่มีความจำเป็นที่จะใช้ฟีนอลิกรีซินเพื่อเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคของถ่านกัมมันต์และเพิ่มปริมาณคาร์บอนภายในเนื้อวัสดุ

4.9.1 การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของดินดำสุราษฎร์ธานีต่อซีโอไลต์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดและความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาสำหรับสูตรดินดำสุราษฎร์ธานีผสมซีโอไลต์

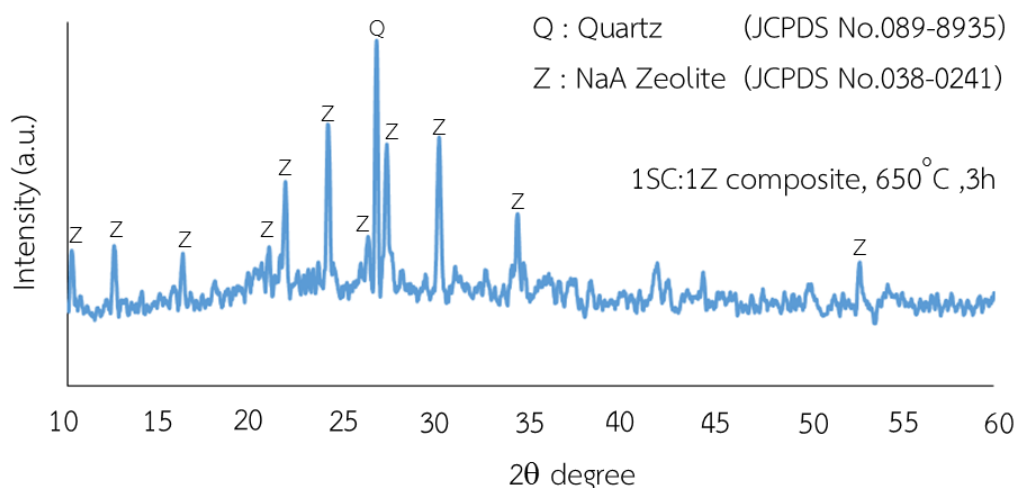
จากการผสมปรับสัดส่วนระหว่างดินดำสุราษฎร์ธานีกับโซเดียมเอซีโอไลต์ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เนื่องจากเนื้อดินดำมีความเหนียวจึงแสดงสมบัติความเป็นพลาสติกที่ดีส่งผลให้การขึ้นรูปด้วยการอัดรีดทำได้ง่ายแต่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อวัสดุผสมที่ผ่านการนวดกับตัวเชื่อมประสานอินทรีย์แล้วหมักทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง พบว่าสูตรที่มีซีโอไลต์มากกว่ามีความแข็งแรงของเนื้อวัสดุขณะนวดมากกว่าส่งผลให้ลักษณะเนื้อวัสดุที่นวดก่อนการอัดรีดขึ้นรูปแตกต่างกันขึ้นกับปริมาณดินดำสุราษฎร์ธานีที่ผสมในแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.6 ผลการผสมผงวัตถุกับตัวประสานอินทรีย์และการทดสอบความแข็งแรงเบื้องต้นของชิ้นงานหลังเผา

ดินดำสุราษฎร์ธานี : ซีโอไลต์	การนวดและการอัด รีดขึ้นรูป	ทดลองจุ่มในน้ำหลังเผา
1SC:1Z	นวดง่ายที่สุด ขึ้นรูป และคงรูปอยู่ได้	ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้ ดูดน้ำอย่างรวดเร็ว
1SC:2Z	นวดง่ายปานกลาง ขึ้นรูปและคงรูปอยู่ได้	ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้ ดูดน้ำอย่างรวดเร็ว
1SC:3Z	นวดง่าย ขึ้นรูปและ คงรูปอยู่ได้	ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้ ดูดน้ำอย่างรวดเร็ว

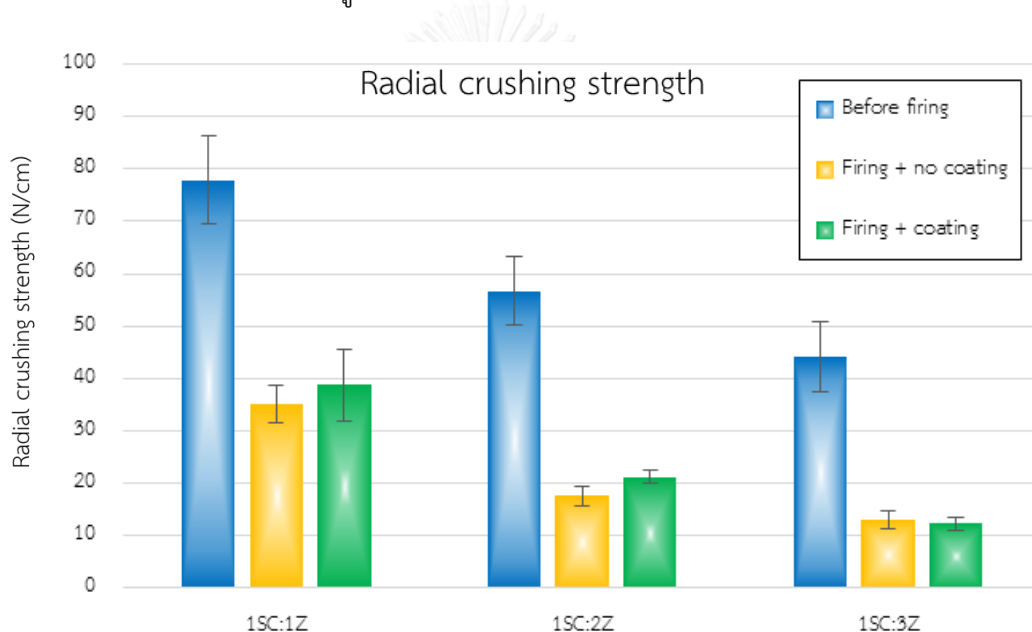
เมื่อนำวัสดุที่ขึ้นรูปได้ไปเผาที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมงและพิสูจน์ทราบเฟสองค์ประกอบจากภาพที่ 4.31 พบว่ามีโซเดียมเอซีโอไลต์และเหลือควอตซ์จากดิน โดยเคโอลินันต์หายไปหลังเผาเนื่องจากเปลี่ยนเฟสไปเป็นเมทาเคโอลินซึ่งเป็นเฟสที่เป็นอสังฐานจึงไม่ปรากฏพิกในเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรม [52]

XRD pattern of Suratthani ball clay/zeolite composite (1SC:1Z)



ภาพที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททานีเยาเผา 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียก่อนและหลังเผาที่ขึ้นรูปได้ จากค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างที่วัดได้ดังภาพที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าวัสดุหลังเผามีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากก่อนเผาวัสดุมีสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินดำสุราษฎร์ธานีและสารเชื่อมประสานอินทรีย์ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ วัสดุจึงมีความยืดหยุ่นมากกว่าและสามารถรับแรงได้มากกว่าวัสดุหลังเผา ก่อนจะเสีรูปร่างและแตกหักในที่สุด นอกจากนี้เคโอลินต์ที่เปลี่ยนเฟสไปเป็นเมทาเคโอลินซึ่งเป็นอสัณฐานยังส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงอีกเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุหลังเผาที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยไททาเนียพบว่าวัสดุมีความแข็งแรงใกล้เคียงกันจึงสรุปได้ว่าการเคลือบไททาเนียไม่มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปและเผา

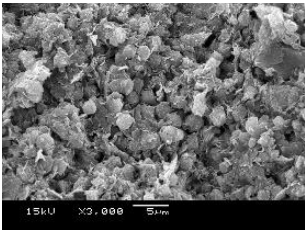
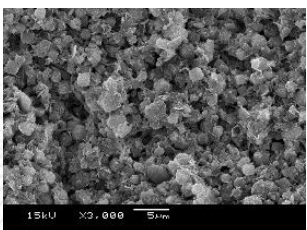
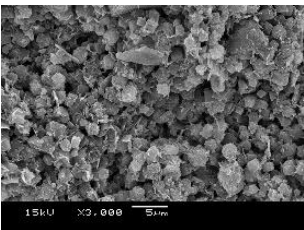
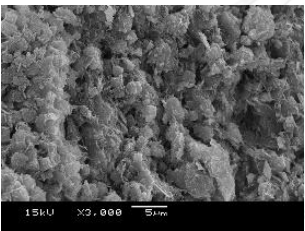
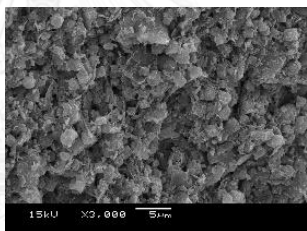
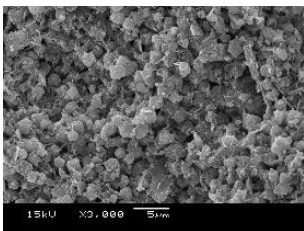


