

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วย  
วัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



นายนิริวัชร นวอัครฐานันท์

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

QUALITY IMPROVEMENT OF TREATED WASTEWATER FROM PALM OIL FACTORY BY  
PHOTOCATALYST COMPOSITE MATERIALS

Mr. Nithiwach Nawaukkaratharnant



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Materials Science

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจาก  
โรงงานน้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา  
เชิงแสง

โดย

นายนิธิวัชร นวอัครฐานันท์

สาขาวิชา

วัสดุศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.จรัสพร มงคลขจิต

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทชั้นปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก๋า คະซีมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิรัตน์ ท่อแก้ว)

นิธิวัชร นวอัครฐานันท์ : การปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (QUALITY IMPROVEMENT OF TREATED WASTEWATER FROM PALM OIL FACTORY BY PHOTOCATALYST COMPOSITE MATERIALS) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.จรัสพร มงคลขจิต, 158 หน้า.

ในการศึกษานี้ วัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ เป็นตัวรองรับ และวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม/ไฟไรต์ เป็นวัสดุเคลือบ เตรียมขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณลิกนินสูง โดยวัสดุเชิงประกอบที่เป็นตัวรองรับประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์โซเดียม เอ และดินคำสุราษฎร์ธานี ในอัตราส่วน 1:3:2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นวดผสมด้วยสารละลายตัวประสานก่อนขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดเป็นชิ้นงานทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.5 เซนติเมตร ภายใน 0.9 เซนติเมตร ตัดให้ได้ความยาวประมาณ 2.5 เซนติเมตร และเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิดและปกคลุมชิ้นงานด้วยถ่านแกลบ ผลการทดลองพบว่าชิ้นงานหลังเผามีความแข็งแรง 10.48 นิวตันต่อเซนติเมตร ความพรุนตัวปรากฏร้อยละ 48.47 ความหนาแน่นรวม (ไม่รวมรูกลวง) 1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในส่วนของการเตรียมวัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ผสมไทเทเนียมทางการค้า P25 และไฟไรต์ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์ที่ผ่านการบดและล้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก เผาที่ 300 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ในบ้าอะลูมินาปิดและปกคลุมด้วยถ่านแกลบ การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินด้วยผงวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม/ไฟไรต์ ปริมาณ 0.03 กรัม ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ภายใต้การฉายแสงจากหลอดทังสเตนฮาโลเจน (แสงแดดจำลอง) ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายลิกนินลดลงร้อยละ 55.16 ในเวลา 360 นาที โดยพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/VIS นอกจากนั้นยังได้พิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยผงวัสดุเชิงประกอบ ผลการทดลองพบว่าสีของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มลดลงร้อยละ 33 ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทังสเตนฮาโลเจน ในเวลา 360 นาที สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยการลอยวัสดุเชิงประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุน เคลือบด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม/ไฟไรต์ (80:20) หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิดและปกคลุมชิ้นงานด้วยถ่านแกลบ และฉีดโฟมพอลิยูรีเทนในรูกลวงจำนวน 50 ชั้น ในน้ำทิ้งปริมาณ 2,000 มิลลิลิตร ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่งของเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 พบว่าความเข้มข้นของน้ำสีทิ้งลดลงถึงร้อยละ 70 ในเวลา 3 วัน

|            |             |                                  |
|------------|-------------|----------------------------------|
| ภาควิชา    | วัสดุศาสตร์ | ลายมือชื่อนิสิต .....            |
| สาขาวิชา   | วัสดุศาสตร์ | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... |
| ปีการศึกษา | 2560        | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ..... |



# # 5672890023 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEYWORDS: PHOTOCATALYST / ACTIVATED CARBON / ZEOLITE / TITANIUM DIOXIDE / PYRITE / LIGNIN / WASTEWATER

NITHIWACH NAWAUKKARATHARNANT: QUALITY IMPROVEMENT OF TREATED WASTEWATER FROM PALM OIL FACTORY BY PHOTOCATALYST COMPOSITE MATERIALS. ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, D.Eng., CO-ADVISOR: CHARUSPORN MONGKOLKACHIT, Ph.D., 158 pp.

In this study, photocatalyst composite materials composed of 2 parts, which are activated carbon/zeolite NaA as a substrate and titania/pyrite composite materials as a coat, were prepared for improving the quality of high lignin content treated-wastewater from palm oil factory. The substrates consist of activated carbon, zeolite NaA and Suratthani ball clay in a ratio of 1:3:2 by weight, respectively. The mixture was mixed and kneaded with organic binder solution before extruding to be a hollow cylindrical tube. The extruded tubes size of 1.5 cm in outer diameter and 0.9 cm in inner diameter were cut into 2.5 cm in length. The samples were covered by rice husk charcoal and fired at 650 °C for 2 hours in closed stainless container. The results showed that radial crush strength, apparent porosity and bulk density (excluded inside hole) of the fired samples are 10.48 N/cm, 48.47% and 1.07 g/cm<sup>3</sup>, respectively. For the preparation of photocatalyst composite materials, commercial titania P25 was mixed with ground and washed pyrite from marcasite jewelry cutting production waste in a ratio of 80:20 by weight, and the mixed powder was then covered by rice husk charcoal and fired at 300 °C for 1 hour in closed alumina crucible. The photocatalytic efficiency of titania/pyrite for lignin degradation was tested by dispersing 0.03 g of the photocatalyst composite powder in 300 ml of lignin solution (150 mg/L) under light irradiation from tungsten halogen lamp (sunlight simulator). The result showed that the concentration of lignin solution, determined by absorbance of UV/VIS spectrum at the wavelength of 280 nm, decreased around 55.16% after 360 minutes. Moreover, the efficiency of the composite powder for color removal of treated-wastewater from palm oil industry was determined. The result showed that color of wastewater from palm oil industry was decreased around 33% under light irradiation from tungsten halogen lamp after 360 minutes. The photocatalytic degradation efficiency of floated porous activated carbon/zeolite cylindrical tubes coated with titania/pyrite (80:20) composite materials fired at 300 °C for 1 hour in closed stainless container (covered by rice husk charcoal), and filled with polyurethane foam into the hole, for color removal of treated-wastewater from palm oil industry was investigated. 50 pieces of composite samples in 2,000 ml of wastewater were floated under sunlight irradiation on clear sky days in March 2018. It was found that the color of wastewater was reduced around 70% after 3 days.

Department: Materials Science

Field of Study: Materials Science

Academic Year: 2017

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากทุกท่านดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ ทั้งด้านการงานและการดำเนินชีวิต รวมทั้งให้ความเมตตา มอบโอกาสและประสบการณ์ชีวิตที่ดี

ดร.จรัสพร มงคลขจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาใน ด้านงานวิจัย ให้ความเมตตาและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไข วิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น รวมทั้งความรู้เพิ่มเติม เพื่อใช้ในการทำงานต่อไป

อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความเมตตา รวบทั้งเจ้าหน้าที่และบุคลากรของภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ และให้ประสบการณ์ชีวิตที่ดีในระหว่างการศึกษา

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

ทุน 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและค่าใช้จ่าย

ทุนอุดหนุนการศึกษาเฉพาะค่าเล่าเรียนประเภท 60/40 ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

บริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด ที่ให้ข้อมูลกระบวนการต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานและการจัดเตรียมจัดส่งน้ำทิ้งสำหรับการทดสอบในงานวิจัย

ครอบครัวของผู้วิจัยในการให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ในภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญตาราง.....   | ฅ    |
| สารบัญรูป.....   | ฉ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                      | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....   | 2    |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....   | 2    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                  | 3    |
| 2.1 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม.....   | 3    |
| 2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม.....  | 3    |
| 2.1.1.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (mill processing).....                      | 3    |
| 2.1.1.2 กระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (refine processing).....          | 5    |
| 2.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....                          | 6    |
| 2.1.2.1 การบำบัดด้วยวิธีแบบดั้งเดิม.....                                     | 6    |
| 2.1.2.1.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น.....  | 6    |
| 2.1.2.1.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ.....                                  | 6    |
| 2.1.2.2 การบำบัดด้วยวิธีการหมักก๊าซชีวภาพ.....                               | 7    |
| 2.2 การกำจัดสีของน้ำทิ้ง.....  | 7    |
| 2.2.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (physical technology).....                          | 7    |
| 2.2.1.1 การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์.....                                     | 7    |
| 2.2.1.2 การกรองด้วยเยื่อแผ่น.....  | 7    |
| 2.2.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (chemical technology).....                  | 7    |
| 2.2.2.1 การสร้างตะกอนรวม (coagulation-flocculation).....                     | 7    |
| 2.2.2.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes; AOPs)..... | 8    |
| 2.2.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (biological technology).....                        | 8    |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (algae absorption) .....  | 8  |
| 2.2.3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (fungi decomposition).....   | 9  |
| 2.2.3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (bacteria decomposition).....   | 9  |
| 2.3 ลิกนิน (lignin).....   | 9  |
| 2.4 โฟโตแคตตาลิสต์ (photocatalyst).....  | 11 |
| 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO <sub>2</sub> ) .....   | 14 |
| 2.6 ไพไรต์ (pyrite).....   | 17 |
| 2.7 ถ่านกัมมันต์ (activated Carbon).....   | 21 |
| 2.8 ซีโอไลต์ (zeolite) .....   | 23 |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....  | 25 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....   | 29 |
| 3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....  | 30 |
| 3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....  | 30 |
| 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....  | 30 |
| 3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....   | 31 |
| 3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุประสงค์.....   | 31 |
| 3.2.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลางที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับ<br>เคลือบวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์.....                        | 32 |
| 3.2.2.1 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ.....   | 33 |
| 3.2.2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการอัดรีด .....   | 33 |
| 3.2.2.3 การศึกษาผลของการเติมดินดำสุราษฎร์ธานีในส่วนผสมของถ่านกัมมันต์และซี<br>โอไลต์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ.....              | 35 |
| 3.2.2.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อสมบัติ<br>ของวัสดุเชิงประกอบ โดยมีดินดำสุราษฎร์ธานีเป็นตัวประสาน ..... | 36 |
| 3.2.2.5 การศึกษาผลของบรรยากาศการเผาขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความ<br>แข็งแรงของขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผา.....                          | 37 |
| 3.2.2.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติของขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มี<br>ส่วนผสมของถ่านกัมมันต์ .....                                | 37 |
| 3.2.3 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์ .....   | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการบดต่อขนาดอนุภาคของไฟไรต์.....   | 38 |
| 3.2.3.2 การศึกษาผลของการเตรียมไฟไรต์ด้วยวิธีการบดล้างและอัตราส่วนของ<br>ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินด้วย<br>ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ..... | 38 |
| 3.2.4 การเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์บนวัสดุตัวรองรับเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเพื่อใช้<br>ทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ .....                                       | 40 |
| 3.2.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน .....  | 41 |
| 3.2.5.1 วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก .....  | 41 |
| 3.2.5.2 วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ .....  | 43 |
| 3.2.5.3 วัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์ .....   | 43 |
| 3.2.5.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ.....   | 44 |
| 3.3 แผนผังการทดลอง.....   | 46 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....   | 49 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ .....   | 49 |
| 4.1.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี .....  | 49 |
| 4.1.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส .....   | 50 |
| 4.1.3 ผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ .....  | 52 |
| 4.1.4 ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค .....   | 53 |
| 4.1.5 ค่าศักย์ซีตา.....   | 55 |
| 4.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบ<br>วัสดุโฟโตแคตาไลสต์.....  | 56 |
| 4.2.1 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ.....  | 56 |
| 4.2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการอัดรีด .....  | 56 |
| 4.2.3 การศึกษาผลของการเติมดินดำสุราษฎร์ธานีในส่วนผสมของถ่านกัมมันต์และ ซีโอไลต์<br>โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ.....  | 58 |
| 4.2.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุ<br>เชิงประกอบ โดยมีดินดำสุราษฎร์ธานีเป็นตัวประสาน .....                                    | 65 |
| 4.2.5 การศึกษาผลของบรรยากาศการเผาชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความแข็งแรงของ<br>ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผา .....  | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีส่วนผสม<br>ของถ่านกัมมันต์ .....   | 74  |
| 4.3 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์ .....   | 81  |
| 4.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการบดต่อขนาดอนุภาคของไฟไรต์.....   | 81  |
| 4.3.2 การศึกษาผลของการเตรียมไฟไรต์ด้วยวิธีการบดล้างและอัตราส่วนของไทเทเนียมได<br>ออกไซด์ต่อไฟไรต์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินด้วยปฏิกิริยาโฟโตแค<br>ตาไลติก ..... | 84  |
| 4.4 การเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์บนวัสดุตัวรองรับเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเพื่อใช้ทดสอบ<br>ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ.....  | 99  |
| 4.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินในน้ำของวัสดุเชิงประกอบพรุนเคลือบ<br>ด้วยวัสดุโฟโตแคตาลิสต์ .....   | 99  |
| 4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงาน<br>น้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาลิสต์.....                          | 108 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....  | 116 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย .....  | 116 |
| 5.1.1 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุนเพื่อ<br>ใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์.....                                  | 116 |
| 5.1.2 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์ .....   | 116 |
| 5.1.3 การเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์บนวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอก<br>กลวงที่มีเนื้อพรุน.....  | 117 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 117 |
| รายการอ้างอิง .....   | 119 |
| ภาคผนวก.....  | 130 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 158 |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 อัตราการย่อยสลายของสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วยผงไฟไรต์.....   | 20   |
| ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ.....  | 34   |
| ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ<br>ดินดำสุราษฎร์ธานี.....                           | 36   |
| ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง<br>ถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ..... | 37   |
| ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของวัสดุไฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์.....  | 40   |
| ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ .....  | 50   |
| ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัตถุดิบ .....   | 53   |
| ตารางที่ 4.3 ขนาดของไฟไรต์หลังบดด้วยเวลาแตกต่างกัน.....   | 82   |
| ตารางที่ 4.4 ขนาดของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีอัตราส่วน<br>ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์แตกต่างกัน .....          | 86   |
| ตารางที่ 4.5 ค่าช่องว่างแถบพลังงานและความยาวคลื่นแสงที่สามารถกระตุ้นวัสดุเชิงประกอบ<br>ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ไม่ล้าง.....     | 98   |
| ตารางที่ 4.6 ผลการเคลือบวัสดุไฟโตแคตตาลิสต์บนชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูน<br>ด้วยวิธีต่างๆ.....                               | 103  |

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 รูปแบบขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบโรงงานมาตรฐาน .....  | 4    |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบพื้นฐานของลิกนิน .....  | 9    |
| รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินในธรรมชาติ .....   | 10   |
| รูปที่ 2.4 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไปเนื่องจากลิกนิน<br>ถูกย่อยสลายที่เวลาต่างๆ .....                                   | 11   |
| รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของโฟโตแคตาไลสต์ภายใต้แสงกระตุ้น .....  | 12   |
| รูปที่ 2.6 ความแตกต่างกันของระดับช่องว่างพลังงานแถบวาเลนซ์ (VB) และแถบตัวนำ (CB) ของ<br>วัสดุโฟโตแคตาไลสต์ชนิดต่างๆ .....                               | 13   |
| รูปที่ 2.7 ภาพแสดงการติดตั้งการทดสอบการย่อยสลายฟีนอลภายใต้หลอดยูวี .....  | 15   |
| รูปที่ 2.8 พื้นผิวของเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 บนโพลีอะลูมินาหลังเผา<br>ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส .....   | 16   |
| รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบผลการย่อยสลายฟีนอลระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25<br>และโพลีอะลูมินาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 หลังการใช้งานซ้ำ ..... | 16   |
| รูปที่ 2.10 (ก) ลักษณะของแรมมาร์คาไซด์ (ข) เซมิคอนดักเตอร์ที่ทำจากโลหะเงินและไฟไรต์ .....   | 17   |
| รูปที่ 2.11 (ก) XRD pattern และ (ข) โครงสร้างทางจุลภาคของไฟไรต์ .....   | 19   |
| รูปที่ 2.12 อัตราการย่อยสลายของสารละลายสีย้อม 5 ชนิด (ก) เมทิลีน บลู (ข) ซาฟรานีน ที<br>(ค) เมทิลออเรนจ์ (ง) โรดามีน บี และ (จ) ไฟโรนีน บี .....        | 20   |
| รูปที่ 2.13 ลักษณะรูพรุนภายในอนุภาคถ่านกัมมันต์ .....   | 21   |
| รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางจุลภาคของ (1) ถ่านกัมมันต์ (2) ไทเทเนียมไดออกไซด์<br>(3) (4) และ (5) วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม/ถ่านกัมมันต์ .....                | 22   |
| รูปที่ 2.15 ภาพวาดแสดงการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์<br>ตรึงบนถ่านกัมมันต์ .....   | 23   |
| รูปที่ 2.16 ลักษณะการสร้างโครงร่างของซีโอไลต์ชนิด SOD LTA EMT และ FAU .....   | 23   |
| รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบขนาดโพรงของซีโอไลต์แต่ละชน .....  | 24   |
| รูปที่ 2.18 โครงสร้างซีโอไลต์เอและหน่วยย่อย .....   | 25   |
| รูปที่ 2.19 การสลายตัวของลิกนินภายใต้การฉายแสงยูวีแบบมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง<br>และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา .....                                  | 26   |