ภาพที่ 4.32 แผนภูมิแสดงค่าความต้านทานกำลังอัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียก่อนและหลังเผา

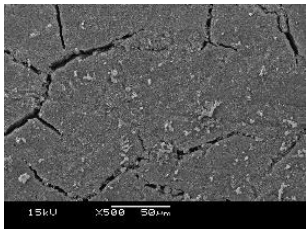
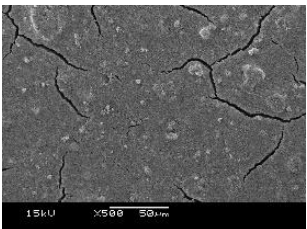
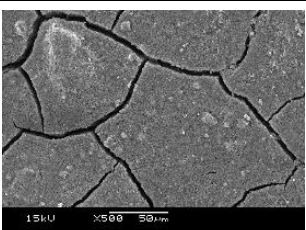
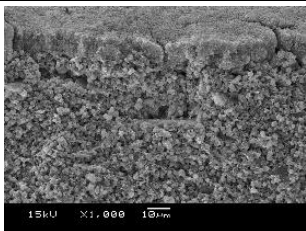
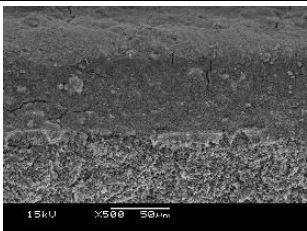
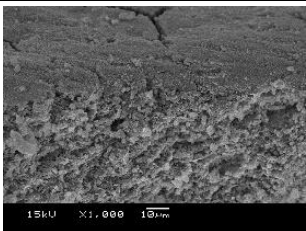
จากโครงสร้างทางจุลภาคที่แสดงในตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณโซเดียมเอซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นจากสูตร 1SC:1Z, 1SC:2Z และ 1SC:3Z ตามลำดับโดยอนุภาคของดินดำสุราษฎร์ธานีซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางมีความเหนียวประกอกับสารเชื่อมประสานอินทรีย์ทำหน้าที่เชื่อมอนุภาคให้ติดอยู่ด้วยกันก่อนเผา เนื้อวัสดุหลังเผาพบอนุภาคของเมทาเคโอลินซึ่งไม่เป็นผลึกมีลักษณะเป็นเนื้อวัสดุเชื่อมต่อกันโดยล้อมรอบผลึกโซเดียมเอซีโอไลต์อยู่ ทำให้เนื้อวัสดุขุยมากขึ้นสังเกตลักษณะของเมทาเคโอลินได้ชัดที่สุดในสูตร 1SC:1Z เนื่องจากมีเนื้อดินมากที่สุดและพบเมทาเคโอลินได้น้อยลงในสูตร 1SC:2Z และ 1SC:3Z ตามลำดับแต่จะเห็นลักษณะผลึกของโซเดียมเอซีโอไลต์ทรงลูกบาศก์ก็ได้ชัดเจน

ขึ้น เมื่อพิจารณาการเคลือบติดของไททาเนียลงบนผิววัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าการเคลือบติดไททาเนียค่อนข้างดี ได้ชั้นไททาเนียหนาประมาณ 10 ไมครอนขึ้นไป แต่เนื่องจากชั้นเคลือบไททาเนียที่หนาขึ้นทำให้เกิดรอยแตกของชั้นไททาเนียขึ้นบางส่วนที่บริเวณผิวหน้าของชั้นไททาเนีย

ตารางที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สูตร	1SC:1Z	1SC:2Z	1SC:3Z
เนื้อวัสดุ ก่อนเผา			
เนื้อวัสดุ หลังเผา			

ตารางที่ 4.8 ลักษณะผิวของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สูตร	1SC:1Z	1SC:2Z	1SC:3Z
ลักษณะผิว เคลือบ			
ภาค ตัดขวาง			

จากตารางที่ 4.9 การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียหลังเผา พบว่าสูตร 1SC:1Z, 1SC:2Z และ 1SC:3Z มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดไปจนถึงน้อยที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมีสัดส่วนของสารอินทรีย์ในดินดำมากกว่าซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของดินในสูตร 1SC:1Z ที่สูงกว่าสูตร 1SC:3Z โดยสารอินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนสามารถถูกออกซิเจนออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซ ส่งผลให้วัสดุมีน้ำหนักหลังเผาลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของสูตรที่มีดินเป็นองค์ประกอบมาก พบว่ามีความหนาแน่นมากกว่าเนื่องจากอนุภาคของดินที่ถูกเผาเกิดการเชื่อมกันทำให้เนื้อวัสดุมีความหนาแน่นมากขึ้นซึ่งผูกพันกับค่าความพรุนตัวที่ลดลง และเมื่อความพรุนตัวลดลงจึงสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำที่ลดลงตามลำดับ

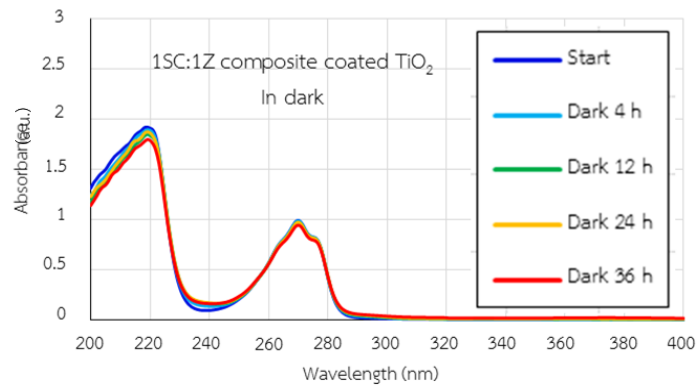
ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียหลังเผา 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง

ดินดำสุราษฎร์ธานี : โซเดียมเอซีโอไลต์	การสูญเสียน้ำหนักหลัง เผา (%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความพรุนตัว (%)
1SC:1Z	30.20 (± 0.91)	1.41 (± 0.01)	27.36 (± 0.54)	38.54 (± 0.49)
1SC:2Z	27.10 (± 0.56)	1.34 (± 0.01)	29.99 (± 0.35)	40.15 (± 0.31)
1SC:3Z	19.60 (± 0.52)	1.21 (± 0.01)	36.27 (± 0.77)	43.74 (± 0.62)

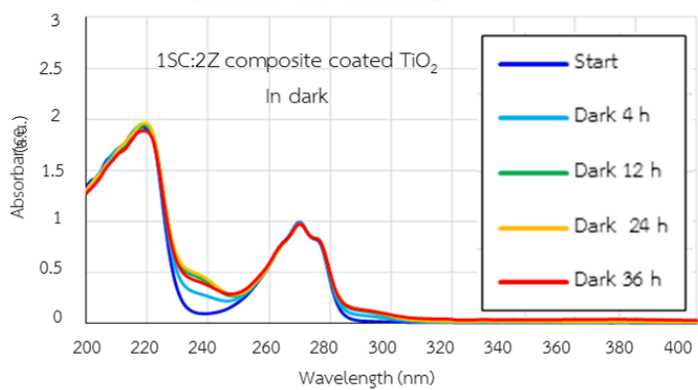
4.9.2 ผลการใช้วัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียกำจัดฟีนอล

หลังจากจุ่มชิ้นวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียลงในน้ำฟีนอลพบว่าเกิดฟองอากาศออกมาจากชิ้นงานแสดงว่าเกิดการดูดซึมน้ำเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุ แต่จากค่าการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่จุ่มวัสดุเชิงประกอบพบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ 270 นาโนเมตรใกล้เคียงกับค่าเดิมเมื่อเวลาผ่านไป 36 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.33 ก) สังเกตได้ว่าแม้จุ่มวัสดุเชิงประกอบในที่มีแต่แถบการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลาเท่ากันมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวัสดุเชิงประกอบมีส่วนประกอบของซีโอไลต์มากขึ้นแสดงว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโปรตอนของฟีนอลบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในซีโอไลต์เกิดเป็นโซเดียมฟีนอกไซด์ โดยสามารถสังเกตค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 235 และ 290 นาโนเมตรที่เกิดขึ้นสำหรับสูตร 1SC:3Z ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของโซเดียมฟีนอกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 4.33 ข) และ ค) ภาพที่ 4.34 ซึ่งเห็นได้

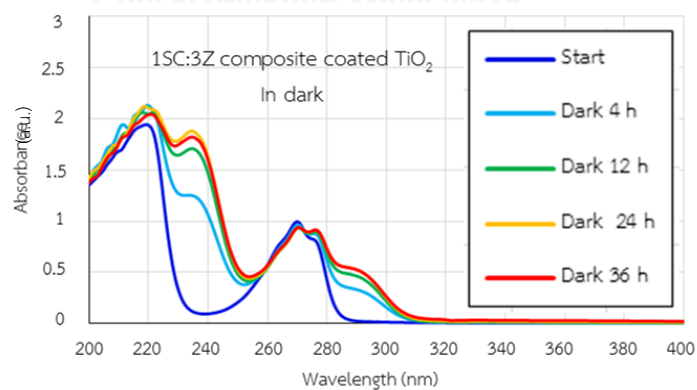
ชัดเจนเนื่องจากสูตร 1SC:3Z มีโซเดียมไอออนอยู่มากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอื่น โดยแถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟีนอลและฟีนอกไซด์แสดงในภาพที่ 4.34



(ก)



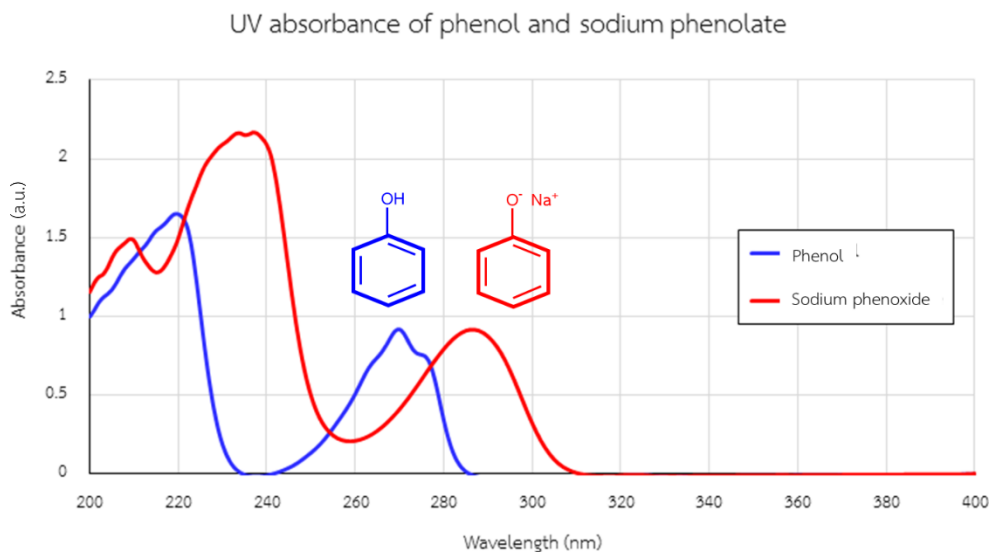
(ข)



(ค)

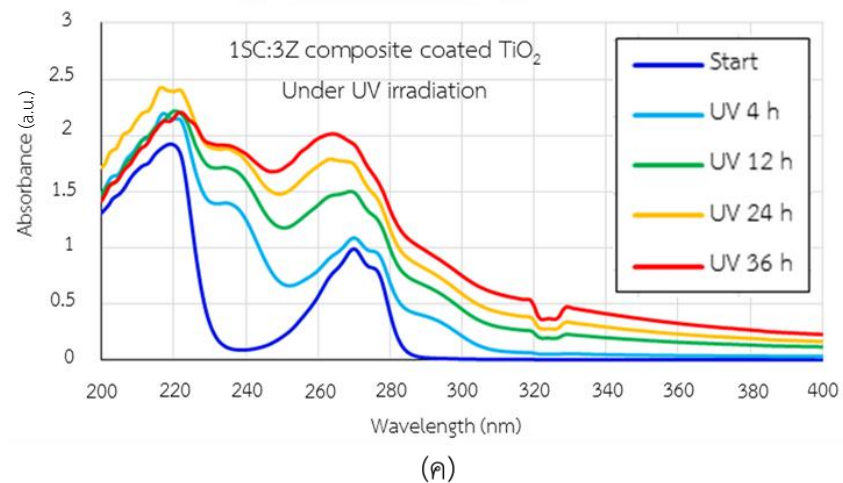
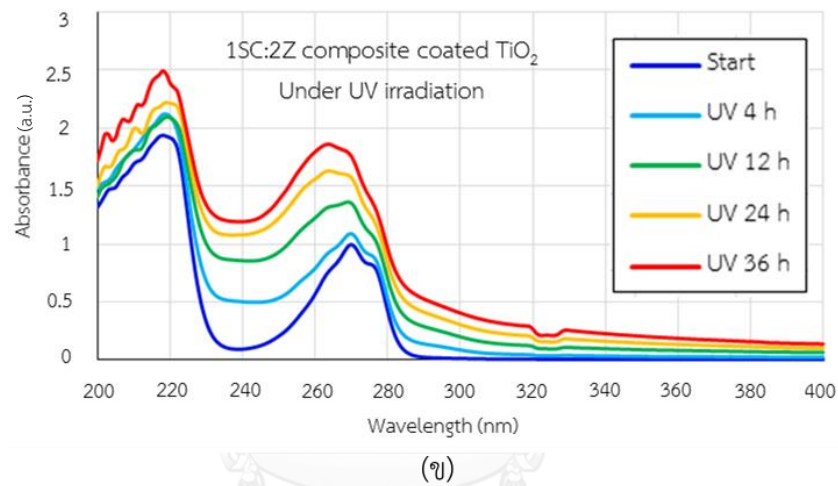
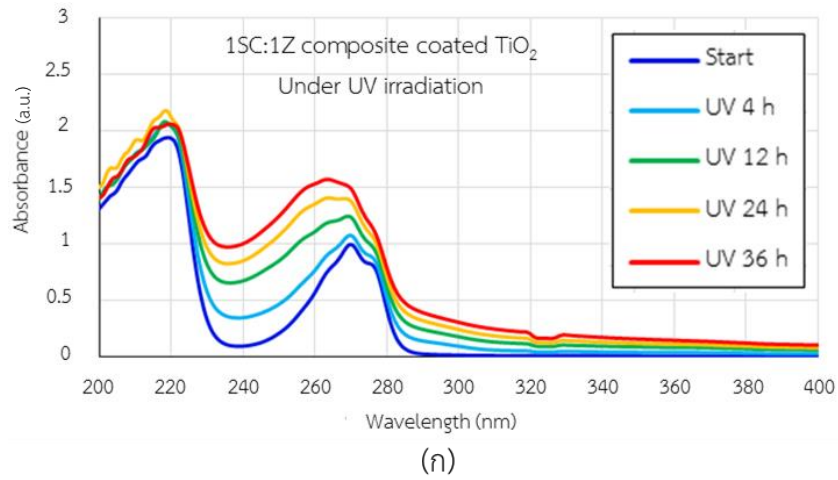
ภาพที่ 4.33 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลในน้ำเมื่อจุ่มวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียในที่มีด โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินดำสุราษฎร์ธานี:โซเดียม

เอซีโอไลต์เป็น ก) 1:1 ข) 1:2 และ ค) 1:3



ภาพที่ 4.34 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของสารละลายฟีนอลที่เปลี่ยนไปเมื่ออยู่ในรูปของโซเดียมฟีนอกไซด์

จากนั้นจึงทำการทดลองเปิดแสงยูวีเพื่อกระตุ้นให้ไททาเนียสามารถทำงานเป็นโฟโตคะตะลิสต์ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลเปลี่ยนไปดังภาพที่ 4.35 โดยลักษณะแถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่จุ่มด้วยวัสดุเชิงประกอบสูตร 1SC:1Z มีลักษณะแถบการดูดกลืนที่กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับชุดทำการทดลองที่ไม่ได้ฉายแสงยูวีเนื่องจากไททาเนียที่ถูกเคลือบอยู่บนผิววัสดุถูกกระตุ้นและช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของฟีนอลและโซเดียมฟีนอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงที่ต่างจากเดิม ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างขึ้น ลักษณะแถบการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นทุก ๆ ค่าความยาวคลื่นแสงเมื่อฉายแสงยูวีนานขึ้นเป็นตัวชี้วัดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากขึ้นด้วย ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปบริเวณที่มีความยาวคลื่นลดลงเนื่องจากสารอินทรีย์ที่ได้จากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ให้สีน้ำตาลส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเกิดการเปลี่ยนแปลงไป [48] และเมื่อเทียบกับสูตรที่มีโซเดียมเอซีโอไลต์มากกว่าคือ 1SC:2Z พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมากขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดสำหรับสูตร 1SC:3Z ซึ่งมีโซเดียมเอซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบในวัสดุมากที่สุดจึงสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบโซเดียมเอซีโอไลต์/ไททาเนียมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้แสงยูวีได้ดีขึ้น