|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 2.20 (ก) ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์<br>(ข) ชิ้นงานหลังสอดไส้โพลีโพลียูรีเทนเหลวที่ลอยอยู่บนผิวของสารละลายพินอล.....  | 27 |
| รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายพินอลการกำจัดพินอลด้วย<br>วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการเผา<br>ที่ 650 องศาเซลเซียส ในที่มีดและภายใต้แสงยูวี ที่เวลาแตกต่างกัน ..... | 28 |
| รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของแถบการดูดกลืนแสงของพินอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ<br>80 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.01 กรัม ภายใต้การฉายแสงยูวี<br>ที่เวลาแตกต่างกัน .....  | 28 |
| รูปที่ 3.1 การลอยน้ำของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพูนเคลือบด้วยวัสดุโพโตแคตาไลสต์  | 29 |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปร่างและขนาดชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพูน.....  | 32 |
| รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบ Ram type.....   | 34 |
| รูปที่ 3.4 หัวรีดสำหรับรีดชิ้นงานทรงกระบอกกลวง .....  | 35 |
| รูปที่ 3.5 ถ่านแกลบสำหรับปกคลุมชิ้นงานขณะเผา.....   | 35 |
| รูปที่ 3.6 ลักษณะของไฟไรต์ก่อนผ่านกระบวนการบด.....  | 38 |
| รูปที่ 3.7 กล้องทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุโพโตแคตาไลสต์ด้วยแสงจากหลอดทังสแตเนียมฮาโลเจน..   | 45 |
| รูปที่ 3.8 แผนผังการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนส่วนที่ 1 .....   | 46 |
| รูปที่ 3.9 แผนผังการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนส่วนที่ 2 .....   | 47 |
| รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองการพัฒนาวัสดุโพโตแคตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์<br>และไฟไรต์.....  | 48 |
| รูปที่ 4.1 XRD pattern ของซีโอไลต์โซเดียม เอ.....   | 51 |
| รูปที่ 4.2 XRD pattern ของดินดำสุราษฎร์ธานี.....  | 51 |
| รูปที่ 4.3 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 .....  | 52 |
| รูปที่ 4.4 XRD pattern ของไฟไรต์.....   | 52 |
| รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์.....   | 54 |
| รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอไลต์โซเดียม เอ.....   | 54 |
| รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของดินดำสุราษฎร์ธานี.....  | 54 |
| รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....  | 55 |
| รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของไฟไรต์.....   | 55 |
| รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ซีตาของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์.....   | 56 |
| รูปที่ 4.11 เนื้อโดของส่วนผสมก่อนขึ้นรูปด้วยการอัดรีด.....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด (ก) ชิ้นงานหลังการอัดรีด และ<br>(ข) ชิ้นงานหลังตัดให้ความยาว 2.5 เซนติเมตร .....   | 57 |
| รูปที่ 4.13 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผาเมื่อผ่านการแช่น้ำ .....   | 58 |
| รูปที่ 4.14 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของ<br>ดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน .....   | 61 |
| รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงก่อนและหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของ<br>ดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน .....  | 61 |
| รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นจริงและความพรุนตัวปรากฏหลังเผาของชิ้นงาน<br>วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน .....   | 62 |
| รูปที่ 4.17 XRD pattern ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของ<br>ดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน หลังเผาที่ 600 องศาเซลเซียส.....  | 63 |
| รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของ<br>ดินดำ สุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน ก่อนและหลังเผา ที่กำลังขยาย 500 เท่า<br>(ก) = สูตร BC0 ก่อนเผา (ข) = สูตร BC0 หลังเผา (ค) = สูตร BC25 ก่อนเผา<br>(ง) = สูตร BC25 หลังเผา (จ) = สูตร BC50 ก่อนเผา และ (ฉ) = สูตร BC50 หลังเผา..                             | 64 |
| รูปที่ 4.19 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ<br>ทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน .....   | 66 |
| รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่<br>มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน .....   | 67 |
| รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นรวมหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ<br>ทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน .....  | 68 |
| รูปที่ 4.22 ความพรุนตัวปรากฏหลังเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ<br>ทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน .....   | 69 |
| รูปที่ 4.23 XRD patterns ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของ<br>ถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส<br>เย็นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านกลบ.....   | 71 |
| รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของ<br>ถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส<br>เย็นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านกลบ ที่กำลังขยาย<br>500 และ 3,000 เท่า (ก) และ (ข) = สูตร FBC01 และ (ค) และ (ง) = สูตร FBC02 .... | 72 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.25 ความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในสภาวะต่างกัน ของชิ้นงาน<br>วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ซีเดียม เอ<br>แตกต่างกัน.....                                    | 74 |
| รูปที่ 4.26 ความพรุนตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในสภาวะต่างกันของชิ้นงาน<br>วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ซีเดียม เอ<br>แตกต่างกัน.....                                     | 74 |
| รูปที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของ<br>ถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ .....  | 75 |
| รูปที่ 4.28 ความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์<br>หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ.....   | 76 |
| รูปที่ 4.29 ความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของ<br>ถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ .....   | 77 |
| รูปที่ 4.30 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก<br>ที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ.....  | 78 |
| รูปที่ 4.31 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์<br>หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ.....   | 78 |
| รูปที่ 4.32 XRD pattern ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์<br>หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ.....  | 79 |
| รูปที่ 4.33 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัม<br>มันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ก) 650 °C<br>(ข) 700 °C (ค) 750 °C และ (ง) 800 °C..... | 80 |
| รูปที่ 4.34 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับ<br>เคลือบวัสดุโพโตแคตาลิสต์หลังเผาที่ 650 องศาเซลเซียส สูตร (ก) FBC01 และ<br>(ข) FBC02 .....                                  | 81 |
| รูปที่ 4.35 โครงสร้างทางจุลภาคของไฟไรต์หลังบด 24 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า<br>(ข) 3,000 เท่า และ (ค) 20,000 เท่า.....  | 83 |
| รูปที่ 4.36 XRD pattern ของไฟไรต์บด 24 ชั่วโมง.....  | 83 |
| รูปที่ 4.37 ภาพวาดจำลองลักษณะอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์<br>ที่มีลักษณะเป็น core/shell .....   | 87 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 4.38 | โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ไพไรต์ไม่ล้าง (ก) T95P5 (ข) T90P10 (ค) T85P15 (ง) T80P20 (จ) Pyrite ไพไรต์ล้าง (ฉ) T95P5W (ช) T90P10W (ซ) T85P15W (ฌ) T80P20W และ (ญ) PyriteW .....            | 89  |
| รูปที่ 4.39 | โครงสร้างทางจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDS ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ไพไรต์ไม่ล้าง (ก) T95P5 (ข) T90P10 (ค) T85P15 (ง) T80P20 ไพไรต์ล้าง (จ) T95P5W (ฉ) T90P10W (ช) T85P15W และ (ซ) T80P20W..... | 90  |
| รูปที่ 4.40 | XRD pattern ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์ไม่ล้าง แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส .....  | 91  |
| รูปที่ 4.41 | XRD pattern ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์ล้าง แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส .....   | 92  |
| รูปที่ 4.42 | การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ไม่ล้าง ที่เวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้น.....   | 94  |
| รูปที่ 4.43 | ความสัมพันธ์ของค่า $\ln(C/C_0)$ และเวลาในการฉายแสง ของลิกนินเมื่อถูกย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ไม่ล้าง.....   | 94  |
| รูปที่ 4.44 | การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ล้าง ที่เวลาในการฉายแสงต่างกัน .....   | 96  |
| รูปที่ 4.45 | ความสัมพันธ์ของค่า $\ln(C/C_0)$ และเวลาในการฉายแสง ของลิกนินเมื่อถูกย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ล้าง.....  | 97  |
| รูปที่ 4.46 | (ก) Tauc plot (ข) แถบ UV/VIS ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ....  | 98  |
| รูปที่ 4.47 | ภาพจำลองแถบพลังงานของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ .....  | 99  |
| รูปที่ 4.48 | โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกสูตร BC50 เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่าและ (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....  | 100 |
| รูปที่ 4.49 | การลอยบนสารละลายลิกนินของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณสูตร BC50 เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และฉีดยาโพอลิยูรีเทน.....  | 101 |
| รูปที่ 4.50 | การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินเทียบกับเวลาด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....   | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| รูปที่ 4.51 ตัวอย่างลักษณะการหลุดล่อนของผิวเคลือบหลังเผา บนชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบสูตร<br>(ก) FBC01 และ (ข) FBC02 .....   | 104 |
| รูปที่ 4.52 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณ สูตร FBC01 (ก) ก่อนเคลือบ<br>(ข) หลังเคลือบ และ สูตร FBC02 (ค) ก่อนเคลือบ (ง) หลังเคลือบ.....  | 104 |
| รูปที่ 4.53 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์<br>สูตร FBC01 (ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย<br>20,000 เท่า (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า และ สูตร FBC02 (ง) ผิวเคลือบที่<br>กำลังขยาย 5,000 เท่า (จ) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ฉ) ภาพตัดขวางที่<br>กำลังขยาย 3,000 เท่า ..... | 106 |
| รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์เมื่อเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้นของวัสดุเชิงประกอบ<br>ทรงกระบอกพรุณเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (แผนภาพเล็กแสดงการพิจารณาที่ค่า<br>$C/C_0$ ในช่วง 0.9 – 1).....  | 108 |
| รูปที่ 4.55 แถบการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีร้อยละความเข้มข้น<br>ร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสารละลายลิควินที่ความเข้มข้นเริ่มต้น<br>ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....   | 109 |
| รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการ<br>ทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบ<br>ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์.....  | 110 |
| รูปที่ 4.57 ลักษณะสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์ม (ก) ก่อนทดสอบ และ<br>(ข) หลังทดสอบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์.....  | 110 |
| รูปที่ 4.58 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณ (ก) ก่อนเคลือบ และ (ข) หลังเคลือบ<br>ด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์.....   | 111 |
| รูปที่ 4.59 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์<br>เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ที่ล้าง<br>(ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า และ<br>(ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า .....  | 112 |
| รูปที่ 4.60 การทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของ โรงงานน้ำมัน<br>ปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบ<br>ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ .....  | 113 |

- รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ในที่มีดและภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ..... 114
- รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ 115
- รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ในที่มีด ..... 115



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีการเพาะปลูกมากในภาคใต้และนำผลปาล์มมาแปรรูปเป็นน้ำมันปาล์ม ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสด ไม่ว่าจะปาล์มจากเนื้อผลปาล์มหรือน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดปาล์ม จะต้องมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการล้างทะลายปาล์มด้วยไอน้ำร้อน การสกัดน้ำมันปาล์มและการทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบหรือการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ทำให้น้ำทิ้งหลังกระบวนการผลิตมีค่าความสกปรกสูง ไม่ว่าจะปาล์มปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ในน้ำหรือค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) ค่าน้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มจึงจำเป็นต้องมีการลงทุนติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสีย หรือแม้แต่การลงทุนติดตั้งระบบหมักก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียและกากปาล์ม เพื่อช่วยลดปัญหาการทิ้งน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติให้ได้มากที่สุด

ถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มขนาดใหญ่ที่มีการจัดการอย่างดี จะทำการบำบัดน้ำเสียจนได้น้ำทิ้งที่มีค่าความสกปรกอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มของกระทรวงอุตสาหกรรมจนสามารถปล่อยน้ำทิ้งที่มีค่าความสกปรกค่อนข้างต่ำออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้แล้วก็ตาม แต่ก็พบว่าน้ำทิ้งยังมีสีหรือสีน้ำตาลเข้มซึ่งเกิดจากการเจือปนของสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ และย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์หรือกำจัดออกได้ยาก ได้แก่ สารประกอบลิกนิน และสารอินทรีย์อื่นๆ ถึงแม้ว่าน้ำทิ้งดังกล่าวจะผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันตามกฎหมาย ไม่ส่งผลกระทบต่อเหมันของแหล่งน้ำธรรมชาติ แต่ยังคงส่งผลกระทบต่อสีของแหล่งน้ำนั้นและอาจมีผลต่อปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำนั้นด้วย ยิ่งไปกว่านั้นยังมีผลกระทบต่อความรู้สึกของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณโดยรอบโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้น รวมถึงการยอมรับและความไว้วางใจของประชาชนเหล่านั้นที่มีต่อโรงงานด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบที่สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ได้หลังการบำบัดจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยการปรับปรุงสีของน้ำทิ้งให้ใสสะอาดมากขึ้น ซึ่งวัสดุหลักที่นำมาใช้ในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบนี้มีทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน คือ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์เอ โทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับไฮดรอกไซด์โพด โดยไทเทเนียมออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกเมื่อได้รับแสงแดด และจะย่อยสลายสารประกอบลิกนิน รวมถึงสารประกอบอื่นๆ ให้เป็นก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่งผลให้สีของน้ำทิ้งจางลงได้ ส่วนถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่ในการช่วยดูดซับสารประกอบลิกนินหรือสารประกอบอินทรีย์ และสารที่ทำให้เกิดกลิ่นอื่นๆ ซึ่งการดูดซับดังกล่าวช่วยส่งเสริมการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับไอรอนไดซัลไฟด์ ได้มากขึ้น และซีโอไลต์ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนที่จับอยู่กับสารประกอบลิกนิน ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ลิกนินถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ทั้งในการสลายด้วยแบคทีเรียและการสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก งานวิจัยนี้ยังได้นำถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์เอามาใช้เป็นส่วนประกอบของตัวรองรับสำหรับเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับไอรอนไดซัลไฟด์ ไว้ที่ผิวภายนอกของตัวรองรับ โดยใช้วิธีขึ้นรูปแบบอัดรีดเป็นวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลวง การเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับไอรอนไดซัลไฟด์ ไว้ที่ผิวภายนอกของตัวรองรับนั้น เพื่อแก้ปัญหาการกำจัดหรือคัดแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดผงหลังการบำบัดน้ำทิ้ง ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุเชิงประกอบนี้ยังลอยอยู่บนผิวน้ำได้ โดยการสอดวัสดุโพลียูรีเทนที่ลอยน้ำได้ไว้ในรูกลวงนั้น ส่งผลให้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนวัสดุตัวรองรับสามารถสัมผัสแสงแดดได้ง่ายขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาวีสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการอัดรีด

1.2.2 ศึกษาผลของสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบ ถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2.3 ศึกษาผลของการใช้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดและมีสมบัติที่เหมาะสม ในการลดปริมาณลิกนินของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม

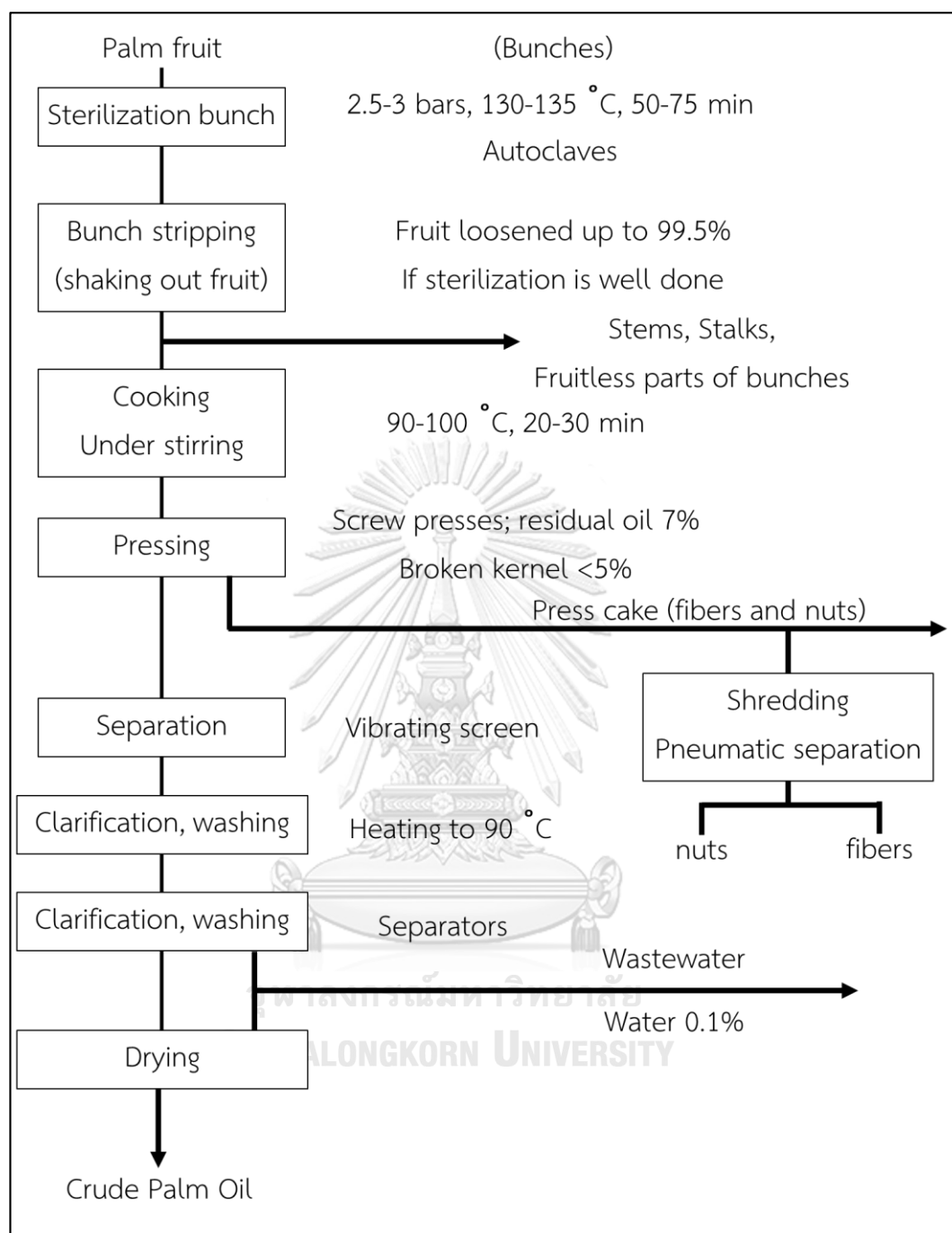
ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชทางเศรษฐกิจหลากหลายชนิด อาทิ ข้าวเจ้า มันสำปะหลัง ยางพาราและปาล์มน้ำมัน เป็นต้น อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย และนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญของประเทศไทย โรงงานผลิตน้ำมันปาล์มจำนวนมากตั้งอยู่ในพื้นที่ของจังหวัดต่างๆ ในภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันได้รับความนิยมมากในพื้นที่ดังกล่าว ในกระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมันให้เป็นน้ำมันปาล์มสามารถทำได้ด้วยวิธีการสกัดจากส่วนของเปลือกนอกและจากเมล็ดของปาล์มน้ำมัน<sup>[1, 2]</sup>

##### 2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มจากปาล์มน้ำมันสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการหลัก ดังนี้

###### 2.1.1.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (mill processing)

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มมีกระบวนการสกัด 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โรงงานที่มีกระบวนการสกัดแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงและผลิตได้น้ำมันเกรดเอ ส่วนโรงงานที่มีกระบวนการสกัดแบบหีบน้ำมันผสมจะมีกำลังการผลิตค่อนข้างต่ำ ในส่วนของรูปแบบการสกัดน้ำมันปาล์มแบบโรงงานมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบโรงงานมาตรฐาน

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มของโรงงานผลิตน้ำมันแบบมาตรฐานแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) การอบทะลายด้วยไอน้ำ (sterilization) หรือการนึ่งปาล์ม โดยการอบปาล์มสดในหม้อหนึ่งที่อุณหภูมิ 130 – 135 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 2.5 – 3.0

บาร์ เป็นเวลา 50 – 75 นาที ขั้นตอนนี้ช่วยให้ผลปาล์มอ่อนและหลุดจากขั้วผลได้ง่ายขึ้น

2.) การแยกผล (stripping) โดยทะลายปาล์มจะถูกส่งเข้าเครื่องเพื่อแยกผลปาล์มออก และทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไปใช้ประโยชน์อื่นๆ เช่น ถมดินในสวนปาล์ม เป็นต้น หลังจากนั้นนำผลปาล์มที่ได้ไปเข้าเครื่องย่อยผลปาล์มเพื่อแยกส่วนเปลือกและเมล็ดออกจากกัน ขั้นตอนนี้ทำให้ง่ายต่อการนำไปสกัดน้ำมัน

3) การสกัดน้ำมัน (oil extraction) โดยการนำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 – 30 นาที หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องหีบหรือบีบแบบเกลียวอัดคู่เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบออกมา ซึ่งน้ำมันปาล์มดิบมีส่วนประกอบของน้ำมันร้อยละ 66 น้ำร้อยละ 24 และของแข็งร้อยละ 10

4) การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (clarification) เริ่มด้วยขั้นตอนการแยกของเหลวและของแข็งออกจากกัน เช่น กากเส้นใยและเศษทราย เป็นต้น โดยการส่งน้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้ไปยังถังกรอง และทำความสะอาดอีกครั้งด้วยเครื่องเหวี่ยง

#### 2.1.1.2 กระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (refine processing)

การกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบคือกระบวนการทำให้น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากกระบวนการสกัดมีความบริสุทธิ์เพื่อใช้ในการบริโภค แบ่งได้เป็น 2 วิธีการ คือ

1) วิธีทางกายภาพ (physical or steam refining) เป็นวิธีการใช้น้ำเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่น โดยการผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน และกลั่นแยกกรดไขมัน รวมทั้งสารให้กลิ่นโดยการระเหยออกไป นอกจากนั้นในวิธีนี้ยังมีการกำจัดฟอสโฟลิปิดและฟอกสีของน้ำมันปาล์มด้วย และสุดท้ายนำน้ำมันที่ได้มากลั่นโดยใช้ไอน้ำ จนได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

2) วิธีทางเคมี (chemical refining) เป็นวิธีการใช้สารเคมีในการกำจัดกรดไขมันอิสระ นิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต โดยการทำให้เป็นสบู่และแยกออกจากน้ำมัน หลังจากนั้นนำน้ำมันที่ได้มาฟอกสีและกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ

จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มที่ได้กล่าวมาพบว่ามีการใช้ไอน้ำและไอน้ำเป็นปริมาณมากในหลายกระบวนการ<sup>[3]</sup> เช่น การนึ่งปาล์ม และการทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ ดังนั้นจึงก่อให้เกิดน้ำเสียขึ้นระหว่างกระบวนการ<sup>[4-6]</sup> ซึ่งน้ำเสียนั้นมีสีน้ำตาลเข้มและเหนียว มีความเป็นมลพิษค่อนข้างสูงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบสภาพพื้นดินและน้ำได้ เนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สูงมากกว่า

มาตรฐาน<sup>[7, 8]</sup> เช่น ซีโอดี (chemical oxygen demand; COD) บีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD) ฟีนอล (phenol) ของแข็งแขวนลอยและไขมัน รวมถึงสีและกลิ่น เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยน้ำที่บำบัดแล้วออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

## 2.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

### 2.1.2.1 การบำบัดด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

การบำบัดน้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มมี 2 ลักษณะ ดังนี้<sup>[9]</sup>

#### 2.1.2.1.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

ในขั้นตอนนี้ น้ำเสียที่มีความสกปรกมากและน้อยจะถูกแยกออกจากกัน สำหรับน้ำเสียที่มีความสกปรกมากจะถูกส่งเข้าการบำบัด โดยการใช้บ่อดักไขมันเพื่อให้ไขมันลอยขึ้นเหนือน้ำและกวาดไขมันออก ส่วนตะกอนและสารแขวนลอยจะตกลงไปที่ก้นของบ่อและกำจัดโดยการขุดลอกกันบ่อ ส่วนน้ำเสียที่มีความสกปรกน้อยจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่

#### 2.1.2.1.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เนื่องจากในน้ำเสียมีปริมาณของสารอินทรีย์ที่สูง โดยการกักเก็บน้ำเสียไว้ในบ่อคงตัว (stabilization ponds) หลายๆ บ่อและเรียงกันแบบอนุกรม จึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่มาก ประเภทของบ่อสามารถแบ่งได้โดยลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์ มี 3 ประเภท คือ

1) aerobic pond เป็นบ่อที่มีออกซิเจนละลายอยู่ทั้งบ่อ บ่อนี้มีความลึกน้อยที่สุดคือประมาณ 0.3 – 0.45 เมตร อาจมีการเพิ่มออกซิเจนด้วยการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ

2) facultative pond เป็นบ่อที่มีออกซิเจนละลายอยู่ทั่วบ่อยกเว้นบริเวณก้นบ่อ ซึ่งเป็นส่วนที่มีสภาพเป็น Anaerobic แต่ส่วนบนของบ่อมีสภาพเป็น aerobic ทำให้สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนเกิดการย่อยในสภาวะไร้อากาศ ความลึกของบ่อนี้ประมาณ 1 – 1.5 เมตร

3) anaerobic pond เป็นบ่อที่มีความลึกที่สุดคือ 4 เมตร มีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำน้อยมาก ใช้สำหรับกักเก็บน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์และตะกอนของแข็งมาก

### 2.1.2.2 การบำบัดด้วยวิธีการหมักก๊าซชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียโดยการหมักด้วยกระบวนการทางชีวภาพ<sup>[10]</sup> ด้วยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic microorganism) โดยให้จุลินทรีย์ทำให้น้ำที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นกระบวนการแบบไร้ออกซิเจน ในถังปฏิกรณ์แรก สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย และในถังปฏิกรณ์ที่สอง กรดไขมันระเหยจะเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) กระบวนการนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถลดความสกปรกของน้ำเสียได้มากถึงร้อยละ 80 และสามารถดกคืนได้เนื่องจากเป็นระบบปิด

แต่เนื่องจากสีของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดซึ่งอยู่ในบ่อกักน้ำเสียบ่อสุดท้ายยังคงมีสีน้ำตาลเข้มอยู่ เนื่องจากในน้ำมีส่วนประกอบของลิกนินและสารประกอบฟีนอลิก<sup>[11]</sup> เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำได้ รวมทั้งทำให้แสงสามารถส่องลงสู่ใต้น้ำได้น้อยลง ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำ และปริมาณออกซิเจนใต้น้ำอาจไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตใต้น้ำด้วย<sup>[12]</sup>

## 2.2 การกำจัดสีของน้ำทิ้ง

การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำได้ด้วยเทคโนโลยีการกำจัดสีทั้งทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพ<sup>[13, 14]</sup> ซึ่งมีตัวอย่างเทคโนโลยีต่างๆ ดังนี้

### 2.2.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (physical technology)

#### 2.2.1.1 การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่มีความพรุนตัวและพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้มีสมบัติการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ที่ดี

#### 2.2.1.2 การกรองด้วยเยื่อแผ่น

การกรองด้วยเยื่อแผ่น (membrane) แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) และนาโนฟิวเตรชัน (nanofiltration) ซึ่งวิธีนาโนฟิวเตรชันมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดเล็กกว่าจึงสามารถแยกสีออกจากน้ำได้ดี ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในวิธีนาโนฟิวเตรชันคือซีโอไลต์เยื่อแผ่น

### 2.2.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (chemical technology)

#### 2.2.2.1 การสร้างตะกอนรวม (coagulation-flocculation)

เป็นการใช้สารเคมีในการรวมตะกอนซึ่งสามารถกำจัดสีในน้ำได้ สารที่นิยมใช้ได้แก่ สารส้ม (aluminium sulfate; alum) และปูนขาว (calcium oxide)

เพื่อให้มีการทำงานที่ดีจะใช้ร่วมกับสารช่วยให้เกิดตะกอนรวม เช่น พอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte)

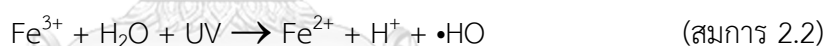
### 2.2.2.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes; AOPs)

เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก และมีความเป็นพิษสูง ซึ่งแบ่งออกได้ 2 วิธี ดังนี้

1) การออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) ใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์สีในน้ำเสีย เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โดยทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet OH$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรง และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์จนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งในวิธีนี้ยังสามารถใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอออนของเหล็ก ( $Fe^{2+/3+}$ ) เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่าปฏิกิริยาเฟนตอน (Fenton) ปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1



และเมื่อ  $Fe^{2+}$  ทำปฏิกิริยาจนหมด สามารถใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ยูวี; UV) ร่วมด้วยเพื่อเปลี่ยน  $Fe^{3+}$  ไปเป็น  $Fe^{2+}$  เรียกว่าปฏิกิริยาเฟนตอนร่วมกับแสง (photo-Fenton process) ดังสมการที่ 2.2



2) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (ozone oxidation) โดยใช้โอโซน ( $O_3$ ) ไปออกซิไดซ์พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีโดยตรง หรือทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล เพื่อไปทำลายพันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี และแตกออกกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและทำให้สีหายไป

นอกจากนั้นยังมีการนำทั้ง 2 กระบวนการข้างต้นมาใช้ร่วมกัน และยังสามารถใช้ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดสีในน้ำเสียได้ดีขึ้น

### 2.2.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (biological technology)

#### 2.2.3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (algae absorption)

โดยสาหร่ายจะดูดซับสีภายใต้สภาวะที่มีแสงเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีให้เป็นไม่มีสี เช่น สาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) มีความสามารถในการดูดซับสีจากโรงงานฟอกย้อมได้

### 2.2.3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (fungi decomposition)

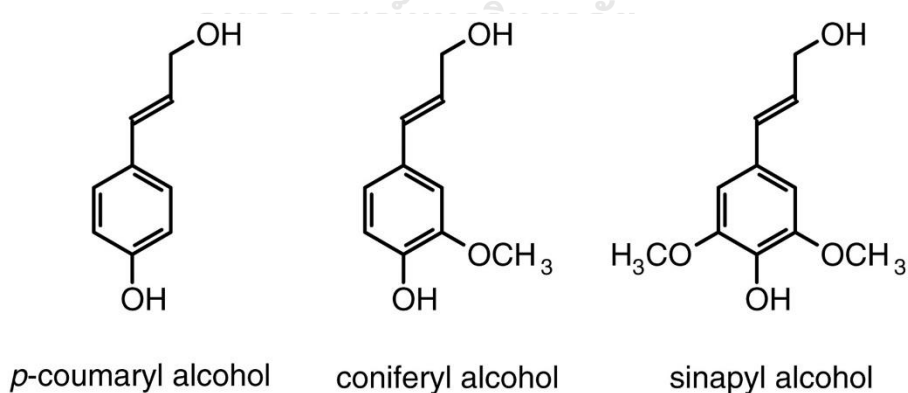
เป็นการสร้างเอ็นไซม์ไปย่อยสลายโมเลกุลสีต่างๆ เช่น เชื้อรา *Asperigillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคส เพอร์แมงกานีสไซลาเนสไปย่อยสลายลิกนินได้

### 2.2.3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (bacteria decomposition)

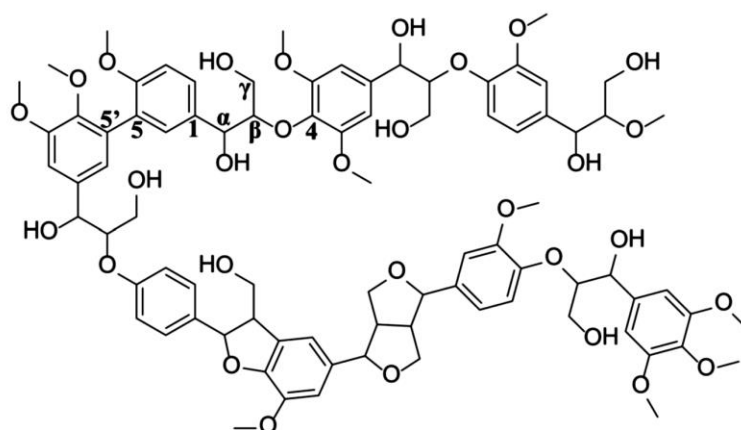
สามารถลดสีหรือย่อยสลายสีได้หลายประเภท เช่น เชื้อ *Pseudomonas sp.*, *Proteus sp.* และ *Klebsiella sp.* สามารถย่อยสีสลายสีรีแอกทีฟเรด 2 ได้

## 2.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนิน<sup>[15-20]</sup> เป็นส่วนประกอบหลักของพืช โดยพบว่าปริมาณของลิกนินที่อยู่ในพืชมีมากถึงร้อยละ 18 – 35 ขึ้นอยู่กับอายุของพืชนั้นๆ ซึ่งลิกนินทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของพืช ซึ่งลิกนินเป็นสารพอลิเมอร์อินทรีย์อสังฐาน มีโครงสร้างขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลมาก ในโครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติกของฟีนอล มาเชื่อมต่อกันแบบ 3 มิติ และมีการเรียงต่อกันอย่างไม่มีรูปแบบ โดยสารประกอบอะโรมาติกพื้นฐานของลิกนินที่มีในธรรมชาติได้แก่ คูมาริลแอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) โคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) และ ซินาปิลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบทั้ง 3 ชนิดนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะชนิดต่างๆ จนกลายเป็นลิกนินที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินที่พบได้ในธรรมชาติ ยิ่งไปกว่านั้นลิกนินเป็นสารประกอบที่มีความต้านทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์และสารเคมีที่สูง จึงทำให้กำจัดสารประกอบลิกนินในน้ำออกได้ยาก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบพื้นฐานของลิกนิน<sup>[21]</sup>



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินในธรรมชาติ<sup>[22]</sup>

การพิจารณาหาลิกนินและสารประกอบที่เกิดจากการย่อยสลายของลิกนินในน้ำมีหลากหลายวิธี<sup>[23-26]</sup> เช่น Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Total Organic Carbon (TOC), Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR), Gas chromatography–mass Spectrometry (GC-MS) และ High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ง่าย ราคาประหยัดและนิยมใช้ในการวิเคราะห์วิธีหนึ่งคือวิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินด้วยเทคนิค UV/Vis Adsorption Spectroscopy ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer โดยพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการมีของกลุ่ม conjugated phenolic ในลิกนิน<sup>[27]</sup> โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนั้นๆ จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายและระยะทางของลำแสงที่เดินทางผ่านสารละลาย มีความสัมพันธ์ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต<sup>[28]</sup> ดังสมการที่ 2.3

$$A = \epsilon bc$$

(สมการ 2.3)

A = ค่าการดูดกลืนแสง

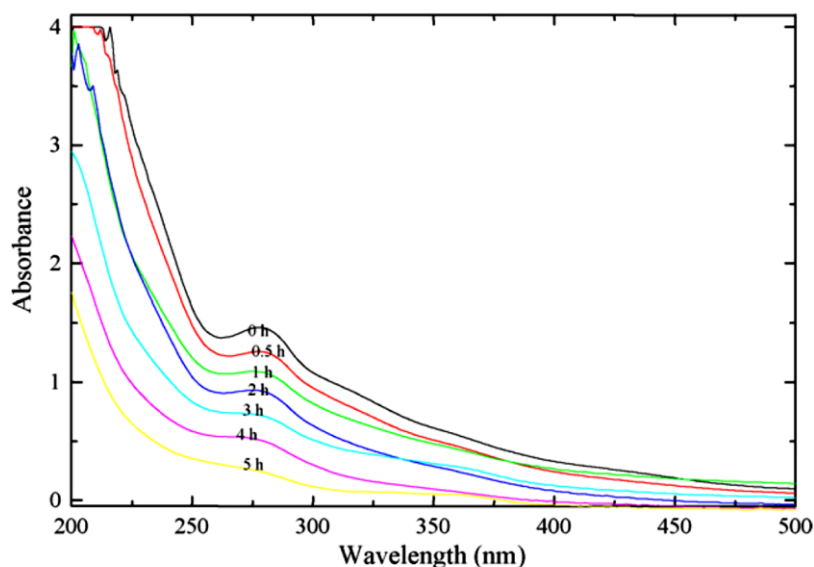
$\epsilon$  = ค่าคงที่การดูดกลืนแสงของสารละลายเข้มข้น 1 โมลาร์ (ลิตรต่อเซนติเมตรต่อโมล)

b = ระยะทางของลำแสงที่เดินทางผ่านสารละลาย (เซนติเมตร)

c = ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลาร์, โมลต่อลิตร)

โดยมีลักษณะของแถบการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไปเนื่องจากลิกนินถูกย่อยสลายที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.4





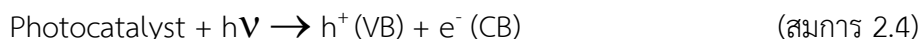
รูปที่ 2.4 แถบการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินเมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนไปเนื่องจากลิกนินถูกย่อยสลายที่เวลาต่างๆ<sup>[29]</sup>

ลิกนินถูกพบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเป็นปริมาณมาก รวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล<sup>[30, 31]</sup> เนื่องจากวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นพืช จึงทำให้มีลิกนินปะปนกับน้ำออกมาจากกระบวนการผลิต สน้ำตาลเข้มข้นที่อยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มนั้นเกิดจากสารอินทรีย์กลุ่มลิกนิน<sup>[11]</sup> ซึ่งมีรายงานว่าสารประกอบลิกนิน-แทนนินที่เจือปนในน้ำอาจมีผลต่อการหายใจของปลา ส่งผลให้เกิดการตายของปลาในแหล่งน้ำได้<sup>[32]</sup> มีงานวิจัยมากมายที่พยายามลดสีของน้ำเสียที่เกิดจากลิกนินด้วยวิธีต่างๆ ตัวอย่างเช่น การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี<sup>[33]</sup> วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์<sup>[34]</sup> กระบวนการสร้างตะกอนรวม<sup>[12]</sup> และอีกวิธีที่เป็นที่นิยมมากคือวิธีการย่อยสลายด้วยโฟโตแคตตาลิสต์ชนิดต่างๆ แต่เนื่องจากน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของลิกนินมักจะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งอาจส่งผลต่อการทำงานของวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ซึ่งต้องการแสงเป็นตัวกระตุ้น ดังนั้นการพัฒนาให้วัสดุโฟโตแคตตาลิสต์สามารถลอยอยู่บริเวณผิวน้ำได้ อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินสูงขึ้น

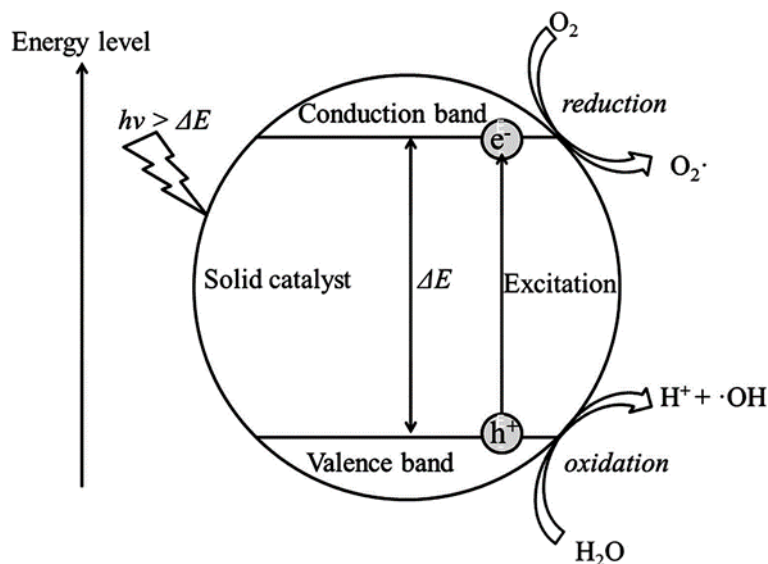
## 2.4 โฟโตแคตตาลิสต์ (photocatalyst)