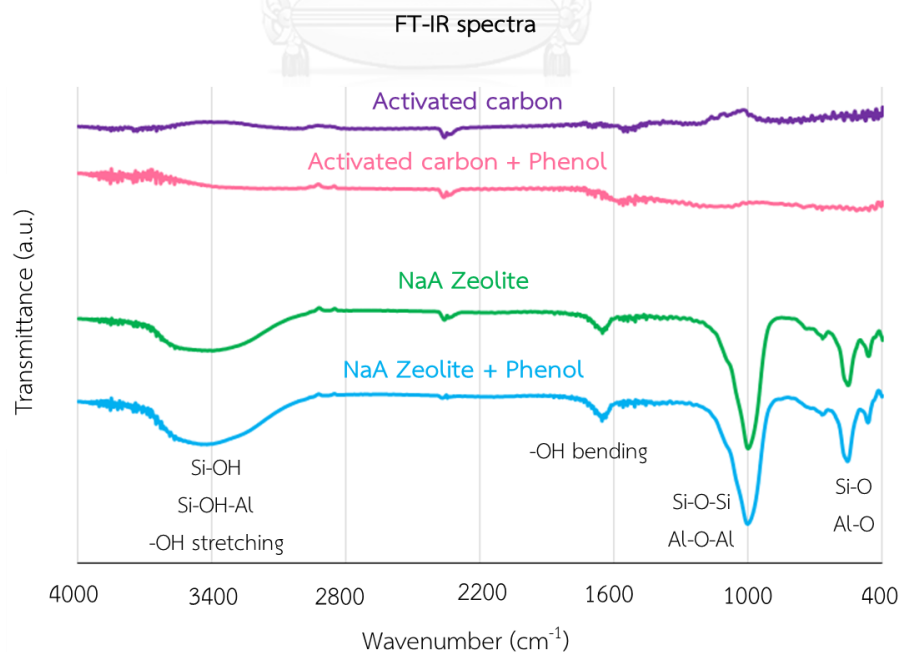


ภาพที่ 4.35 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลในน้ำเมื่อจุ่มวัสดุเชิงประกอบดินดำ
สุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียภายใต้แสงยูวี โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินดำสุราษฎร์ธานี:

โซเดียมเอซีโอไลต์เป็น ก) 1:1 ข) 1:2 และ ค) 1:3

4.10 ผลการวิเคราะห์การดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ด้วย FT-IR Spectroscopy

จากการวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงอินฟราเรดพบว่าภายหลังการดูดซับฟีนอลบนถ่านกัมมันต์และโซเดียมเอซีโอไลต์ ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดูดซับแสงในช่วงอินฟราเรดดังแสดงในภาพที่ 4.36 เนื่องจากฟีนอลที่ถูกดูดซับอยู่ในถ่านกัมมันต์จะติดอยู่ในโพรงขนาดเล็กซึ่งอยู่ลึกในอนุภาคของถ่านกัมมันต์ การส่องผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดจึงไม่สามารถส่องผ่านโมเลกุลของฟีนอลที่ถูกหุ้มห่อด้วยถ่านกัมมันต์ที่เป็นอนุภาคทึบแสงสีดำได้ ส่วนในโพรงขนาดใหญ่ของถ่านกัมมันต์เมื่อน้ำแห้งไปฟีนอลซึ่งเป็นสารระเหยง่ายสามารถระเหยออกไปจากโพรงขนาดใหญ่เนื่องจากไม่มีแรงดูดซับฟีนอลได้มากพอ สำหรับโซเดียมเอซีโอไลต์ซึ่งมีโพรงขนาดเล็กดังนั้นการดูดซับฟีนอลจึงเกิดการดูดซับที่บริเวณผิวของผลึก ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของซีโอไลต์ได้ ดังนั้นการดูดซับฟีนอลจึงเกิดได้น้อยเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีการกระจายตัวของรูพรุนหลายขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง แต่แรงดึงดูดระหว่างสารประกอบฟีนอลบนผิวซีโอไลต์เอเป็นการดูดซับด้วยแรงอ่อน ๆ ระหว่างประจุของโซเดียมฟีนอกไซด์ หรือ โปรตอนของฟีนอลตำแหน่งไฮดรอกซิลกับผิวของซีโอไลต์บริเวณอะลูมินาซึ่งมีความเป็นลบอยู่ ฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ที่ระเหยได้เมื่อได้รับความร้อนจึงระเหยออกไปจากผิวของซีโอไลต์ได้ง่ายจึงสังเกตได้เพียงการสั่นของพันธะต่าง ๆ ที่เป็นโครงสร้างของซีโอไลต์หลังการทดลองจุ่มผงซีโอไลต์ในน้ำ



ภาพที่ 4.36 การส่องผ่านแสงอินฟราเรดของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังดูดซับฟีนอล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเตรียมวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียสำหรับการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์จากอุตสาหกรรมจากการผสมวัสดุขี้ถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดแล้วเผา จากนั้นวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียด้วยวิธีการอัดรีดได้จากการใช้สารอินทรีย์เชื่อมประสานและฟีนอลิกเรซินเพื่อคงความแข็งแรงของวัสดุหลังเผา

5.1.2 จากการศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อโซเดียมเอซีโอไลต์พบว่าสัดส่วน 1:3 ให้ความแข็งแรงสูงสุดแต่ขึ้นรูปยาก ในขณะที่ 1:1 ให้ความแข็งแรงที่ดีและขึ้นรูปได้ง่ายกว่า

5.1.3 จากการศึกษาปริมาณของฟีนอลิกเรซินพบว่า ฟีนอลิกเรซินร้อยละ 30 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุให้ทนทานต่อการแช่วัสดุในน้ำ และที่ร้อยละ 50 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้มากที่สุด

5.1.4 จากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาวัสดุพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

5.1.5 จากการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการเผาวัสดุพบว่า การเผาระยะเวลา 3 ชั่วโมงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้มากที่สุด

5.1.6 จากการศึกษาปริมาณและวิธีการเคลือบติดไททาเนียพบว่า การเคลือบไททาเนียร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในน้ำด้วยวิธีการพ่นเคลือบได้ผิววัสดุที่เรียบและมีการเคลือบติดของไททาเนียสม่ำเสมอที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีจุ่ม และทา

5.1.7 จากการทดลองขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอไลต์/ไททาเนียด้วยวิธีการอัดรีด พบว่าสูตรที่มีดินเป็นองค์ประกอบมากที่สุดให้ความแข็งแรงสูงสุดโดยก่อนและหลังการเคลือบด้วยไททาเนียวัสดุมีความแข็งแรงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.8 จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟีนอลในน้ำพบว่าวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียสามารถดูดซับฟีนอลได้แต่ไม่สามารถเร่งให้เกิดการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้จากรูปแบบการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีที่มีลักษณะเดิม แต่วัสดุเชิงประกอบ

ดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอโลต์/ไททาเนียสามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการทำงานของไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุได้ภายใต้แสงยูวีจากลักษณะการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อฉายแสงยูวีนานขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาต่อเพื่อให้งานดียิ่งขึ้นได้

5.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไททาเนียที่เคลือบติดผิวถ่านกัมมันต์หรือวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงเมื่อเผาในบรรยากาศรีดักชัน 650 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อความสามารถในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ของไททาเนีย

5.2.2 แยกสารอนุพันธ์และสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการการแตกสลายโมเลกุลของฟินอลด้วยวัสดุเชิงประกอบดินดำสุราษฎร์ธานี/ซีโอโลต์/ไททาเนียด้วยเทคนิค HPLC หรือ GC ที่ต่อกับตัวตรวจวัด UV detector หรือ Mass spectrometer เพื่อวิเคราะห์ชนิดของสาร และกลไกการเกิดปฏิกิริยาการแตกสลายฟินอล

5.2.3 ปรับเปลี่ยนขนาด ความหนา และ ปริมาณพอลิยูรีเทนโพนเพื่อปรับระดับการลอยตัวของวัสดุเชิงประกอบในน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งการย่อยสลายฟินอลของไททาเนียภายใต้แสงยูวี

รายการอ้างอิง

- [1] W. Bruce, M. Meek, R. Newhook. **Phenol: Hazard Characterization and Exposure–Response Analysis.** Journal of Environmental Science and Health, Part C. 19(1) (2001): 305-324.
- [2] W. M. A. W. Daud, W. S. W. Ali. **Comparison on pore development of activated carbon produced from palm shell and coconut shell.** Bioresource Technology. 93(1) (2004): 63-69.
- [3] V. J. Inglezakis. **The concept of “capacity” in zeolite ion-exchange systems.** Journal of Colloid and Interface Science. 281(1) (2005): 68-79.
- [4] M. Matsuoka, M. Kitano, M. Takeuchi, M. Anpo, J. M. Thomas. **Photocatalytic water splitting on visible light-responsive TiO₂ thin films prepared by a RF magnetron sputtering deposition method.** Topics in catalysis. 35(3-4) (2005): 305-310.
- [5] ScienceLab.com. **Materials Safety Data Sheets Phenol MSDS.** Available from: <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9926463> [2015,18/11]
- [6] SIGMA-ALDRICH. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยฟีนอล. Available from: <http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst108-95-2.html> [2015,18/11]
- [7] A. S. Lindsey, H. Jeskey. **The Kolbe-schmitt reaction.** Chemical Reviews. 57(4) (1957): 583-620.
- [8] C. Namasivayam, D. Sangeetha. **Recycling of agricultural solid waste, coir pith: Removal of anions, heavy metals, organics and dyes from water by adsorption onto ZnCl₂ activated coir pith carbon.** Journal of Hazardous Materials. 135(1–3) (2006): 449-452.
- [9] เสถียร วีระวงศ์. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน. 1996. Available from: <http://www.diw.go.th/hawk/law/water/law6.asp> [2015,18/11]
- [10] S. J. Kulkarni, D. J. P. Kaware. **Review on research for removal of phenol from wastewater.** International Journal of Scientific and Research Publications. 3(4) (2013): 1-4.

- [11] Y. Wu, K. E. Taylor, N. Biswas, J. K. Bewtra. **Comparison of additives in the removal of phenolic compounds by peroxidase-catalyzed polymerization.** *Water Research*. 31(11) (1997): 2699-2704.
- [12] O. Abdelwahab, N. Amin, E. Z. El-Ashtouky. **Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater.** *Journal of Hazardous Materials*. 163(2) (2009): 711-716.
- [13] N. Rao, J. R. Singh, R. Misra, T. Nandy. **Liquid-liquid extraction of phenol from simulated sebacic acid wastewater.** *Journal of Science Industrial Research*. 68((2009): 823-828.
- [14] D. Sudipta, M. Somnath. **Kinetic studies for an aerobic packed bed biofilm reactor for treatment of organic wastewater with and without phenol.** *Journal of Water Resource and Protection*. 2010((2010):
- [15] J. Zhao, C. Chen, W. Ma. **Photocatalytic degradation of organic pollutants under visible light irradiation.** *Topics in catalysis*. 35(3-4) (2005): 269-278.
- [16] A. Babuponnusami, K. Muthukumar. **Advanced oxidation of phenol: A comparison between Fenton, electro-Fenton, sono-electro-Fenton and photo-electro-Fenton processes.** *Chemical Engineering Journal*. 183((2012): 1-9.
- [17] P. M. Inc. **Photocatalyst Reaction.** 2 0 1 2 . Available from: http://photocatalyst.co.jp/English/?page_id=19 [2015,18/11]
- [18] V. J. Babu, S. Vempati, T. Uyar, S. Ramakrishna. **Review of one-dimensional and two-dimensional nanostructured materials for hydrogen generation.** *Physical Chemistry Chemical Physics*. 17(5) (2015): 2960-2986.
- [19] U. Gaya. **Heterogeneous Photocatalysis Using Inorganic Semiconductor Solids.** Springer Netherlands, 2013.
- [20] A. Ajmal, I. Majeed, R. N. Malik, H. Idriss, M. A. Nadeem. **Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview.** *RSC Advances*. 4(70) (2014): 37003-37026.
- [21] I. Raisz. **Process for preconditioning drinking water.** EP2209745 A1, USA, 2010.

- [22] J. Zhang, P. Zhou, J. Liu, J. Yu. **New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO₂**. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 16(38) (2014): 20382-20386.
- [23] B. Neppolian, H. Choi, S. Sakthivel, B. Arabindoo, V. Murugesan. **Solar/UV-induced photocatalytic degradation of three commercial textile dyes**. *Journal of hazardous materials*. 89(2) (2002): 303-317.
- [24] R. Kaplan, B. Erjavec, G. Dražić, J. Grdadolnik, A. Pintar. **Simple synthesis of anatase/rutile/brookite TiO₂ nanocomposite with superior mineralization potential for photocatalytic degradation of water pollutants**. *Applied Catalysis B: Environmental*. 181((2016): 465-474.
- [25] NANOSHEL. **P25 - Degussa - TiO₂**. Available from: <http://www.nanoshel.com/product/degussa-p25-tio2/> [2015,18/11]
- [26] Z. Guo, R. Ma, G. Li. **Degradation of phenol by nanomaterial TiO₂ in wastewater**. *Chemical Engineering Journal*. 119(1) (2006): 55-59.
- [27] F. Schüth, W. Schmidt. **Microporous and mesoporous materials**. *Advanced Engineering Materials*. 4(5) (2002): 269-279.
- [28] M. Ahmaruzzaman. **Adsorption of phenolic compounds on low-cost adsorbents: a review**. *Advances in Colloid and Interface Science*. 143(1) (2008): 48-67.
- [29] J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez-Polo, V. Gómez-Serrano, P. Alvarez, M. Alvim-Ferraz, J. Dias. **Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview**. *Journal of Hazardous Materials*. 187(1) (2011): 1-23.
- [30] P. Temyarasilp. **Preparation and Characterization of Activated Carbon from Dendrocalamus Asper Backer and Dendrocalamus Latiflorus**. Master's Degree, Chemistry Kasetsart University. 2008.
- [31] S. Mukherjee, S. Kumar, A. K. Misra, M. Fan. **Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal**. *Chemical Engineering Journal*. 129(1) (2007): 133-142.
- [32] S. M. Manocha, K. Patel, L. Manocha. **Development of carbon foam from phenolic resin via template route**. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 17(5) (2010): 338-342.

- [33] S. M. Auerbach, K. A. Carrado, P. K. Dutta. **Handbook of zeolite science and technology**. CRC press, 2003.
- [34] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง (Surface Chemistry and Catalysis). 2011.
- [35] Y. Zheng, X. Li, P. K. Dutta. **Exploitation of unique properties of zeolites in the development of gas sensors**. Sensors. 12(4) (2012): 5170-5194.
- [36] M. Khalid, G. Joly, A. Renaud, P. Magnoux. **Removal of phenol from water by adsorption using zeolites**. Industrial & engineering chemistry research. 43(17) (2004): 5275-5280.
- [37] B. Koubaissy, J. Toufaily, M. El-Murr, T. Jean Daou, H. Hafez, G. Joly, et al. **Adsorption kinetics and equilibrium of phenol drifts on three zeolites**. Open Engineering. 2(3) (2012): 435-444.
- [38] M. N. Chong, Z. Y. Tneu, P. E. Poh, B. Jin, R. Aryal. **Synthesis, characterisation and application of TiO₂ – zeolite nanocomposites for the advanced treatment of industrial dye wastewater**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 50((2015): 288-296.
- [39] H. S. N. Program. **Zeolite A structure**. Available from: <http://cnsi.ctrl.ucla.edu/nanoscience/pages/waterFilt> [2015,18/11]
- [40] S. Murad, W. Jia, M. Krishnamurthy. **Ion-exchange of monovalent and bivalent cations with NaA zeolite membranes: a molecular dynamics study**. Molecular Physics. 102(19-20) (2004): 2103-2112.
- [41] N. Sapawe, A. A. Jalil, S. Triwahyono, M. Shah, R. Jusoh, N. F. M. Salleh, et al. **Cost-effective microwave rapid synthesis of zeolite NaA for removal of methylene blue**. Chemical Engineering Journal. 229((2013): 388-398.
- [42] T. Tepamat. **Preparation and Characterization of Zeolite NaA and Activated Carbon Composite from Rice Husk Charcoal**. Master's Degree, Materials Science Chulalongkorn University. 2012.
- [43] W. Gosuphan. **Fabrication and Characterization of Cordierite Honeycomb Ceramic from Refractory Industrial Waste**. Master's Degree, Materials Science Chulalongkorn University. 2009.