โฟโตแคตตาลิสต์หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคือสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่ย่อยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์บางชนิดได้<sup>[35]</sup> เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง และเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่าปฏิกิริยาใช้ตัวเร่งโดยอาศัยแสง หรือปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิติก (photocatalytic reaction)<sup>[36]</sup> โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดจากการที่โฟโตแคตตาลิสต์ได้รับพลังงานแสงหรือโฟตอน (photon) ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron,  $e^-$ ) จากแถบวาเลนซ์ (valence band, VB) ไปยังแถบ

ตัวนำ (conduction band, CB) ก่อให้เกิดโฮล (hole,  $h^+$ ) ขึ้นในแถบวาเลนซ์ของโมเลกุล (สมการที่ 2.4)



กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ภายใต้แสงกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของโฟโตแคตาไลสต์ภายใต้แสงกระตุ้น<sup>[37]</sup>

หลังจากนั้นโฮลในแถบวาเลนซ์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำที่สัมผัสกับผิวของโฟโตแคตาไลสต์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกซิลเรดิคัล (สมการที่ 2.5) ส่วนอิเล็กตรอนในแถบตัวนำ จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่สัมผัสกับผิวของโฟโตแคตาไลสต์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นซูเปอร์ออกไซด์ ( $\bullet O_2^-$ ) (สมการที่ 2.7) ซึ่งซูเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสามารถในการรีดิวซ์และออกซิไดซ์ที่ดี หลังจากนั้นซูเปอร์ออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $HO_2\bullet$ ) (สมการที่ 2.8) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และออกซิเจน (สมการที่ 2.9) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบตัวนำหรือจากซูเปอร์ออกไซด์ได้ และเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (สมการที่ 2.10 และ 2.11) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญในการทำลายพันธะของสารอินทรีย์ (สมการที่ 2.12) และเกิดต่อไปจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาคือ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในบางครั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นอาจเกิดการรวมกลับเข้าหากันใหม่ (electron-hole recombination) ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกเกิดขึ้นได้ไม่ดี และส่งผลให้ประสิทธิภาพของโฟโตแคตาไลสต์นั้นลดน้อยลง<sup>[38-40]</sup>

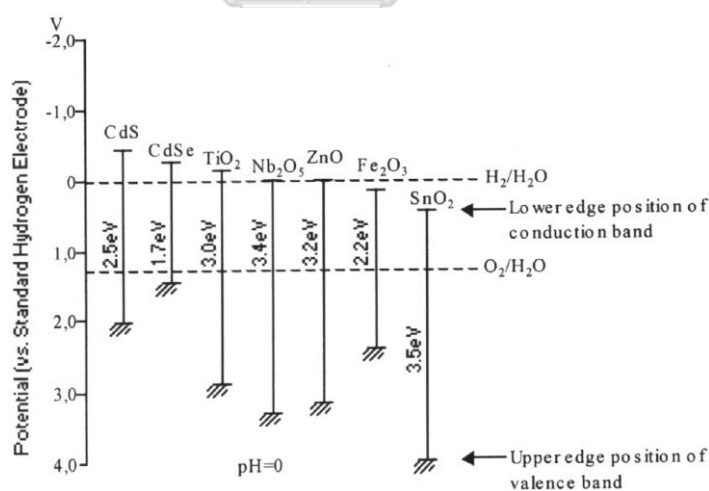
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแสงที่มากกว่าระดับโฟโตแคตาไลสต์มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ของสารกึ่งตัวนำนั้น ช่องว่างแถบพลังงานคือระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความแตกต่างกันของระดับช่องว่างพลังงานแถบวาเลนซ์ (VB) และแถบตัวนำ (CB) ของวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ชนิดต่างๆ<sup>[41]</sup>

โดยช่องว่างแถบพลังงานมีค่าแปรผันกลับกับความยาวคลื่นแสง แสงที่มีพลังงานมากพอที่จะสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้นั้น คำนวนจากสมการความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นแสง<sup>[42]</sup> ดังสมการที่ 2.13 นอกจากนั้น ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำจำเป็นต้องมีค่า

ครอบคลุมค่าศักย์ไฟฟ้าคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ของปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดด้วย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และเกิดตัวออกซิไดซ์ตามที่ต้องการ

$$E_g (J) = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{สมการ 2.13})$$

โดยที่  $E$  = พลังงานโฟตอน (จูล)

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ ( $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที)

$\nu$  = ความถี่ (วินาที<sup>-1</sup>)

$c$  = ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นแสง (เมตร)

การใช้โฟโตแคทาไลสต์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียถือได้ว่าเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเช่นกัน<sup>[43]</sup>

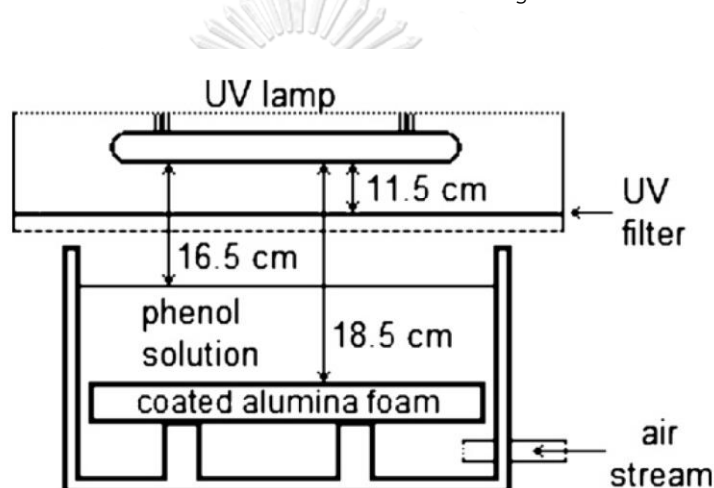
## 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>)

ไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[44, 45]</sup> เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม (titanium; Ti) จำนวน 1 โมล และออกซิเจน (oxygen; O) จำนวน 2 โมล ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ตามธรรมชาติมีรูปผลึกหรือเฟสทั้งหมด 3 รูป คือ รูไทล์ (rutile) อนาเทส (anatase) และบรูไคต์ (brookite) ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุโฟโตแคทาไลสต์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้ย่อยสลายสารพิษทั้งในน้ำและอากาศ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (3.2 eV) สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 388 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงยูวี (ความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตร) นอกจากนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีความเสถียรและไม่เป็นพิษจึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในด้านโฟโตแคทาไลสต์มากที่สุดชนิดหนึ่งคือไทเทเนียมไดออกไซด์ พี25 (Degussa P25) ประกอบด้วยไทเทเนียมที่มีรูปผลึกแบบอนาเทสร้อยละ 70 และรูไทล์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก<sup>[41]</sup>

แต่เนื่องจากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรมีปัญหาในด้านการเคลื่อนย้าย การแยกผงหลังการบำบัดและการนำกลับมาใช้ซ้ำ จึงมีหลายงานวิจัยที่พยายามนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาตรึงรูปหรือเคลือบอยู่บนผิวของวัสดุอื่นๆ เช่น high-density polyethylene (HDPE)<sup>[46]</sup> ผ้าใยแก้ว<sup>[47, 48]</sup> และโพลีซิลิคอนคาร์ไบด์<sup>[49]</sup>

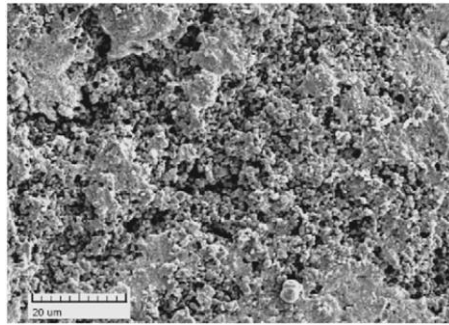
Vargova และผู้ร่วมวิจัย<sup>[50]</sup> ได้ศึกษากระบวนการเชิงแสงในการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มของฟิล์มหนาของไทเทเนียมไดออกไซด์บนอะลูมินาโพลีที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่ไขว้กันเหมือนแห โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เคลือบลงบนโพลีอะลูมินาด้วยวิธีการชุบเคลือบ ในการเคลือบไทเทเนียม

ไดออกไซด์ P25 นั้น ทำโดยผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์และสารช่วยกระจายตัว บดผสมด้วยการบดด้วยลูกบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอะลูมินาโฟมมาชุบในสารแขวนลอยเป็นเวลา 5 นาที และชุบอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที ในบ่ออัลตราโซนิก ทำให้ชิ้นงานแห้งด้วยการอบในไอน้ำร้อน สุดท้ายนำโฟมอะลูมินาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มาเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเผา 60 องศาเซลเซียสต่อนาที และนำไปทดสอบการย่อยสลายฟีนอลความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ภายใต้หลอดยูวี 400 วัตต์ โดยมีการติดตั้งการทดสอบดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าการใช้ลมเป่าเข้าไปในสารละลายเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายเข้าไปในโพรงเปิดของโฟมอะลูมินา และตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของสารละลายฟีนอล โดยการพิจารณาค่าปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon)

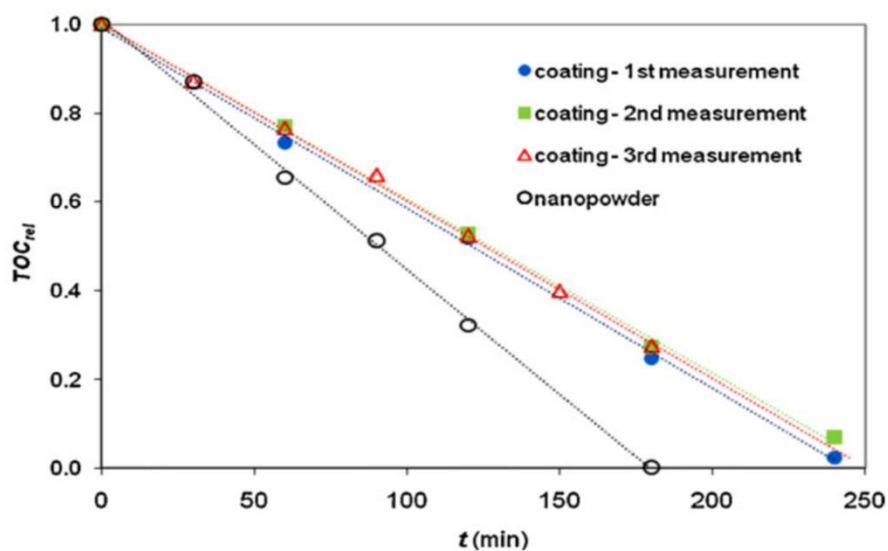


รูปที่ 2.7 ภาพแสดงการติดตั้งการทดสอบการย่อยสลายฟีนอลภายใต้หลอดยูวี<sup>[50]</sup>

จากผลการทดลองพบว่าโฟมอะลูมินาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีความหนาของชั้นเคลือบอยู่ในช่วง 5 – 10 ไมโครเมตร ผิวเคลือบมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.8 และมีผลการย่อยสลายฟีนอลโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และการใช้โฟมอะลูมินาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 หลังเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.9 จากผลการทดลองพบว่าการใช้โฟมอะลูมินาเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายฟีนอลในน้ำได้ แต่มีอัตราการย่อยสลายที่ต่ำกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 2.8 พื้นผิวของเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 บนโพลีอะลูมินาหลังเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส<sup>[50]</sup>



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบผลการย่อยสลายฟีนอลระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และโพลีอะลูมินาที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 หลังการใช้งานซ้ำ<sup>[50]</sup>

นอกจากนั้นยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกได้ภายใต้การฉายแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าและมีพลังงานน้อยกว่าแสงยูวี และยังช่วยให้ใช้งานวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ได้ด้วย การเพิ่มประสิทธิภาพนี้ทำได้หลายวิธี<sup>[36]</sup> เช่นการเติมด้วยโลหะ (metal doping) การเติมด้วยอโลหะ (anion doping) การต่อประกับด้วยวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ที่มีแถบพลังงานต่ำกว่า (coupling) และการทำอนุภาคแกนกลางและเปลือกหุ้ม (core/shell particle) ในที่นี้ขอยกตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้การทำอนุภาคแกนกลางและเปลือกหุ้มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์คือ Ullah และผู้ร่วมวิจัย<sup>[51]</sup> ได้ปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตตาไลติกของอนุภาคขนาดนาโนที่มีซิลิกาเป็นแกนกลางและมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้ม (core/shell SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanoparticle) โดยทำการย่อยสลายคริสตอลไวโอเลตด้วยอนุภาคขนาดนาโนที่มีซิลิกาเป็นแกนกลาง



และมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้มภายใต้แสงจากหลอดซินอนโดยกรองคลื่นแสงช่วงยูวีบีและยูวีซีออก จากผลการทดลองพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 30 สามารถย่อยสลายคริสตอลไวโอเล็ตได้เร็วที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 20 และ 35 และยังพบว่าอนุภาคนาโนที่มีซิลิกาเป็นแกนกลางและมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้มมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว

## 2.6 ไพไรต์ (pyrite)

ไพไรต์<sup>[52]</sup> หรือไอรอนไดซัลไฟด์ ( $\text{FeS}_2$ ) ในบางครั้งเรียกว่า ทองของคนโง่ (Fools Gold) เนื่องจากมีสีและรูปร่างคล้ายทอง ไพไรต์คือแร่ที่พบได้ในธรรมชาติ และมักพบเกิดร่วมกับแร่มาร์คาไซต์ (marcasite) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกันแต่ต่างกันที่ระบบผลึก

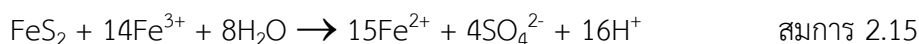
มาร์คาไซต์เป็นแร่ที่นำมาทำเป็นเครื่องประดับมากมายเนื่องจากผิวมีการสะท้อนแสงที่ดี โดยสามารถใช้ตกแต่งร่วมกับเครื่องประดับชนิดอื่นๆ เช่น เครื่องเงิน และเพชรเทียมที่ทำจากเซอร์โคเนีย รูปที่ 2.10 (ก) แสดงลักษณะของแร่มาร์คาไซต์ และ (ข) เข็มกลัดมาร์คาไซต์ที่ทำจากโลหะเงินและไพไรต์ โดยในกระบวนการเจียรระไนเครื่องประดับมาร์คาไซต์จะเกิดเศษของมาร์คาไซต์ขึ้น ซึ่งอาจมีการเจือปนของสารต่างๆ เช่น สารหล่อลื่น ขี้ผึ้ง และอาจรวมถึงเศษอัญมณีที่ใช้ตกแต่งร่วมกัน เช่น เพชรเทียมที่ทำจากเซอร์โคเนีย เป็นต้น เนื่องจากการเจียรระไนเป็นการใช้แรงเพื่อเสียดสีหรือขัดผิวของมาร์คาไซต์ จึงมีความร้อนและแรงกระทำต่อมาร์คาไซต์ ส่งผลให้มาร์คาไซต์เปลี่ยนเฟสเป็นไพไรต์<sup>[53]</sup>



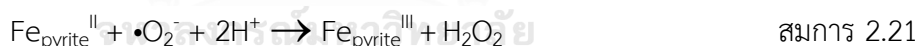
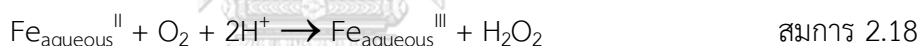
รูปที่ 2.10 (ก) ลักษณะของแร่มาร์คาไซต์ (ข) เข็มกลัดมาร์คาไซต์ที่ทำจากโลหะเงินและไพไรต์<sup>[54, 55]</sup>

เนื่องจากไพไรต์มีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดี มีแถบพลังงานแคบเพียง 0.95 อิเล็กตรอนโวลต์ ไม่เป็นพิษ และอยู่ร่วมกับสิ่งแวดล้อมได้<sup>[56]</sup> นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาสมบัติทางผิวของไพไรต์ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ<sup>[57, 58]</sup> พบว่าเมื่อไพไรต์อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีน้ำและ

ออกซิเจน ไฟไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ โดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ดังสมการที่ 2.14 – 2.16



และอาจผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ในกระบวนการออกซิเดชันดังสมการ 2.17 – 2.23 ส่วนที่สภาวะ pH ต่ำกว่า 3 พบว่าเฟอร์ริสไอออน ( $\text{Fe}^{\text{II}}$ ) จะละลายออกมาทันทีเมื่อกระจายไฟไรต์ในน้ำ และทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยา Haber-Weiss ได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สมการที่ 2.17 และ 2.18) ซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนทอนขึ้นได้ (สมการ 2.19) และเมื่อ pH อยู่ในช่วงกรดถึงกลางปฏิกิริยาการปลดปล่อยเฟอร์ริสไอออนจะหยุดและเปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันทันที (สมการ 2.20) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางจะมีเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{\text{III}}$ ) เกิดที่ผิวของไฟไรต์ ซึ่งการเกิดเฟอร์ริกไอออนอาจส่งผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ (สมการที่ 2.21 และ 2.22) ยิ่งไปกว่านั้น ไฮดรอกซิลเรดิคัลยังสามารถรวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ (สมการที่ 2.23)

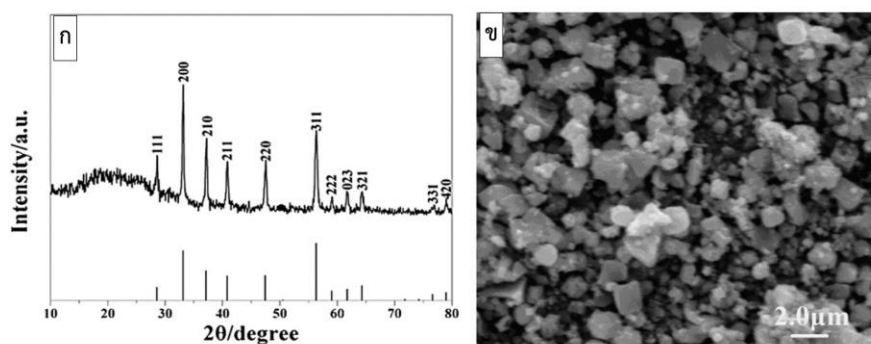


จากการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลจากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงสามารถเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำได้ และยังสามารถเกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยแสงอีกด้วย

มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการใช้ไฟไรต์ในการดูดซับและย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ตัวอย่างเช่น Liu และผู้ร่วมวิจัย<sup>[59]</sup> ได้สังเคราะห์และทดสอบสมบัติการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของไฟไรต์ โดยการสังเคราะห์ไฟไรต์ด้วยวิธีการโซลโวเทอร์มอล (solvothermal) ที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เกิดเฟสไฟไรต์ที่สมบูรณ์ที่สุด โดยองค์ประกอบทางเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคของไฟไรต์แสดงดังรูปที่ 2.11 และนำไปทดสอบการดูดซับและโฟโตแคตตาไลติก โดยนำไปทดสอบกับสารละลาย