- [44] H. N. Kim, S. K. Lee. **Temperature-induced amorphization of Na-zeolite A: A view from multi-nuclear high-resolution solid-state NMR.** American Mineralogist. 99(10) (2014): 1996-2007.
- [45] M. Tedetti, R. Sempéré. **Penetration of ultraviolet radiation in the marine environment. A review.** Photochemistry and Photobiology. 82(2) (2006): 389-397.
- [46] D. Swinehart. **The beer-lambert law.** Journal of chemical education. 39(7) (1962): 333.
- [47] Y. Komori, H. Enoto, R. Takenawa, S. Hayashi, Y. Sugahara, K. Kuroda. **Modification of the interlayer surface of kaolinite with methoxy groups.** Langmuir. 16(12) (2000): 5506-5508.
- [48] P. R. Lopes, R. N. Montagnolli, E. D. Bidoia. **Analytical methods in photoelectrochemical treatment of phenol.** Journal of the Brazilian Chemical Society. 22(9) (2011): 1758-1764.
- [49] T. Wilke, M. Schneider, K. Kleinermanns. **1, 4-Hydroquinone is a Hydrogen Reservoir for Fuel Cells and Recyclable via Photocatalytic Water Splitting.** Journal of Physical Chemistry. (2013):
- [50] H. S. Kibombo, R. Peng, S. Rasalingam, R. T. Koodali. **Versatility of heterogeneous photocatalysis: synthetic methodologies epitomizing the role of silica support in TiO₂ based mixed oxides.** Catalysis Science & Technology. 2(9) (2012): 1737-1766.
- [51] V. Augugliaro, L. Palmisano, A. Sclafani, C. Minero, E. Pelizzetti. **Photocatalytic degradation of phenol in aqueous titanium dioxide dispersions.** Toxicological & Environmental Chemistry. 16(2) (1988): 89-109.
- [52] J. Rocha, J. Klinowski, J. M. Adams. **Synthesis of zeolite Na-A from metakaolinite revisited.** Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions. 87(18) (1991): 3091-3097.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การทดสอบการกำจัดฟีนอลด้วยวัสดุเชิงประกอบ

1) วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค UV absorption spectroscopy โดยปรับความเข้มข้นของฟีนอลเป็น 10-300 ppm เลือกค่าการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมเพื่อทำกราฟมาตรฐาน และใช้ความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงที่เป็นเส้นตรงเพื่อทำการทดลอง

2) จุ่มชิ้นงานสูตรที่จะทำการทดสอบการกำจัดฟีนอล 5 ชิ้น ลงในสารละลายฟีนอลเข้มข้น 800 ส่วนในน้ำล้านส่วน ปริมาตร 4 ลิตร ปิดฝาและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 วัน เพื่อให้เกิดการดูดซับฟีนอลจนอิ่มตัว



ภาพที่ ก-1 วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียจุ่มในสารละลายฟีนอล 800 ส่วนในน้ำล้านส่วนปริมาตร 4 ลิตร

3) นำชิ้นงานที่ได้มาจุ่มในสารละลายฟีนอลเข้มข้นประมาณ 80 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 1.5 ลิตร ปิดฝาทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 วัน เพื่อให้เกิดการปลดปล่อยฟีนอลส่วนเกินออกมาสู่สารละลายที่มีปริมาณมากทำให้ความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และคงที่สมดุลไว้ที่ความเข้มข้นประมาณใกล้เคียง 80 ส่วนในล้านส่วน

4) นำชิ้นงาน 1 ชิ้นมาใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ในที่มีดเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง วัดปริมาณฟีนอลจากการดูดกลืนแสงสูงสุดของฟีนอลที่ 270 นาโนเมตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer (Perkins Elmer, Lambda35)

5) ฉายรังสียูวีจากหลอด 18 วัตต์ ห่างจากภาชนะปิกเกอร์ 5 เซนติเมตร โดยปล่อยให้ชิ้นงานที่ลอยอยู่บนผิวน้ำในปิกเกอร์ และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟินอลทุก ๆ ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาการลดลงของฟินอลในน้ำภายใต้แสงยูวี



Before UV irradiation

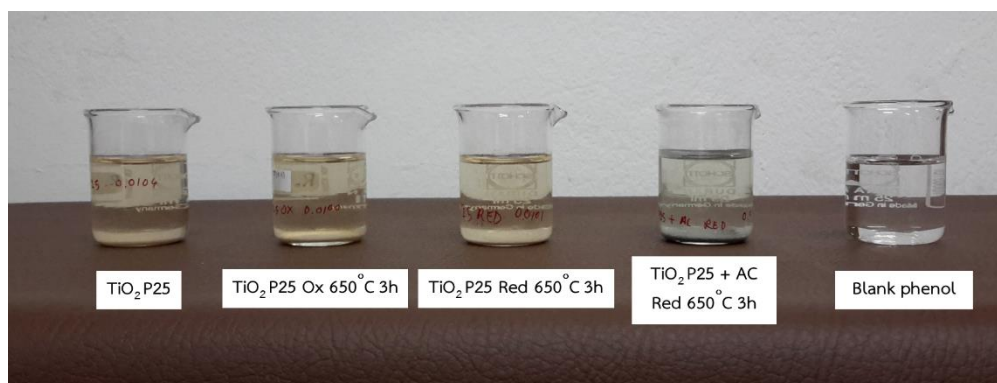
After UV irradiation

ภาพที่ ก-2 วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนียจุ่มในสารละลายฟินอล 80 ส่วนในน้ำล้านส่วนก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ฉายแสงยูวี

6) เพื่อตรวจสอบการเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของฟินอลด้วยไททาเนียโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวีเป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งการย่อยสลายฟินอลด้วยผงไททาเนียที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแตกต่างกันได้แก่

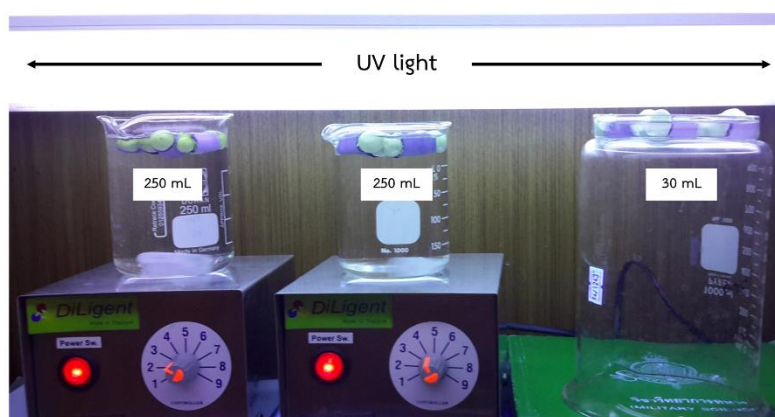
- TiO_2 P25
- TiO_2 P25 ที่เผาในบรรยากาศออกซิเดชันที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง
- TiO_2 P25 ที่เผาในบรรยากาศรีดิกชันที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง
- TiO_2 P25 ที่ผสมถ่านกัมมันต์แล้วเผาในบรรยากาศรีดิกชันที่ 650 องศาเซลเซียสนาน 3 ชั่วโมง

โดยทุกชุดใช้ไททาเนียน้ำหนัก 0.01 กรัม ในสารละลายฟินอล 80 ส่วนในน้ำล้านส่วนปริมาตร 30 มิลลิลิตร พบว่าชุดที่ใช้ไททาเนียเร่งการย่อยสลายฟินอลได้สารละลายใสสีน้ำตาล ในขณะที่ชุดที่ผสมถ่านกัมมันต์ให้สีน้ำตาลน้อยที่สุด และชุดที่เป็น Blank สารละลายยังคงใสไม่มีสีดังเดิม



ภาพที่ ก-3 สีของสารละลายฟีนอล 80 ส่วนในล้านส่วนปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่ใส่ตัวเร่งไททาเนียต่างชนิดกันภายหลังการฉายแสงยูวีนาน 18 ชั่วโมง

7) ทดลองเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปเมื่อใช้วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย 5 ชั้น ที่ผ่านกระบวนการในข้อ 2) และ 3) มาแล้วใช้กำจัดฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในล้านส่วนภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี นาน 5 ชั่วโมง โดยชุดแรกใช้ฟีนอลปริมาตร 250 มิลลิลิตร และชุดที่สองใช้ฟีนอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร พบว่าทั้งสองชุดการทดลองได้สารละลายใสไม่มีสีเช่นเดิม และมีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับค่าเดิมตลอดระยะเวลาการทดลอง จึงสรุปได้ว่าไททาเนียที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ไม่สามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันได้



ภาพที่ ก-4 ชุดทดลองเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปเมื่อใช้วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททาเนีย 5 ชั้นฉายแสงยูวีกำจัดฟีนอลความเข้มข้น 80 ส่วนในล้านส่วน

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ค่า 2θ , intensity และ hkl miller indices ของ NaA zeolite จาก JCPDS-International Center for Diffraction Data, PCPDFWIN หมายเลข 00-038-0241

Pattern : 00-038-0241		Radiation = 1.540600		Quality : High			
$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_{1.85}\text{O}_{7.7} \cdot 5.1\text{H}_2\text{O}$ $/\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.85\text{SiO}_2 \cdot 5.1\text{H}_2\text{O}$ Sodium Aluminum Silicate Hydrate <i>Also called: Zeolite A, (Na)</i>		2 θ	i	h	k	l	
		7.187	100	1	0	0	
		10.148	69	1	1	0	
		12.439	35	1	1	1	
		16.073	25	2	1	0	
		17.618	2	2	1	1	
		20.352	6	2	2	0	
		21.621	36	3	0	0	
		23.941	53	3	1	1	
		26.057	16	3	2	0	
		27.056	47	3	2	1	
		29.889	55	4	1	0	
		30.764	9	3	3	0	
		32.485	12	4	2	0	
		33.305	4	4	2	1	
		34.116	22	3	3	2	
		35.671	5	4	2	2	
		36.435	4	4	3	0	
		37.917	3	5	1	1	
		39.330	1	5	2	0	
		40.059	3	5	2	1	
		41.444	7	4	4	0	
		42.112	10	4	4	1	
		42.760	3	5	3	0	
		43.407	4	5	3	1	
		44.074	9	6	0	0	
		47.202	7	5	4	0	
		47.808	4	5	4	1	
		48.986	2	6	2	2	
		49.584	3	6	3	0	
		51.942	2	7	0	0	
		52.455	13	5	5	0	
		54.163	6	7	2	0	
		54.723	2	7	2	1	
		56.328	4	7	2	2	
		57.402	6	7	3	1	
		58.479	4	6	5	0	
		60.546	2	7	4	0	
		61.076	1	7	4	1	
		62.587	3	8	2	1	
		63.060	2	6	5	3	
		65.084	3	7	5	0	
		65.599	2	7	5	1	
		66.548	5	8	3	2	
		68.482	2	9	0	0	
		68.999	8	9	1	0	
Lattice : Cubic S.G. : (0) a = 12.32000		Mol. weight = 366.97 Volume [CD] = 1869.96 Dx = 0.326 Dm = 1.990					
Additional pattern: To replace 11-590. Data collection flag: Ambient.							
Milton, R., 2,882,243., U.S. Patent (1959)							
Radiation : CuK α Lambda : 1.54180 SS/FOM : F30= 89(0.008142)		Filter : Not specified d-sp : Diffractometer					

ตารางที่ ข-2 ค่า 2θ , intensity และ hkl miller indices ของ TiO_2 Anatase จาก JCPDS-International Center for Diffraction Data, PCPDFWIN หมายเลข 00-021-1272

Pattern : 00-021-1272		Radiation = 1.540600		Quality : High		
TiO ₂ Titanium Oxide Anatase, syn		2 θ	i	h	k	l
		25.281	100	1	0	1
		36.947	10	1	0	3
		37.801	20	0	0	4
		38.576	10	1	1	2
		48.050	35	2	0	0
		53.891	20	1	0	5
		55.062	20	2	1	1
		62.121	4	2	1	3
		62.690	14	2	0	4
		68.762	6	1	1	6
		70.311	6	2	2	0
		74.031	2	1	0	7
		75.032	10	2	1	5
		76.020	4	3	0	1
		80.727	2	0	0	8
		82.139	2	3	0	3
		82.662	6	2	2	4
		83.149	4	3	1	2
		93.221	2	2	1	7
		94.182	4	3	0	5
		95.143	4	3	2	1
		98.319	2	1	0	9
		99.804	2	2	0	8
		101.221	2	3	2	3
		107.448	4	3	1	6
		108.963	4	4	0	0
		112.841	2	3	0	7
		113.861	2	3	2	5
		114.909	2	4	1	1
		118.439	4	2	1	9
		120.104	2	2	2	8
		121.725	2	4	1	3
		122.336	2	4	0	4
		131.036	2	4	2	0
		135.998	2	3	2	7
		137.391	4	4	1	5
		143.888	2	3	0	9
		150.039	4	4	2	4
		152.634	2	0	0	12
Lattice : Body-centered tetragonal S.G. : I41/amd (141) a = 3.78520 c = 9.51390 Z = 4		Mol. weight = 79.90 Volume [CD] = 136.31 Dx = 3.893 V _{cor} = 3.30				
Color: Colorless Sample source or locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA. General comments: Anatase and another polymorph, brookite (orthorhombic), are converted to rutile (tetragonal) by heating above 700 C. General comments: Pattern reviewed by Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. Additional pattern: Validated by calculated pattern. Temperature of data collection: Pattern taken at 25 C. Additional pattern: See ICSD 9852 (PDF 71-1168). Data collection flag: Ambient.						
Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 82 (1969)						
Radiation :		Filter : Not specified				
SS/FOM : F30= 74(0.0116,35)		d-sp : Not given				

ตารางที่ ข-3 ค่า 2θ , intensity และ hkl miller indices ของ TiO_2 Rutile จาก JCPDS-International Center for Diffraction Data, PCPDFWIN หมายเลข 00-021-1276

Pattern : 00-021-1276		Radiation = 1.540600			Quality : High		
TiO ₂ Titanium Oxide Rutile, syn Also called: titania		2 θ	i	h	k	l	
		27.447	100	1	1	0	
		36.086	50	1	0	1	
		39.188	8	2	0	0	
		41.226	25	1	1	1	
		44.052	10	2	1	0	
		54.323	60	2	1	1	
		56.642	20	2	2	0	
		62.742	10	0	0	2	
		64.040	10	3	1	0	
		65.480	2	2	2	1	
		69.010	20	3	0	1	
		69.790	12	1	1	2	
		72.410	2	3	1	1	
		74.411	1	3	2	0	
		76.510	4	2	0	2	
		79.822	2	2	1	2	
		82.335	6	3	2	1	
		84.260	4	4	0	0	
		87.464	2	4	1	0	
		89.557	8	2	2	2	
		90.708	4	3	3	0	
		95.275	6	4	1	1	
		96.017	6	3	1	2	
		97.177	4	4	2	0	
		98.514	1	3	3	1	
		105.099	2	4	2	1	
		106.019	2	1	0	3	
		109.406	2	1	1	3	
		116.227	4	4	0	2	
		117.527	4	5	1	0	
		120.059	8	2	1	3	
		122.788	8	4	3	1	
		123.660	8	3	3	2	
		131.847	6	4	2	2	
		136.549	8	3	0	3	
		140.052	12	5	2	1	
		143.116	2	4	4	0	
		155.870	2	5	3	0	
General comments: No impurity over 0.001%. Sample source or locality: Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA. General comments: Two other polymorphs, anatase (tetragonal) and brookite (orthorhombic), converted to rutile on heating above 700 C. Optical data: A=2.9487, B=2.6505, Sign=+ General comments: Optical data on specimen from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1555. Reflectance: Opaque mineral optical data on specimen from Sweden: R _J R%=20.3, Disp.=Std. Vickers hardness number: VHN ₁₀₀ =1132-1187. General comments: Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns. General comments: Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed. Additional pattern: Validated by calculated pattern. General comments: Naturally occurring material may be reddish brown. Color: White Temperature of data collection: Pattern taken at 25 C. Data collection flag: Ambient.							
Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 83 (1969)							
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54056 SS/FOM : F30=107(0.0088,32)	Filter : Monochromator crystal d-sp : Not given Internal standard : W						

ตาราง ข-4 ค่า 2θ, intensity และ hkl miller indices ของ Kaolinite จาก JCPDS-International Center for Diffraction Data, PCPDFWIN หมายเลข 01-078-2109