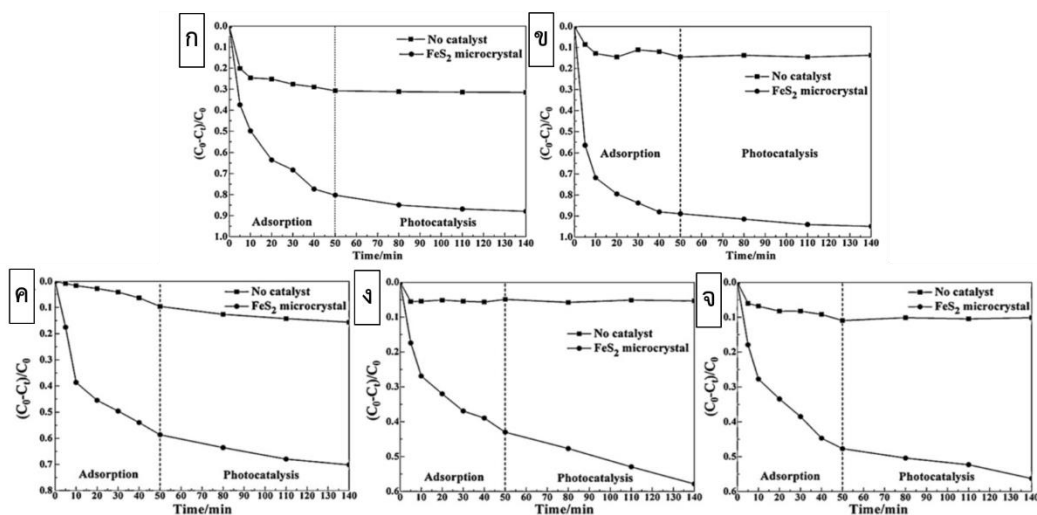


5 ชนิด คือ เมทิลีน บลู (methylene blue) ซาฟรานีน ที (safranin T) เมทิลออเรนจ์ (methyl orange) โรดามีน บี (rhodamine B) และ ไพโรนีน บี (pyronine B) ความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยใช้ผงไฟไรต์ 50 มิลลิกรัม ปั่นผสมในที่มืดเป็นเวลา 50 นาที เพื่อให้การดูดซับและการคายออกอยู่ในสภาวะสมดุล ก่อนนำไปฉายแสงด้วยหลอดยูวี 40 วัตต์



รูปที่ 2.11 (ก) XRD pattern และ (ข) โครงสร้างทางจุลภาคของไฟไรต์<sup>[59]</sup>

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.12 (ก) – (จ) พบว่าความเข้มข้นของสารละลายทุกชนิดลดลง โดยการใช้ผงไฟไรต์ที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากสมบัติทางเคมีพื้นผิวและการดูดซับของผงไฟไรต์ และหลังจากฉายแสงพบว่าอัตราการย่อยสลายของสารละลายแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน โดยอัตราการย่อยสลายของโรดามีน บี เมทิลออเรนจ์ ไพโรนีน บี เมทิลีน บลู และ ซาฟรานีน ที มีค่าร้อยละ 14.8 11.5 8.6 7.7 และ 6 ตามลำดับ โดยเรียงจากสารละลายมีอัตราการย่อยสลายจากมากไปน้อย และเมื่อพิจารณาอัตราการย่อยสลายรวมพบว่าอัตราการย่อยสลายของสารซาฟรานีน ที เมทิลีน บลู เมทิลออเรนจ์ โรดามีน บี และไพโรนีน บี มีค่าร้อยละ 94.8 87.9 70.1 57.8 และ 56.3 ตามลำดับ โดยเรียงจากสารละลายมีอัตราการย่อยสลายจากมากไปน้อย



รูปที่ 2.12 อัตราการย่อยสลายของสารละลายสีย้อม 5 ชนิด (ก) เมทิลีน บลู (ข) ซาฟรานีน ที (ค) เมทิลออเรนจ์ (ง) โรดามีน บี และ (จ) ไพโรนีน บี<sup>[59]</sup>

หลังจากนั้นนำสารละลายที่มีผงไฟไรต์กระจายตัวหลังการทดสอบการย่อยสลายด้วยแสง ไปเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าอัตราการย่อยสลายของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นทุกสารละลาย เนื่องจากการดูดซับของผงไฟไรต์มีประสิทธิภาพสูง โดยมีข้อมูลรวมของอัตราการย่อยสลายของสารละลายทั้ง 5 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราการย่อยสลายของสีย้อมชนิดต่างๆ ด้วยผงไฟไรต์<sup>[59]</sup>

| Dyes           | Adsorption ratio (after 50 min) | Photocatalytic degradation ratio (after 90 min) | Degradation ratio (after 140 min) | Degradation ratio (after 24 h) |
|----------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------|
| Methylene blue | 80.2%                           | 7.7%  | 87.9%                             | 99.2%                          |
| Safranin T     | 88.8%                           | 6%  | 94.8%                             | 99.5%                          |
| Methyl orange  | 58.6%                           | 11.5%   | 70.1%                             | 87.9%                          |
| Rhodamine B    | 43.0%                           | 14.8%   | 57.8%                             | 97.0%                          |
| Pyronine B     | 47.7%                           | 8.6%  | 56.3%                             | 97.9%                          |

รวมทั้งการใช้ไฟไรต์ร่วมกับไทเทเนียมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยการแยกน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก<sup>[60]</sup> โดยการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีไฟไรต์เป็นแกนกลางและมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้ม (core/shell  $\text{FeS}_2/\text{TiO}_2$ ) จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีไฟไรต์เป็นแกนกลางและมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้มที่มีปริมาณไฟไรต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ปริมาณ 9.8 มิลลิโมล ในเวลา 10 ชั่วโมง ภายใต้การฉายด้วยแสงยูวี ซึ่งมากกว่าการใช้เพียงไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไฟไรต์เท่านั้น เนื่องจากวัสดุที่สังเคราะห์ได้มีค่าแถบพลังงานต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์

## 2.7 ถ่านกัมมันต์ (activated Carbon)

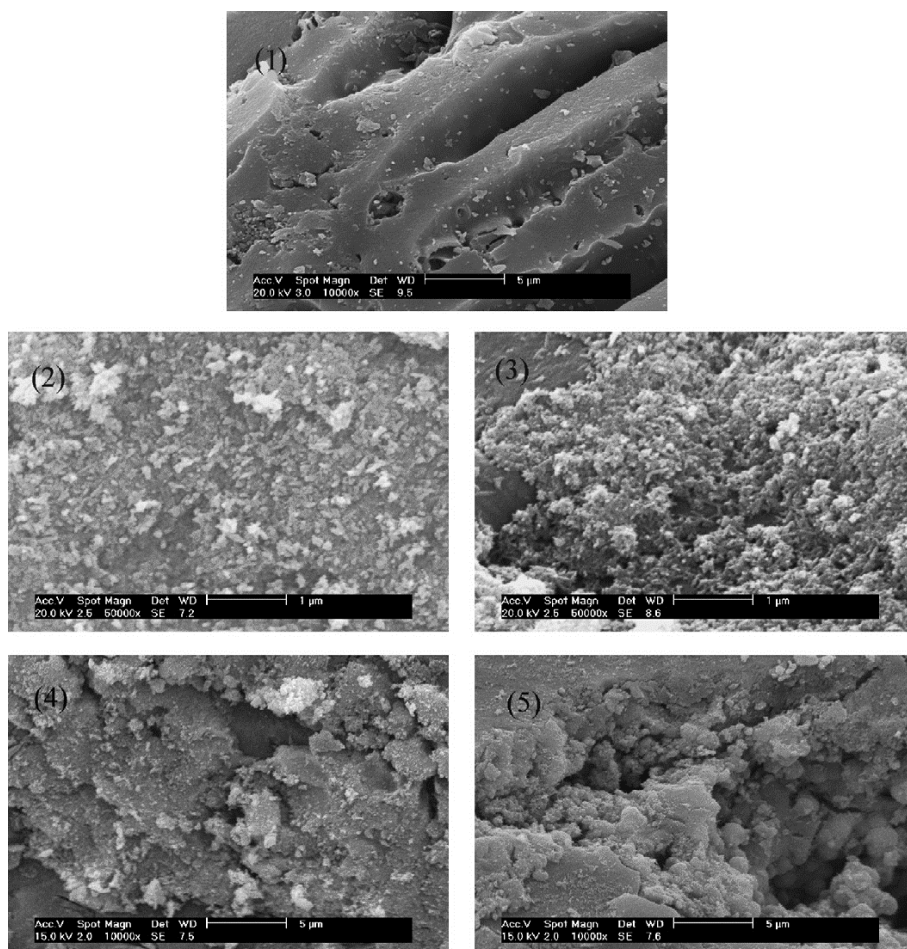
ถ่านกัมมันต์<sup>[61-63]</sup> เป็นวัสดุคาร์บอนอสัณฐานที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนตั้งแต่ขนาดเล็ก (นาโนเมตร) จนถึงขนาดใหญ่ (ไมโครเมตร) ดังรูปที่ 2.13 <sup>[64]</sup> และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงประมาณ 950 - 1000 ตารางเมตร/กรัม ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุช่วยดูดซับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรือในอากาศได้เป็นอย่างดี ถ่านกัมมันต์ผลิตได้โดยนำวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนเช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว เป็นต้น มาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสีดำและความพรุนตัวสูง



รูปที่ 2.13 ลักษณะรูพรุนภายในอนุภาคถ่านกัมมันต์<sup>[64]</sup>

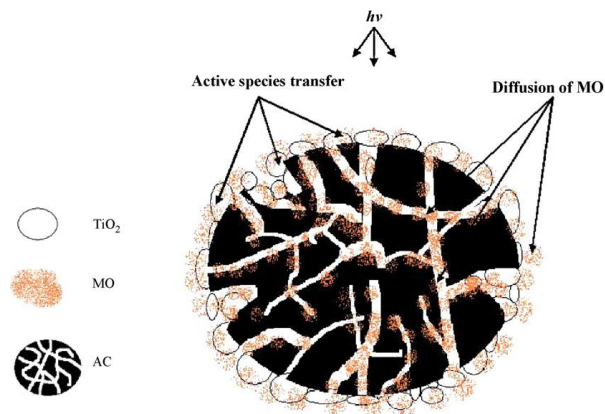
มีงานวิจัยมากมายที่นำถ่านกัมมันต์มาศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ รวมถึงลิกนินในน้ำ ตัวอย่างเช่น Mohan และ Karthikeyan<sup>[34]</sup> ได้ศึกษาการกำจัดสีของลิกนินและแทนนินจากสารละลายด้วยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 200 มิลลิกรัม เติมนลงในสารละลายแทนนิน/ลิกนิน ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่าสีของสารละลายที่เกิดจากแทนนินและลิกนินสามารถลดลงได้มากถึงร้อยละ 74 และ 86 ภายในเวลา 1 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำถ่านกัมมันต์มาทำงานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก<sup>[65-68]</sup> ตัวอย่างเช่น Wang และผู้ร่วมวิจัย<sup>[69]</sup> ได้ศึกษาการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยวัสดุเชิงประกอบนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงรูบบนถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนตัวแตกต่างกัน โดยเติมถ่านกัมมันต์ขนาด 0.15 ถึง 0.25 มิลลิเมตร ลงในสารละลายสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ นำสารละลายที่ผสมแล้วไปสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเผาที่ 600 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ได้วัสดุเชิงประกอบรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางจุลภาคของ (1) ถ่านกัมมันต์ (2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (3) (4) และ (5) วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม/ถ่านกัมมันต์<sup>[69]</sup>

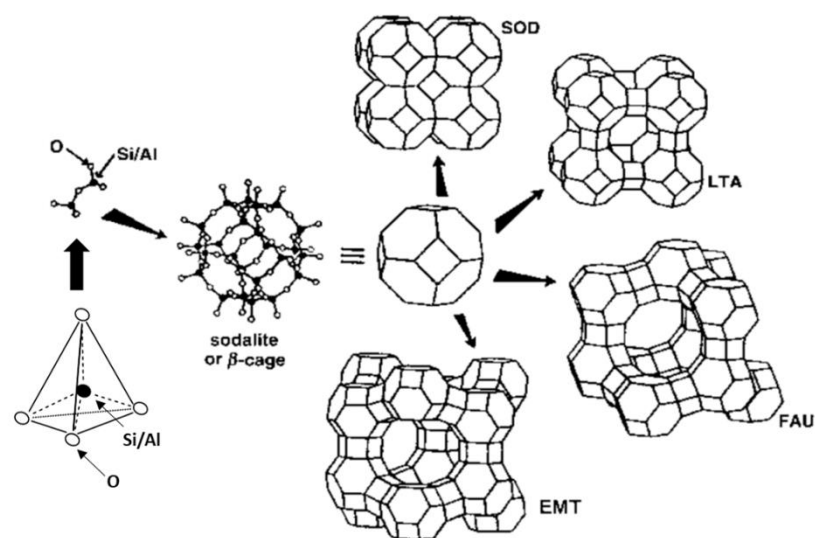
เห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ปกคลุมบนผิวของถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 0.5 กรัม ที่ผ่านการทำให้อิมพัลส์ด้วยการแช่ในสารละลายเมทิลลอเรนจ์ ไปทดสอบการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 250 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดอัลตราไวโอเลตความเข้ม 300 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าการใช้วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ถ่านกัมมันต์ สามารถย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ได้ดีกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณเท่ากัน เนื่องจากการช่วยดูดซับของถ่านกัมมันต์นำพาโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์มาสัมผัสที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งถูกตรึงอยู่ที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์และปริมาณเมโซพอร์ (mesopore) ของถ่านกัมมันต์มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์



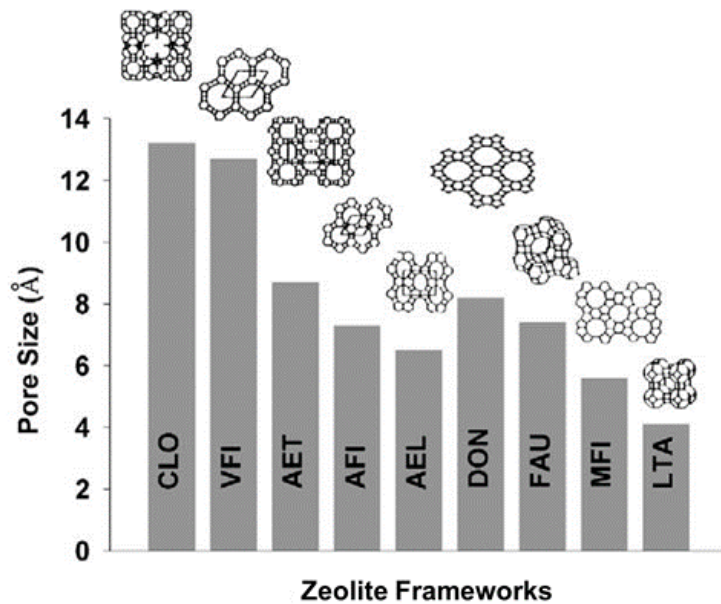
รูปที่ 2.15 ภาพวาดแสดงการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์  
ตรึงบนถ่านกัมมันต์<sup>[69]</sup>

## 2.8 ซีโอไลต์ (zeolite)

ซีโอไลต์<sup>[70, 71]</sup> คือวัสดุพื้นฐานที่ประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม (aluminum; Al) ซิลิคอน (silicon; Si) และออกซิเจน (oxygen; O) มาประกอบเป็นหน่วยย่อยของซีโอไลต์ คือ  $[\text{SiO}_4]^{4+}$  และ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  โดยมีอะตอมของอะลูมิเนียมหรือซิลิคอน 1 อะตอมอยู่ตรงกลาง และออกซิเจน 4 อะตอมอยู่ที่มุมของทรงสี่หน้า (tetrahedron) หน่วยย่อยทั้ง 2 ชนิดนี้มาประกอบกันเป็นโครงสร้างผลึก โดยต่อกันที่มุมของทรงสี่หน้า และเกิดเป็นโครงร่าง 3 มิติ ดังรูปที่ 2.16 และก่อให้เกิดโพรงขนาดต่างๆ ขึ้น ซึ่งขนาดที่แตกต่างกันขึ้นกับประเภทของซีโอไลต์ โดยมีขนาดตั้งแต่ 2 – 10 อังสตรอม (Å) ดังรูปที่ 2.17

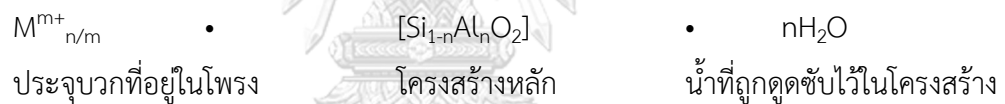


รูปที่ 2.16 ลักษณะการสร้างโครงร่างของซีโอไลต์ชนิด SOD LTA EMT และ FAU<sup>[70]</sup>



รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบขนาดโพรงของซีโอไลต์แต่ละชนิด<sup>[70]</sup>

โดยช่องว่างหรือโพรงจะมีประจุลบและถูกทำให้เสถียรและสมดุลได้เมื่อมีประจุบวกเข้ามาในโพรง องค์ประกอบของซีโอไลต์มีองค์ประกอบอยู่ 3 ส่วน คือ

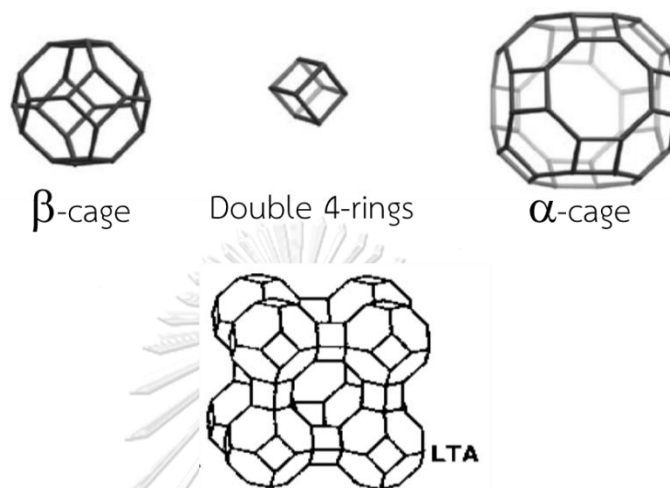


ประจุบวกที่มีอยู่ในโพรงนั้น ส่วนมากเป็นประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม ลิเทียม โพแทสเซียม เป็นต้น จากที่ซีโอไลต์มีรูปร่างของโครงสร้างและขนาดโพรงที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ซีโอไลต์มีสมบัติที่แตกต่างกัน รวมถึงวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานที่แตกต่างกันด้วย ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)<sup>[72]</sup> และความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ (adsorption) จึงมีการนำซีโอไลต์ไปใช้งานที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย<sup>[73]</sup> และการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในงานต่างๆ

มีงานวิจัยที่นำซีโอไลต์มาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ<sup>[74]</sup> โดย Hussein และผู้ร่วมวิจัย ได้ศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์ 4 ชนิด ที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่างกัน ในการดูดซับอนินและอนุพันธ์ของอนินในน้ำที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน พบว่าซีโอไลต์แต่ละชนิดมีความสามารถดูดซับสารได้แตกต่างกัน โดยดูดซับอนินได้ถึงร้อยละ 50 และดูดซับอนุพันธ์ของอนินได้ร้อยละ 69.5 ขึ้นกับสมบัติต่างๆ ดังนี้ พื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และชนิดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

### ซีโอไลต์ เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์ เอ หรือ ซีโอไลต์ LTA คือซีโอไลต์ที่มีสัดส่วนของซิลิคอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 มีโพรงขนาด 4.1 อังสตรอม โครงสร้างประกอบด้วย หน่วย double 4-rings กรงโซดาไลต์หรือกรงชนิดบีต้า ( $\beta$ -cage) และ กรงชนิดแอลฟา ( $\alpha$ -cage) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างซีโอไลต์เอ และหน่วยย่อย<sup>[70]</sup>

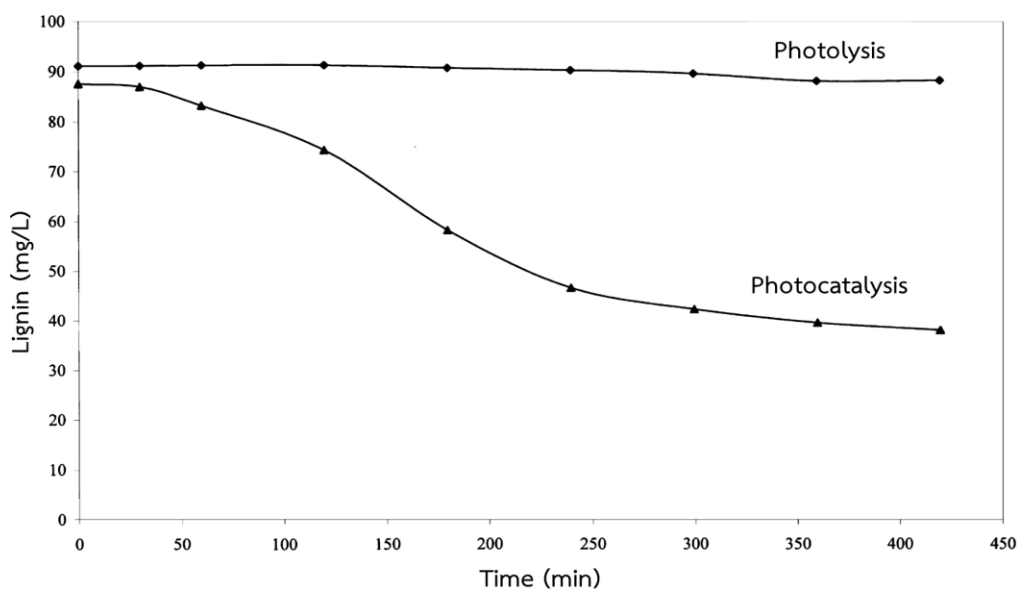
ซีโอไลต์ เอ มีสมบัติเด่นคือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุที่ดี และการดูดซับน้ำ จึงได้รับความนิยมนำไปใช้ในการบำบัดน้ำ และเป็นสารช่วยลดความกระด้างของน้ำด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ<sup>[73, 75]</sup> โดยการแลกเปลี่ยนโมโนวาเลนต์ไอออนในซีโอไลต์ ( $\text{Na}^+$  หรือ  $\text{K}^+$ ) กับไดวาเลนต์ไอออนในน้ำ ( $\text{Mg}^{2+}$  หรือ  $\text{Ca}^{2+}$ ) ทำให้ลดความกระด้างของน้ำลง

Petkowicz และผู้ร่วมวิจัย<sup>[76]</sup> ศึกษาการย่อยสลายเมทิลีน บลู ด้วยซีโอไลต์โซเดียม เอ ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงอยู่บนผิว โดยใช้ไทเทเนียมเทตระคลอไรด์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเปรียบเทียบผลกับไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทังสแตนฮาโลเจน 250 วัตต์ โดยใช้ผงตัวอย่าง 0.1 กรัม ในสารละลายเมทิลีน บลู ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 150 มิลลิลิตร จากการทดลองพบว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมร้อยละ 10 สามารถย่อยสลายสารละลายเมทิลีน บลู ได้ร้อยละ 84 ภายในเวลา 60 นาที และลดความเข้มข้นของเมทิลีนบลูได้เร็วกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ในช่วง 10 นาทีแรกของการฉายแสง

### 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ksibi และผู้ร่วมวิจัย<sup>[77]</sup> ได้ศึกษาการย่อยสลายลิกนินจากน้ำยางดำโดยใช้ระบบแสงอัลตราไวโอเล็ตและไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการทดลองนี้ได้เตรียมลิกนินจากน้ำยางดำและเตรียม

เป็นสารละลายลิกนินความเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า pH เท่ากับ 8.2 และนำไปทดสอบการย่อยสลายด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงยูวี ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีชื่อทางการค้าคือ Degussa P25 โดยกระจายผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัม ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ในรีแอกเตอร์แบบเปิดที่มีน้ำหล่อเย็นเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นในสารละลายลิกนินระหว่างการฉายแสง โดยนำไปปั่นกวนในที่มีเป็นเวลา 40 นาที เพื่อให้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อิมัลชันด้วยลิกนิน ก่อนจะฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีกำลัง 125 วัตต์ การพิจารณาความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารละลายลิกนินทำได้โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer และได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับสารละลายลิกนินที่ไม่ได้เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 จากผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 สามารถสลายลิกนินได้ถึงร้อยละ 56 ภายในเวลา 420 นาที ในขณะที่ในระบบที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของลิกนินลดลงเพียงแค่ร้อยละ 3.3 เท่านั้น ดังรูปที่ 2.19 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าลิกนินย่อยสลายได้โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงยูวี โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

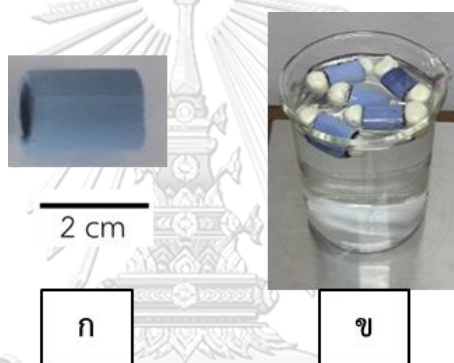


รูปที่ 2.19 การสลายตัวของลิกนินภายใต้การฉายแสงยูวี แบบมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา<sup>[77]</sup>

เชมกร โกมลศิริกุล<sup>[78]</sup> ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรม โดยมุ่งเน้นไปที่การกำจัดสาร



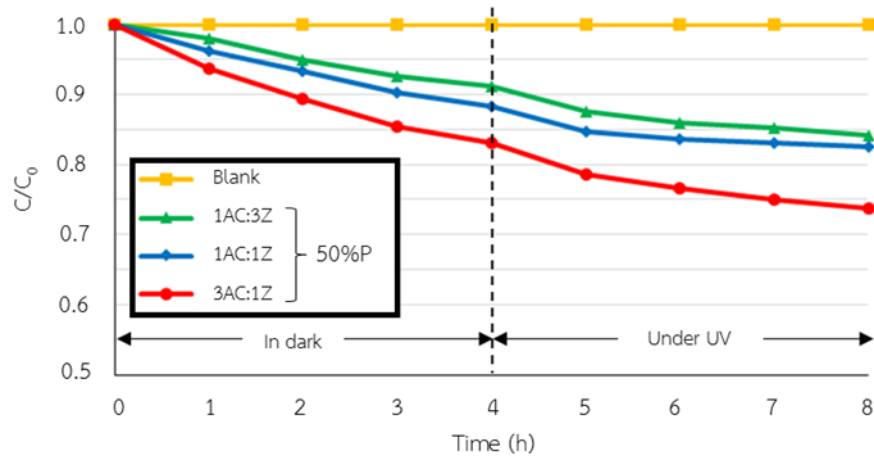
พินอล ในการทดลองนี้ ได้ขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ด้วยวิธีการบดผสมถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ โซเดียม เอ ในสัดส่วนต่างๆ และพินอลเรซินปริมาณต่างๆ ซึ่งพินอลเรซินทำหน้าที่เป็นตัวช่วยประสานในชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้จากการบดมาผสมกับสารละลายตัวเชื่อมประสาน เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีลักษณะเป็นเนื้อโด (Dough) ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยชิ้นงานที่ได้หลังอัดรีดมีรูปร่างเป็นท่อกลวงทรงกระบอกยาว หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปอบและตัดให้ชิ้นงานที่มีความยาว 2 เซนติเมตร ก่อนที่จะเคลือบด้วยสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ร้อยละ 10 ลงบนผิวของชิ้นงาน ด้วยวิธีการพ่นเคลือบ และเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบบริดจ์ขึ้น ยืนไฟเป็นเวลา 1 – 3 ชั่วโมง และสอดใส่ชิ้นงานด้วยโพรบโพลียูรีเทนเหลวด้วยวิธีการฉีดยาเพื่อให้ชิ้นงานลอยอยู่บนผิวน้ำได้ และช่วยให้ง่ายต่อการสัมผัสแสงยูวี ลักษณะชิ้นงานดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข)



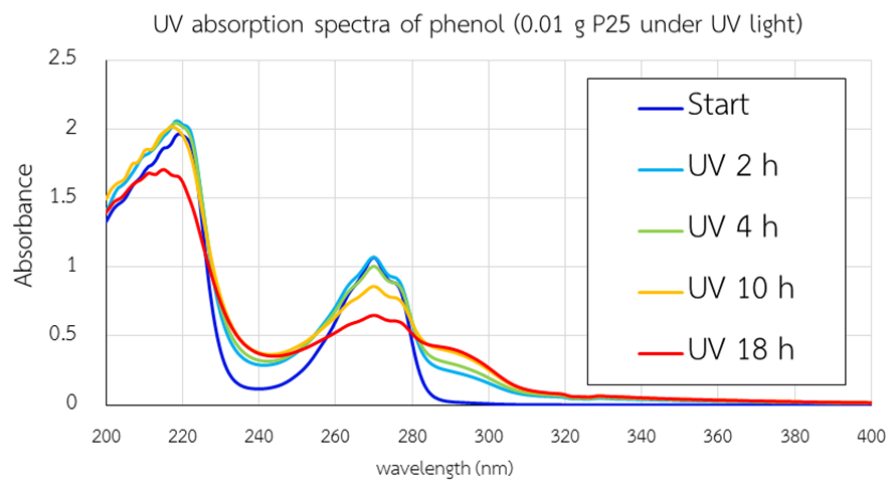
รูปที่ 2.20 (ก) ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์  
(ข) ชิ้นงานหลังสอดใส่โพรบโพลียูรีเทนเหลวที่ลอยอยู่บนผิวของสารละลายพินอล<sup>[78]</sup>

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ สัดส่วน 1:1 และใช้พินอลเรซินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีความแข็งแรงหลังเผาสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของการดูดซับและย่อยสลายพินอล ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ สัดส่วน 1:3 1:1 และ 3:1 หลังสอดใส่ด้วยโพรบโพลียูรีเทนเหลวจำนวน 1 ชิ้น ซึ่งบนผิวมีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 0.01 กรัม ลอยบนผิวของสารละลายพินอลความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 30 มิลลิตร ภายใต้การฉายแสงยูวีจากหลอดยูวี 18 วัตต์ และวัดความเข้มของแสงยูวีที่ผิวสารละลายได้ 1.90 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายพินอล ในช่วงความมืดและช่วงฉายแสงยูวี ไม่มีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.21 เนื่องจากการลดลงของพินอลเกิดจากการดูดซับเท่านั้น หลังจากนั้นเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของแถบการดูดกลืนแสงของพินอลเมื่อเกิดการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก จึงได้พิจารณาค่าการดูดกลืนแสงของพินอลที่ย่อยสลายด้วยผง

ไทเทเนียม 0.01 กรัม ภายใต้แสงยูวี พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร ลดลง เมื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง รูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายฟีนอลการกำจัดฟีนอล ด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส ในที่มืด และภายใต้แสงยูวี ที่เวลาแตกต่างกัน<sup>[78]</sup>



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของแถบการดูดกลืนแสงของฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.01 กรัม ภายใต้การฉายแสงยูวีที่เวลาแตกต่างกัน<sup>[78]</sup>

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวัสดุที่สามารถบำบัดหรือลดความเข้มข้นของสีของน้ำทิ้งในบ่อพักน้ำหลังการบำบัดขั้นสุดท้ายจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดสีหลักในน้ำทิ้งดังกล่าวนี้คือ ลิกนิน โดยวัสดุที่สนใจนั้นเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายสารลิกนินได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก การพัฒนาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ และส่วนที่สองคือการพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟโรต์จากกากของเสียโรงงานเจียรเนมาร์คาไซด์ ซึ่งในส่วนของการพัฒนาวัสดุที่ใช้เป็นตัวรองรับนั้นมุ่งเน้นไปที่การขึ้นรูปเพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง ยิ่งไปกว่านั้นการเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์บนผิวภายนอกของวัสดุตัวรองรับก็เป็นกระบวนการสำคัญเช่นกัน เพื่อให้วัสดุโฟโตแคตาไลสต์ยึดเกาะได้แน่นและยังคงมีสมบัติโฟโตแคตาไลติกอยู่ ภาพลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการฉีดโฟมพอลิยูรีเทนเพื่อให้ชิ้นงานสามารถลอยบนผิวน้ำได้ ส่งผลให้สัมผัสแสงแดดได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และในส่วนการพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบนั้น มุ่งเน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารลิกนินให้ได้มากที่สุด วัสดุอุปกรณ์ วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แสดงไว้ดังนี้



รูปที่ 3.1 การลอยน้ำของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาไลสต์

### 3.1 วัตถุดิบ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25, บริษัท Evonik Degussa)
- ซีโอไลต์โซเดียม เอ (Advera 401PS, บริษัท PQ Chemicals)
- ถ่านกัมมันต์ (PA-1, บริษัท Zenith Science)
- ดินดำสุราษฎร์ธานี (RAA, บริษัท Compound Clay)
- ไฟไรต์ (กากของเสียจากโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์, บริษัท สวารอฟสกี เจมสโตนส์ (ประเทศไทย) จำกัด)
- ถ่านแกลบ
- โฟมพอลิยูรีเทน (PU foam M76, บริษัท Rockmax)
- ลิกนิน (Lignin alkali, บริษัท Sigma-Aldrich)
- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA 1000, บริษัท Wako Pure Chemical)
- คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC, บริษัท Ceramic R Us)
- น้ำมันกลีเซอรอล (Glycerol, บริษัท Ajax Finechem)
- พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG 1000, บริษัท Wako Pure Chemical Industry)
- สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (CN-44, บริษัท C. Thai Chemicals)
- ฟีนอลิกเรซิน (Neolite KC-3019, บริษัท Kangnam Chemical)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 99%, บริษัท Chemmin)
- กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>, 68%, บริษัท Gammaco)
- เอทานอลความเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ (บริษัท RCI Labscan)
- อะซิโตน (Acetone AR1003-P2.5L, บริษัท RCI Labscan)
- น้ำรีเวอร์สออสโมซิส (RO water)
- น้ำดีไอวอเตอร์ (DI water)

#### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องอัดรีด (ram type extruder, เพชรเกษมจักรกรเซรามิก)
- เต้าเผาไฟฟ้า
- เครื่องชั่งตวงวัด 2 และ 4 ตำแหน่ง
- เครื่องบดแบบเหวี่ยงเป็นวงความเร็วสูง (rapid mill)
- หม้ออบดปอร์ซเลน และลูกบดปอร์ซเลน
- ขวดพลาสติกชนิด high-density polyethylene (HDPE)

- ลูกบดเซอร์โคเนียขนาด 0.5 เซนติเมตร
- ปีกเกอร์แก้วและพลาสติกขนาดต่างๆ
- ปิเปตต์ หลอดหยดและหลอดฉีดยาพลาสติก
- ตัวกรองสารชนิดไนลอนขนาด 0.22 ไมโครเมตร (Nylon Syringe Filter, 0.2 micron, FILTREX)
- กล้องทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุโฟโตแคทาลิสต์
- หลอดยูวี 18 วัตต์ (Actinic TL-D 18W/10, Philips)
- หลอดทั้งสแตนฮาลोजен 275 วัตต์ (HLX 64656, Osram)
- อุปกรณ์ปรับความสูง
- เครื่องวัดความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light meter UV-240, Custom)
- เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar power meter DT-1307, CEM Instruments India)
- เครื่องปั่นแบบแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็กขนาดต่างๆ
- เครื่องหมุนเหวี่ยง
- ตัวกรองสารละลายขนาด 0.20 ไมครอน
- ตู้กระจกขนาด 26×17×19 เซนติเมตร
- เครื่องวัด pH (pH700, Eutech instruments)
- เครื่องปั๊มอากาศ
- โกร่งอะลูมิเนียมมหาวิทยาลัย
- ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาดต่างๆ
- เตาอบ
- ภาชนะสแตนเลส
- เบ้าอะลูมิเนียม

### 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ

ในส่วนนี้ได้นำวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ก่อนนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยจะทำการวิเคราะห์สมบัติดังนี้

1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer ผลิตโดยบริษัท Philips model PW2400 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ผลิตโดย บริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ Cu-K $\alpha$  radiation ด้วย Scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ช่วง 2Theta เท่ากับ 10-80 องศา เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสของวัสดุดิบ

3) วิเคราะห์ขนาดอนุภาค ด้วยเทคนิค Laser scattering ด้วยเครื่อง Particle size distribution analyzers ผลิตโดยบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000 เพื่อศึกษาขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ

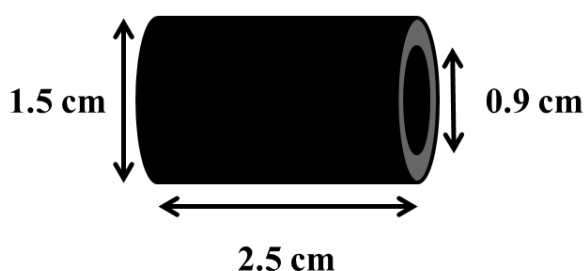
4) วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของผง ด้วยเทคนิค BET surface area and pore size analyzer ผลิตโดยบริษัท Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดิบ

5) วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV เพื่อศึกษาลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคของผงวัสดุดิบ

6) วิเคราะห์ค่าศักย์ซีตา ด้วยเทคนิค Phase Analysis Light Scattering ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer ผลิตโดยบริษัท Brookhaven รุ่น NanoBrook ZetaPALS เพื่อศึกษาความเป็นประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุดิบที่ใช้ทำวัสดุโฟโตแคตาลิสต์ที่ pH ต่างๆ

### 3.2.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์

ในส่วนนี้เป็นการพัฒนาเพื่อให้ได้ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเนื้อพรุนลักษณะดังรูปที่ 3.2 ที่มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.2 ลักษณะรูปร่างและขนาดชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุน

โดยได้ศึกษาตั้งแต่วิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม ส่วนประกอบของวัตถุดิบ อุณหภูมิเผา และบรรยากาศของการเผา นอกจากนั้นยังได้ศึกษาวิธีการเคลือบวัสดุโพโตแคตาไลสต์บนผิวของวัสดุเชิงประกอบพูนด้วย รายละเอียดในการพัฒนามีดังนี้

### 3.2.2.1 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ

ในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเริ่มต้นด้วยการทดลองขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ (slip casting) ในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกระบอกกลวง โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ ผงซีโอไลต์โซเดียม เอ และฟิโนลิกเรซิน ปริมาณร้อยละ 40.32 40.32 และ 16.13 โดยน้ำหนัก ผสมกับสารละลายตัวช่วยประสานความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในปริมาณร้อยละ 19.35 โดยน้ำหนักรวม ซึ่งเป็นสูตรที่ได้จากงานวิจัยของธนากร<sup>[79]</sup> บดผสมแบบเปียกในหม้อบดปอร์ชเลนด้วยเครื่องบดแบบเหวี่ยงเป็นวง ความเร็วสูงเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำน้ำสลีปมาหล่อขึ้นรูป โดยใช้ระยะเวลาในการเทน้ำสลีปออกจากแบบพิมพ์ 10 20 และ 30 นาที เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป

### 3.2.2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการอัดรีด

ในการทดลองนี้ได้เปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกจากการหล่อแบบมาเป็นวิธีการอัดรีดเพื่อความสะดวกในการควบคุมความหนาของชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอ และยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้จำนวนมาก สำหรับขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

- ผสมผงถ่านกัมมันต์และผงซีโอไลต์โซเดียม เอ ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 และบดผสมแบบแห้งในหม้อบดปอร์ชเลนด้วยเครื่องบดแบบเหวี่ยงเป็นวงความเร็วสูงเป็นเวลา 5 นาที

- นำส่วนผสมที่บดแล้วมาผสมกับสารละลายตัวช่วยประสานจากงานวิจัยของวิไลรัตน์<sup>[80]</sup> ประกอบด้วย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 4.39 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 0.63 พอลิเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 0.31 น้ำมันกลีเซอรอลร้อยละ 0.63 และน้ำรีเวิร์สออสโมซิสร้อยละ 94.04 โดยน้ำหนัก และนวดให้เข้ากันจนได้เป็นเนื้อโด (Dough) ก่อนนำไปบ่มไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำเนื้อโดไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดดังรูปที่ 3.3 โดยใช้หัวรีดที่มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.4

- นำชิ้นงานทรงกระบอกกลวงยาวหลังรีดมาตากไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำชิ้นงานที่แห้งแล้วมาตัดให้ได้ความยาว 2.5 เซนติเมตร
- เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเผาที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบแสดงดังรูปที่ 3.5
- นำชิ้นงานหลังเผามาทดสอบสมบัติต่างๆ

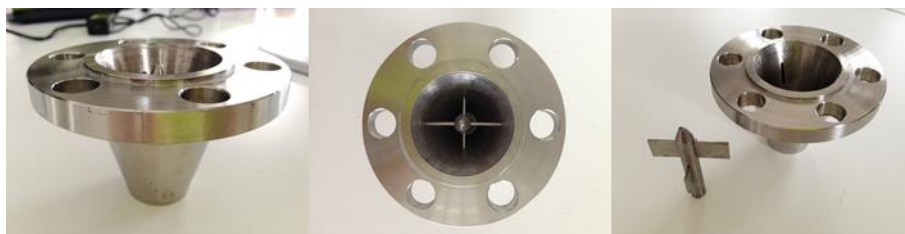
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ

| ส่วนผสม  | AC0 | AC25 | AC50 | AC75 | AC100 |
|--|-----|------|------|------|-------|
| ถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)                    | 0   | 25   | 50   | 75   | 100   |
| ซีโอไลต์โซเดียม เอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)              | 100 | 75   | 50   | 25   | 0     |
| สารละลายตัวประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัตถุดิบรวม) | 60  | 80   | 110  | 150  | 180   |



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบ Ram type





(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.4 หัวรีดสำหรับรีดชิ้นงานทรงกระบอกกลวง



รูปที่ 3.5 ถ่านแกลบสำหรับปกคลุมชิ้นงานขณะเผา

### 3.2.2.3 การศึกษาผลของการเติมดินดำสุราษฎร์ธานีในส่วนผสมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ในการศึกษานี้ได้เติมดินดำสุราษฎร์ธานีเป็นตัวประสานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกทั้งก่อนและหลังเผา มีส่วนผสมดังตารางที่ 3.2 โดยนำผงวัตถุดิบของแต่ละสูตรมาผสมแบบแห้งและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด วิธีการผสมและขึ้นรูปเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.2.2.2 นำชิ้นงานที่อบแห้งแล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานหลังเผามาทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณดินคำสุราษฎร์ธานี

| ส่วนผสม  | BC0 | BC25 | BC50 |
|--|-----|------|------|
| ถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)  | 50  | 50   | 50   |
| ซีโอไลท์โซเดียม เอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)  | 50  | 50   | 50   |
| ดินคำสุราษฎร์ธานี (ร้อยละโดยน้ำหนักรวมของ ถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ) | 0   | 25   | 50   |
| สารละลายตัวประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุโดยรวม)                           | 110 | 80   | 70   |

#### 3.2.2.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลท์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยมีดินคำสุราษฎร์ธานีเป็นตัวประสาน

ในการศึกษานี้ได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของผงถ่านกัมมันต์และผงซีโอไลท์โซเดียม เอ มีสูตรดังตารางที่ 3.3 โดยนำผงวัสดุบริสุทธิ์ต่างๆ มาบดผสมแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที โดยมีวิธีการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.2.2.2 เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานหลังเผามาทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง ถ่านกัมมันต์ต่อซีโพลีโพรพิลีน เอ

| ส่วนผสม   | FBC01 | FBC02 | FBC03 | FBC04 | FBC05 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| ถ่านกัมมันต์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)  | 0     | 25    | 50    | 75    | 100   |
| ซีโพลีโพรพิลีน เอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)  | 100   | 75    | 50    | 25    | 0     |
| ดินดำสุราษฎร์ธานี (ร้อยละโดยน้ำหนักรวมของ ถ่านกัมมันต์และซีโพลีโพรพิลีน เอ) | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    |
| สารละลายตัวประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนักของ วัสดุโดยรวม)                         | 40    | 60    | 70    | 80    | 110   |

### 3.2.2.5 การศึกษาผลของบรรยากาศการเผาชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความ แข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผา

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาค่าความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่มีส่วนผสม ดังตารางที่ 3.3 โดยเปรียบเทียบบรรยากาศการเผาระหว่าง การเผาในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ และการเผาชิ้นงานในบรรยากาศปกติ ที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3.2.2.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์

ในการศึกษานี้ได้ใช้สูตรส่วนผสมที่ประกอบด้วย ผงซีโพลีโพรพิลีนเอ และ ดินดำสุราษฎร์ธานี ในอัตราส่วน 100:50 โดยน้ำหนัก มาบดผสมแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที โดยมีวิธีการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.2.2.2 เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ หลังจากนั้นนำชิ้นงานหลังเผา มา ทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.2.3 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคทาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์

ในส่วนนี้มุ่งเน้นไปที่การนำไฟไรต์จากกากของเสียโรงงานเจียรไนมาร์คาไซต์มาใช้เป็นวัสดุโฟโตแคทาลิสต์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า โดยมีรายละเอียดการพัฒนา ดังนี้

#### 3.2.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการบดต่อขนาดอนุภาคของไฟไรต์

นำไฟไรต์ที่ได้รับมาจากโรงงานมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 มาอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น หลังจากนั้นนำกากที่แห้งแล้วมาบดหยาบด้วยโม่อะลูมินาและผ่านตะแกรงเบอร์ 40 เมช ก่อนนำมาบดเปียกในขวดพลาสติกชนิด high-density polyethylene (HDPE) และใช้ลูกบดเซอร์โคเนียขนาด 0.5 เซนติเมตร โดยผสมผงกากกับน้ำดีไอไอโนซ์และเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.9 ในอัตราส่วนร้อยละ 80 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้ระยะเวลาการบด 6 12 และ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกน้ำออกจากผง ก่อนนำผงที่ได้ไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำผงที่แห้งแล้วมาบดผ่านตะแกรงเบอร์ 230 เมช เพื่อวัดขนาดของผงหลังเผา



รูปที่ 3.6 ลักษณะของไฟไรต์ก่อนผ่านกระบวนการบด

#### 3.2.3.2 การศึกษาผลของการเตรียมไฟไรต์ด้วยวิธีการบดล้างและอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

ในการศึกษานี้ได้นำไฟไรต์ที่ผ่านการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาผสมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้ไฟไรต์ที่ผ่านการเตรียม 2 วิธี คือ ไฟไรต์หลังบด 24 ชั่วโมง และไฟไรต์หลังบด 24 ชั่วโมง ล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนจากกระบวนการเจียรไนมาร์คาไซต์

วิธีการล้างไฟโรต์ด้วยอะซีโตนทำได้โดยการนำผงไฟโรต์หลังบด 24 ชั่วโมง มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไฟโรต์ ปริมาณ 30 กรัม มาปั่นกวนในอะซีโตนปริมาณ 300 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกรองแยกผงไฟโรต์กับอะซีโตนออก ล้างเช่นเดิมจนได้ของเหลวอะซีโตนที่ใส หลังจากนั้นนำผงไฟโรต์ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนอบที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ในส่วนของการเตรียมวัสดุโพโตแคตาลีสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟโรต์ที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟโรต์ (ไม่ล้างและล้าง) แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยมีชื่อตัวอย่างแสดงอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟโรต์ ในกรณีที่ใช้ไฟโรต์ผ่านการล้าง กำหนดให้ชื่อตัวอย่างแตกต่างจากกรณีที่ใช้ไฟโรต์ไม่ล้างโดยการเติมตัวอักษร W ท้ายชื่อตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ปริมาณต่างๆ มากระจายตัวในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.9 โดยใช้ปริมาณของแข็งต่อของเหลวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และนำมาปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- นำผงไฟโรต์ (ไม่ล้างและล้าง) ปริมาณต่างๆ มากระจายตัวในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.9 โดยใช้ปริมาณของแข็งต่อของเหลวร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และนำมาปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- หยดสารแขวนลอยไฟโรต์ลงในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะปั่นกวน และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเพื่อแยกของเหลวออกจากผงของแข็ง ก่อนนำผงที่ได้ไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- นำผงที่แห้งแล้วมาบดด้วยโกร่ง ผ่านตะแกรง 230 เมช ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในเบ้าอะลูมินาปิด โดยผงถูกปกคลุมด้วยถ่านกลบ

- นำผงวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ หลังเผาไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของวัสดุโพโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์

| ส่วนผสม<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | TiO <sub>2</sub> | T95P5 | T90P10 | T85P15 | T80P20 | Pyrite |
|-------------------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25        | 100              | 95    | 90     | 85     | 80     | 0      |
| ไพไรต์ (ไม่ล้าง และ ล้าง)     | 0                | 5     | 10     | 15     | 20     | 100    |

### 3.2.4 การเคลือบวัสดุโพโตแคตตาลิสต์บนวัสดุตัวรองรับเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ

ในการทดลองส่วนนี้ได้เลือกชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพรุนหลังเผาที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานมาเคลือบด้วยวัสดุโพโตแคตตาลิสต์ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และวัสดุโพโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์ รายละเอียดวิธีการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

- นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพรุนมาล้างด้วยน้ำเพื่อทำความสะอาดผิวก่อนเคลือบ
- เคลือบสารแขวนลอยของวัสดุโพโตแคตตาลิสต์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนัก บนผิวของวัสดุเชิงประกอบพรุนด้วยวิธีการชุบ ฟ่น และทา โดยมีการเติมตัวช่วยประสานปริมาณต่างๆ เพื่อช่วยการยึดเกาะของวัสดุโพโตแคตตาลิสต์บนผิวของชิ้นงาน
- ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำชิ้นงานที่แห้งแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะสเตนเลสปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ (ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบและชิ้นงานที่เคลือบวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์) และในบรรยากาศปกติ (ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีถ่านกัมมันต์)

### 3.2.5 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

#### 3.2.5.1 วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก

1) ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา โดยการชั่งน้ำหนักแห้งก่อนเผาและหลังเผา โดยมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 3.1

$$\text{Weight loss (\%)} = \left[ \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \quad \text{สมการ 3.1}$$

$W_1$  = น้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนเผา (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักชิ้นงานแห้งหลังเผา (กรัม)

2) ทดสอบความแข็งแรง ด้วยวิธี Radial crushing strength ตามมาตรฐาน ASTM D 6175-03 ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5843 ผลิตโดย บริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 3.2

$$\text{Radial crushing strength (N/cm)} = \frac{F}{L} \quad \text{สมการ 3.2}$$

$F$  = แรงกด (นิวตัน)

$L$  = ความยาวของชิ้นงาน (เซนติเมตร)

3) ทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำ โดยมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 3.3

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \left[ \frac{D}{W-S} \right] \quad \text{สมการ 3.3}$$

$W$  = น้ำหนักชิ้นงานเปียกชั่งในอากาศ (กรัม)

$D$  = น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)

$S$  = น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (กรัม)

4) ทดสอบความหนาแน่นจริง (true density) หรือความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ด้วยเทคนิคการวัดด้วยพิคโนมิเตอร์ โดยมีวิธีคำนวณดังสมการที่ 3.4

$$\text{True density (g/cm}^3\text{)} = \left[ \frac{M_s}{M_{pw} - (M_{pws} - M_s)} \right] \quad \text{สมการ 3.4}$$

$M_s$  = น้ำหนักผงแห้งหลังอบ (กรัม)

$M_{pw}$  = น้ำหนักของพิคโนมิเตอร์และน้ำ (กรัม)

$M_{pws}$  = น้ำหนักของพิคโนมิเตอร์ น้ำและผงตัวอย่าง (กรัม)

5) ทดสอบความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity) ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำ มีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 3.5

$$\% \text{ Apparent porosity} = \left[ \frac{W-D}{W-S} \right] \times 100 \quad \text{สมการ 3.5}$$

$W$  = น้ำหนักชิ้นงานเปียกชั่งในอากาศ (กรัม)

$D$  = น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)

$S$  = น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (กรัม)

6) ทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำ มีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 3.6

$$\% \text{ Water absorption} = \left[ \frac{W-D}{D} \right] \times 100 \quad \text{สมการ 3.6}$$

$W$  = น้ำหนักชิ้นงานเปียกชั่งในอากาศ (กรัม)

$D$  = น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)

7) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ Cu-K $\alpha$  radiation ด้วย scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ช่วง 2Theta เท่ากับ 10-80 องศา เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

8) วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV เพื่อศึกษาลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนและหลังเผา



9) วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเทคนิค BET surface area and pore size analyzer ผลิตโดยบริษัท Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผา

### 3.2.5.2 วัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเคลือบวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์

1) วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV เพื่อศึกษาความหนาของชั้นเคลือบของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์บนผิวของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผารวมถึงลักษณะผิวของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์

### 3.2.5.3 วัสดุโฟโตแคตตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์

1) วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค และรูปร่างของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์เชิงประกอบ รวมถึงลักษณะการยึดเกาะกันของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์ทั้ง 2 ชนิด และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วย energy-dispersive X-ray Spectrometry (EDS)

2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ผลิตโดย บริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ Cu-K $\alpha$  radiation ด้วย scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ช่วง 2Theta เท่ากับ 10-80 องศา เพื่อศึกษาองค์ประกอบเฟสของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์เชิงประกอบทั้งก่อนและหลังเผา

3) วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของผง ด้วยเทคนิค BET surface area and pore size analyzer ผลิตโดยบริษัท Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของผงวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์เชิงประกอบทั้งก่อนและหลังเผา

4) วิเคราะห์ขนาดอนุภาค ด้วยเทคนิค Laser scattering ด้วยเครื่อง Particle size distribution analyzers ผลิตโดย Malvern รุ่น Mastersizer 2000 เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์เชิงประกอบทั้งก่อนและหลังเผา

5) วิเคราะห์ค่าแถบพลังงาน ( $E_g$ ) และค่าการดูดกลืนแสงของผงวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์ ด้วยเทคนิค Diffused reflectance ด้วยเครื่อง UV visible near infrared spectrometer (UV-VIS-NIR) เพื่อศึกษาความสามารถของวัสดุโฟโตแคตตาไลสต์ในการถูกกระตุ้นด้วยแสง โดยพิจารณาจากกราฟ Tauc Plot ดังสมการที่

3.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  และ  $h\nu$  โดยคำนวณจากค่าประมาณจุดตัดแกน x หรือ  $(\alpha h\nu)^{1/2}$  เท่ากับ 0 จากเส้นลากสัมผัสกราฟ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = k(h\nu - E_g) \quad \text{สมการ 3.7}$$

$E_g$  = ค่าแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h$  = ค่าคงตัวของพลังค์ ( $4.135 \times 10^{-15}$  อิเล็กตรอนโวลต์·วินาที)

$\nu$  = ความถี่ (ต่อวินาที)

$k$  = ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นกับพลังงานแสง

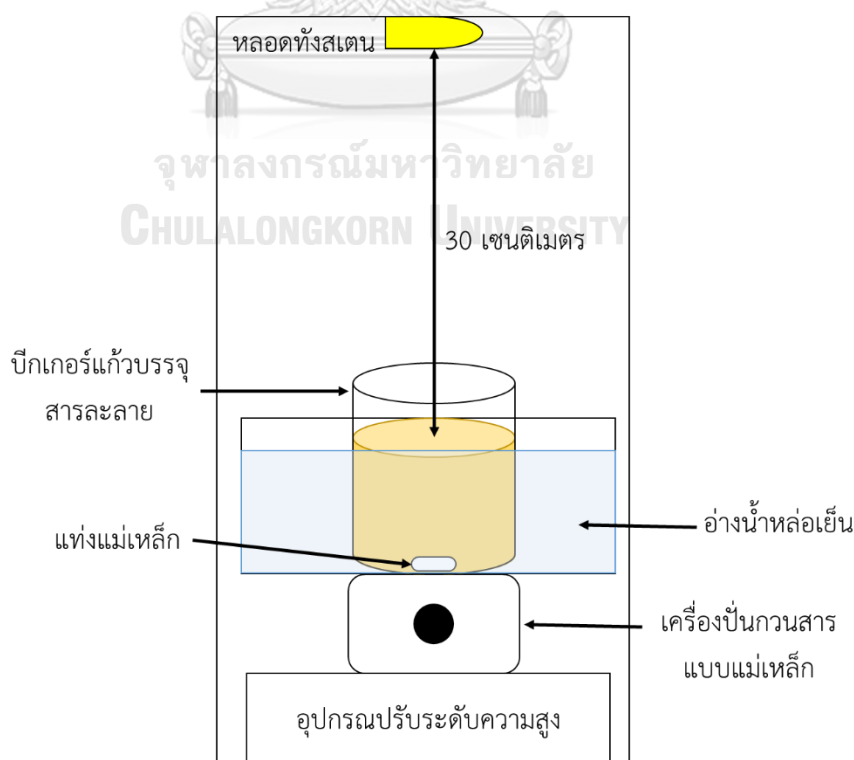
#### 3.2.5.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ

ในการทดสอบนี้ได้ใช้ลิกนินเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ในน้ำโดยเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรก่อนที่จะเจือจางให้เหลือความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนแรกก่อนเริ่มการทดสอบจะต้องทำการกราฟมาตรฐานจากการใช้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนิน ที่ความเข้มข้น 1 – 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวัดด้วยเทคนิค UV/Vis adsorption spectroscopy ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer รุ่น Lambda 35 ผลิตโดย บริษัท Perkin Elmer โดยพิจารณาที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร และนำค่าการดูดกลืนแสงนั้นมาทำการกราฟและหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายลิกนินและค่าการดูดกลืนแสง เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นในการทดลองต่อไป

สำหรับการทดสอบวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ เริ่มโดยการใส่ผงวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ 0.30 กรัม ลงในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์แก้วขนาด 400 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องปั่นแบบแม่เหล็กในกล่องทดสอบประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.7 โดยปั่นในความมืดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน 350 วัตต์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร

สำหรับการทดสอบวัสดุเชิงประกอบพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ ทั้ง 2 ชนิด (ไทเทเนียมไดออกไซด์และวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์) เริ่มโดยการนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์มาฉีดพ่นพอลิยูรีเทนในรูกลวงของชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานสามารถลอยอยู่ในน้ำเพื่อให้วัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ที่เคลือบอยู่สามารถสัมผัสกับแสงได้ เนื่องจากน้ำที่มีลิกนินเจือปนจะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งสามารถบดบังและดูดกลืนแสงยูวีจากแหล่งกำเนิดแสงได้ ก่อนนำมาทดสอบด้วยการลอยวัสดุเคลือบบนผิวสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเก็บไว้ในที่มืดก่อนนำไปฉายแสง โดยใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ต 18 วัตต์ จำนวน 3 หลอด หรือหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน 350 วัตต์ 1 หลอด เป็นแหล่งกำเนิดแสง และวัดการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนแสงของสารละลายลิกนินที่ความยาวคลื่นในช่วง 280 นาโนเมตร

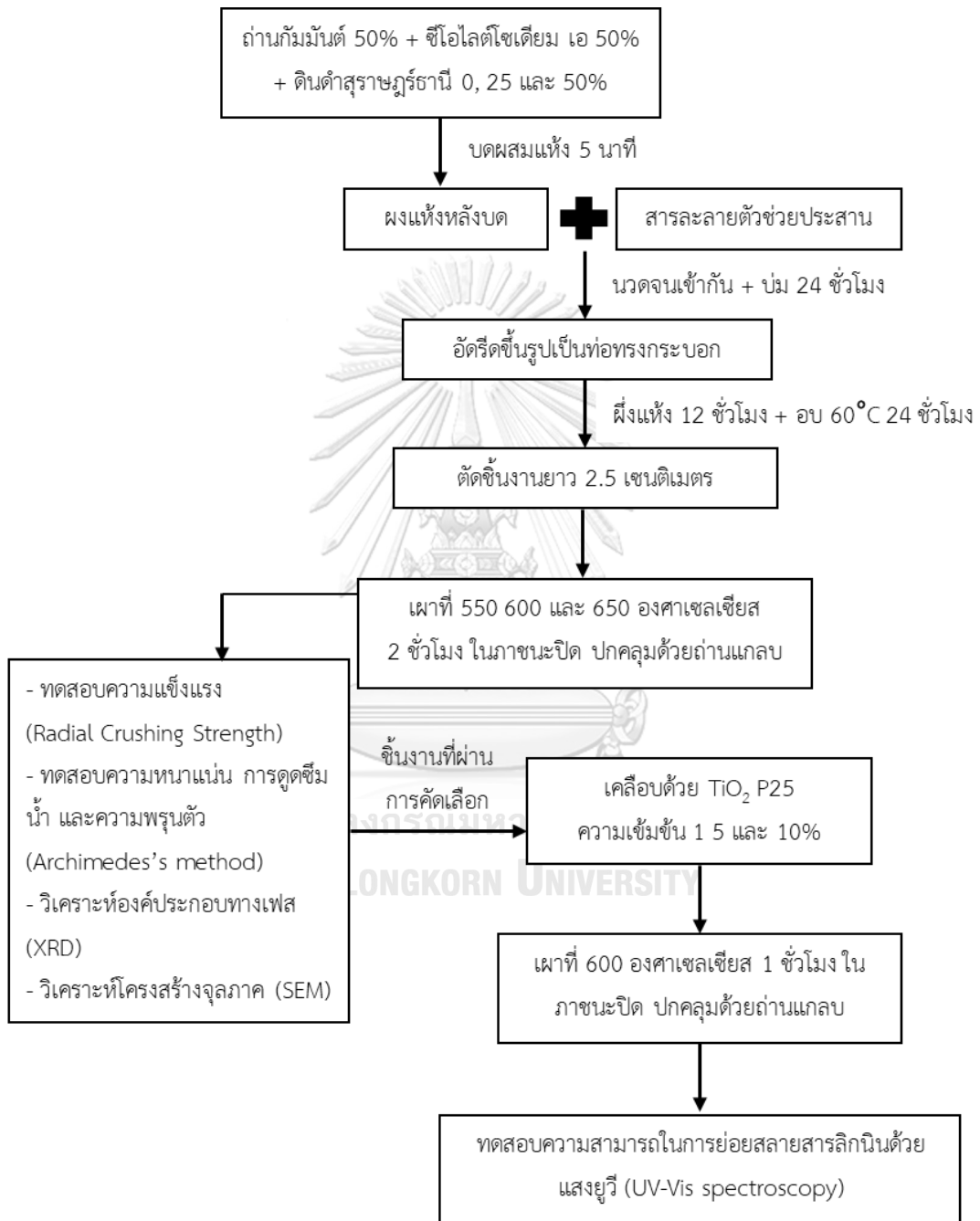
หลังจากนั้น นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนเคลือบวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายลิกนินมาขยายผล ด้วยการใช้ชิ้นงานเคลือบจำนวน 50 ชิ้น มาทดสอบในบ่อน้ำเสียจำลองขนาด  $26 \times 17 \times 19$  เซนติเมตร โดยใช้น้ำทิ้งบ่อสุดท้ายหลังการบำบัดจากบริษัท ตรีงน้ำมันปาล์ม จำกัด ปริมาณ 2,000 มิลลิลิตร และใช้แสงจากดวงอาทิตย์เป็นแสงกระตุ้น



รูปที่ 3.7 กล้องทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ด้วยแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

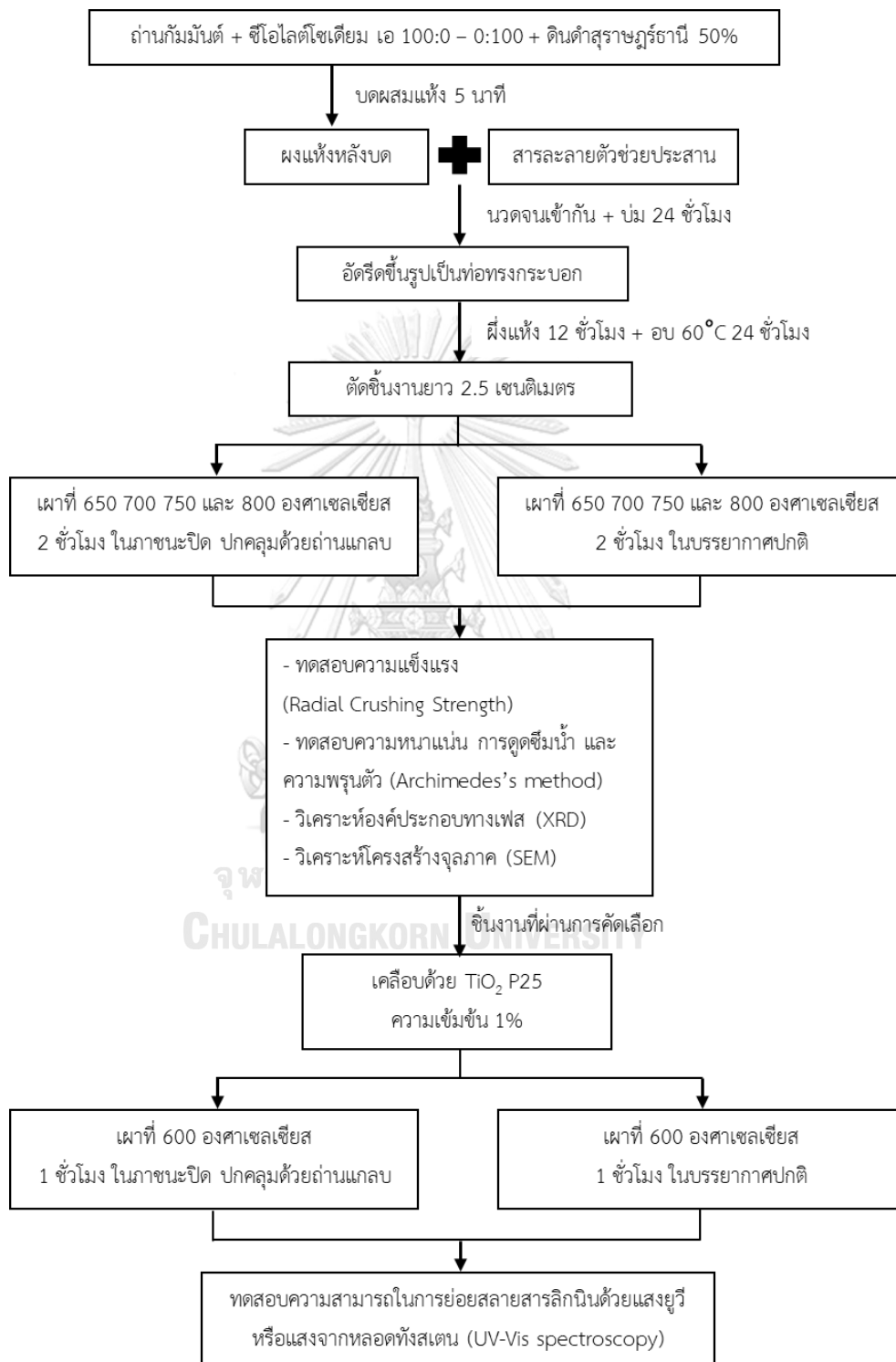
### 3.3 แผนผังการทดลอง

#### 3.3.1 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์ (ส่วนที่ 1)



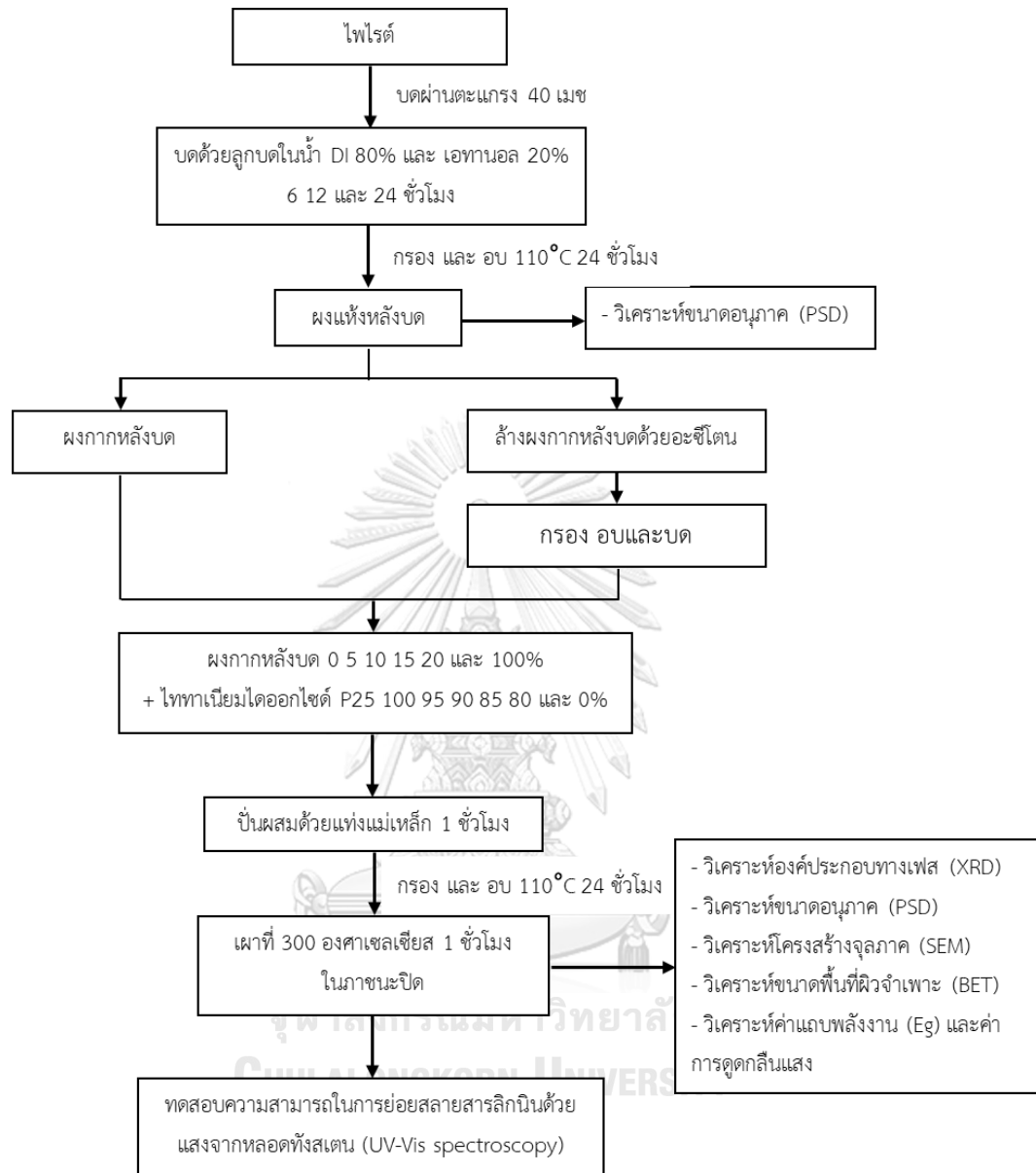
รูปที่ 3.8 แผนผังการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนส่วนที่ 1

### 3.3.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ (ส่วนที่ 2)



รูปที่ 3.9 แผนผังการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนส่วนที่ 2

### 3.3.3 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์



รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองการพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

##### 4.1.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ ซีโอไลต์ ดินดำสุราษฎร์ธานี และไฟไรต์จากกากของเสียโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุนั้นๆ จากผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักของซีโอไลต์โซเดียม เอ คือ ซิลิคอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และโซเดียม (Na) รวมถึงมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss of ignition, LOI) ซึ่งหมายถึงน้ำในโครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียม เอ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ชนิดนี้ ในส่วนของดินดำสุราษฎร์ธานีพบว่าองค์ประกอบหลักคือ ซิลิคอน และอะลูมิเนียม นอกจากนี้ยังพบองค์ประกอบรองเช่น เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) โซเดียม ไทเทเนียม (Ti) และแคลเซียม (Ca) รวมถึงมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ซึ่งหมายถึงน้ำในโครงสร้างและสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาในดินดำสุราษฎร์ธานี เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ไฟไรต์จากกากของเสียโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์ พบว่าองค์ประกอบหลักคือ เหล็ก และซัลเฟอร์ (S) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแร่มาร์คาไซด์และไฟไรต์ นอกจากนี้ยังพบอะลูมิเนียม แคลเซียม ซิลิคอนและเซอร์โคเนียม (Zr) ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นสิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการเจียรไนแร่มาร์คาไซด์ เมื่อพิจารณาปริมาณของธาตุเหล็กต่อธาตุซัลเฟอร์โดยไม่รวมออกซิเจนพบว่าไม่มีอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กต่อซัลเฟอร์อยู่ที่ 0.56 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของแร่ไฟไรต์<sup>[81]</sup> และเมื่อนำค่ามาคำนวณเป็นปริมาณของแร่ไฟไรต์ในไฟไรต์จากกากของเสียโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์พบว่ามีปริมาณร้อยละ 82.48 โดยน้ำหนัก

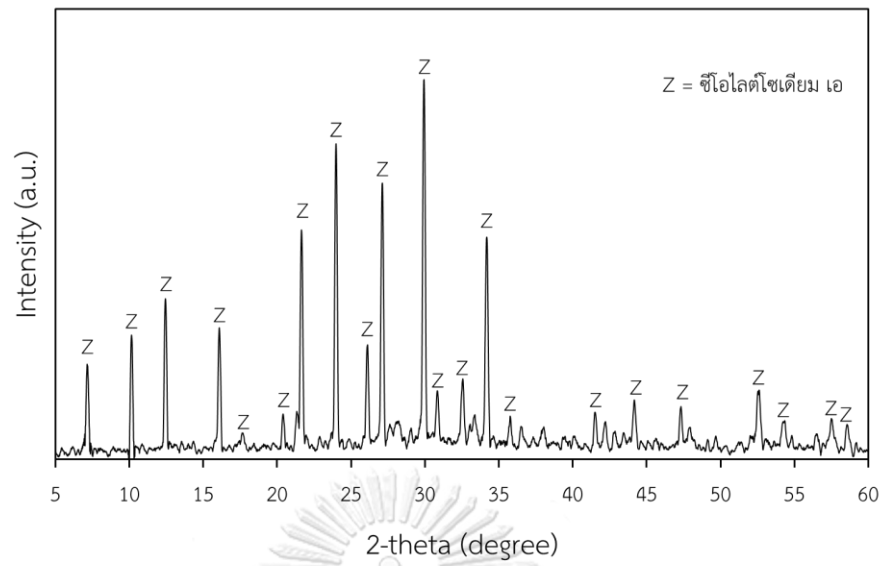
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

| องค์ประกอบทางเคมี              | ร้อยละ             |                   |        |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|--------|
|                                | ซีโอไลต์โซเดียม เอ | ดินดำสุราษฎร์ธานี | ไฟไรต์ |
| SiO <sub>2</sub>               | 27.95              | 51.20             | 0.58   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 33.34              | 30.62             | 1.52   |
| Na <sub>2</sub> O              | 16.71              | 0.22              | -      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                  | 1.88              | 33.00  |
| SO <sub>3</sub>                | -                  | -                 | 59.05  |
| CaO                            | -                  | 0.24              | 2.25   |
| ZrO <sub>2</sub>               | -                  | -                 | 2.45   |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -                  | -                 | 0.65   |
| K <sub>2</sub> O               | -                  | 2.66              | -      |
| TiO <sub>2</sub>               | -                  | 0.51              | -      |
| LOI และอื่นๆ                   | 0.10               | 0.17              | 0.30   |
| LOI                            | 21.90              | 12.50             | -      |