Pattern : 01-078-2109		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Al ₂ (OH) ₄ (Si ₄ O ₁₀)		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Aluminum Silicate Hydroxide Kaolinite		9.899	11	0	0	1	54.442	215	-3	1	1
		12.409	999	0	0	1	*54.442	215	-3	1	1
		15.631	9	0	0	1	54.561	217	-1	1	1
		16.160	2	0	0	1	*54.661	217	-1	1	1
		17.823	7	1	0	0	54.775	17	0	0	1
		18.911	3	-1	0	1	55.020	79	0	0	1
		20.381	562	0	0	0	55.154	57	0	0	0
		21.232	567	-1	-1	1	55.268	36	-1	-1	1
		21.541	277	-1	-1	1	55.400	85	1	1	1
		23.130	344	0	0	1	55.400	85	0	0	1
		23.856	179	0	0	1	55.524	53	0	0	1
		24.320	7	0	0	1	*55.784	29	-1	-1	1
		24.967	677	0	0	2	55.784	29	0	0	2
		26.114	40	0	0	1	56.055	8	0	0	1
		26.514	340	0	0	1	56.182	9	0	0	1
		27.322	13	-1	-1	1	56.358	221	-4	-4	1
		27.808	1	-1	-1	1	*56.358	221	-4	-4	1
		28.275	43	-1	-1	1	56.474	15	0	0	1
		28.814	85	0	0	1	56.581	28	0	0	1
		30.001	1	0	0	1	57.085	72	0	0	1
		31.262	3	0	0	1	57.203	39	0	0	1
		31.593	1	0	0	1	57.449	20	0	0	1
		31.838	1	0	0	1	57.449	20	0	0	1
		32.173	2	0	0	1	57.562	20	0	0	1
		32.654	59	0	0	1	*57.562	20	0	0	1
		33.042	4	0	0	1	57.734	5	0	0	1
		*33.042	4	0	0	1	57.903	5	0	0	1
		33.975	2	0	0	1	58.123	43	-1	-1	1
		35.029	128	0	0	1	58.486	4	0	0	1
		*35.029	128	0	0	1	58.486	4	0	0	1
		35.197	87	0	0	1	58.896	1	0	0	1
		35.414	95	-1	-1	1	58.734	1	-1	-1	1
		35.735	55	0	0	1	58.937	4	0	0	1
		35.992	135	0	0	1	59.054	3	0	0	1
		36.297	154	0	0	1	59.342	3	0	0	1
		37.468	3	0	0	1	59.685	30	0	0	1
		*37.468	3	0	0	1	59.685	30	0	0	1
		37.574	6	0	0	1	59.848	27	0	0	1
		37.838	1	0	0	1	59.848	27	0	0	1
		38.362	198	0	0	1	60.037	37	0	0	1
		38.508	137	-1	-1	1	*60.037	37	-1	-1	1
		38.564	202	0	0	1	60.238	20	0	0	1
		39.150	32	0	0	1	60.431	39	0	0	1
		39.409	279	0	0	1	60.431	39	0	0	1
		39.550	161	0	0	1	60.760	8	0	0	1
		*39.550	161	0	0	1	61.300	9	0	0	1
		39.997	23	0	0	1	61.525	11	0	0	1
		40.094	13	0	0	1	*61.525	11	0	0	1
		40.376	4	0	0	1	61.691	5	0	0	1
		*40.376	4	0	0	1	62.348	127	0	0	1
		40.670	11	0	0	1	62.510	125	0	0	1
		*40.670	11	0	0	1	62.510	125	0	0	1
		41.184	42	-1	-1	1	63.259	13	-1	-1	1
		41.419	36	0	0	1	63.259	13	0	0	1
		*41.419	36	0	0	1	63.366	13	0	0	1
		41.638	10	0	0	1	63.366	13	0	0	1
		41.969	2	0	0	1	63.511	7	0	0	1
		42.152	11	0	0	1	63.511	7	0	0	1
		42.457	21	0	0	1	63.905	20	0	0	1
		42.538	13	0	0	1	*63.905	20	0	0	1
		42.829	13	0	0	1	63.905	20	0	0	1
		*42.829	13	0	0	1	64.113	21	0	0	1
		43.241	2	0	0	1	*64.113	21	0	0	1
		43.337	2	0	0	1	64.335	21	0	0	1
		43.729	9	0	0	1	64.335	21	0	0	1
		44.894	13	0	0	1	64.436	14	0	0	1
		44.962	3	0	0	1	64.618	8	0	0	1
		44.522	3	0	0	1	64.618	8	0	0	1
		45.408	81	0	0	1	64.836	24	0	0	1
		45.714	91	0	0	1	64.836	24	0	0	1
		46.052	8	0	0	1	65.055	15	0	0	1
		46.338	3	0	0	1	65.215	8	0	0	1
		*46.338	3	0	0	1	65.420	12	0	0	1
		46.632	27	0	0	1	65.420	12	0	0	1
		47.049	47	0	0	1	65.905	14	0	0	1
		47.215	30	0	0	1	65.905	14	0	0	1
		47.276	29	0	0	1	66.290	4	0	0	1
		*47.276	29	0	0	1	66.290	4	0	0	1
		47.899	29	0	0	1	66.559	7	0	0	1
		*47.899	29	0	0	1	66.767	12	0	0	1
		48.173	4	0	0	1	66.767	12	0	0	1
		*48.173	4	0	0	1	67.001	10	0	0	1
		48.386	28	0	0	1	67.001	10	0	0	1
		48.534	16	0	0	1	67.102	16	0	0	1
		49.004	16	0	0	1	67.102	16	0	0	1
		49.536	40	0	0	1	67.307	19	0	0	1
		*49.536	40	0	0	1	67.307	19	0	0	1
		49.528	23	0	0	1					
		49.831	15	0	0	1					
		*49.831	15	0	0	1					
		50.384	13	0	0	1					
		*50.384	13	0	0	1					
		50.502	13	0	0	1					
		50.710	5	0	0	1					
		51.110	9	0	0	1					
		*51.110	9	0	0	1					
		51.229	36	0	0	1					
		*51.229	36	0	0	1					
		51.582	3	0	0	1					
		*51.582	3	0	0	1					
		51.947	2	0	0	1					
		52.354	1	0	0	1					
		*52.354	1	0	0	1					
		52.680	2	0	0	1					
		53.355	3	0	0	1					
		*53.355	3	0	0	1					
		53.724	22	0	0	1					
		54.266	21	0	0	1					

Radiation : CuKα1
 Lambda : 1.54060
 SS/FOM : F30=207(0.0037,39)

Filter : Not specified
 d-sp : Calculated spacings

ตารางที่ ข-5 ค่า 2θ , intensity และ hkl miller indices ของ Quartz α จาก JCPDS-International Center for Diffraction Data, PCPDFWIN หมายเลข 00-038-0241

Pattern : 01-089-8935		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
SiO ₂		2 θ	i	h	k	l
Silicon Oxide Quartz α		20.827	211	1	0	0
		26.607	999	0	1	1
		36.489	64	1	1	0
		39.429	61	1	0	2
		40.234	28	1	1	1
		42.385	47	2	0	0
		45.728	26	2	0	1
		50.079	112	1	1	2
		50.583	4	0	0	3
		54.803	30	0	2	2
		55.277	14	0	1	3
		57.139	2	2	1	0
		59.865	75	1	2	1
		63.964	13	1	1	3
		65.675	4	3	0	0
		67.644	44	1	2	2
		68.063	58	2	0	3
		68.201	47	0	3	1
		73.400	16	1	0	4
		75.542	22	3	0	2
		77.533	12	2	2	0
		79.772	21	2	1	3
		79.903	9	2	2	1
		81.083	19	1	1	4
		81.342	28	3	1	0
		83.685	14	1	3	1
		84.856	2	2	0	4
		86.925	1	2	2	2
		87.314	1	3	0	3
Lattice : Hexagonal S.G. : P3221 (154) a = 4.92090 c = 5.40910 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 113.43 Dx = 2.639 I/Cor = 2.99				
ICSD collection code: 089277 Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 398. Data collection flag: Non ambient temperature.						
Kihara, K., Eur. J. Mineral., volume 2, page 63 (1990) Calculated from ICSD using POWD-12++						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F29=1000(0.0001,29)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชมกร โกมลศิริสุข เกิดวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ.2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2558

ในระหว่างการศึกษามีโอกาสไปนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Forming of Zeolite/Carbon Composite Substrate Coated with Titania for Photocatalyst Decomposition of Organic Compound" ในการประชุม 8th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-8) ณ โรงแรม Swissotel Le Concorde กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 15-16 ธันวาคม 2557 และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Book series ของ Key Engineering Materials

ไปนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Phenol Removal from Contaminated Wastewater Using Activated Carbon/Zeolite Composite Coated with Titanium Dioxide" ในการประชุม International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2015 (ICTA2015) ณ Bitec Bangna กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 9-11 กันยายน 2558 และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Book series ของ Key Engineering Materials

ไปนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Activated Carbon/Zeolite Composite Substrate Coated with Photocatalyst Titania for Organic Waste Water Treatment from Petrochemical Industries" ในการประชุม The 6th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 21st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers ณ อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร วันที่ 21 เมษายน 2558 และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceedings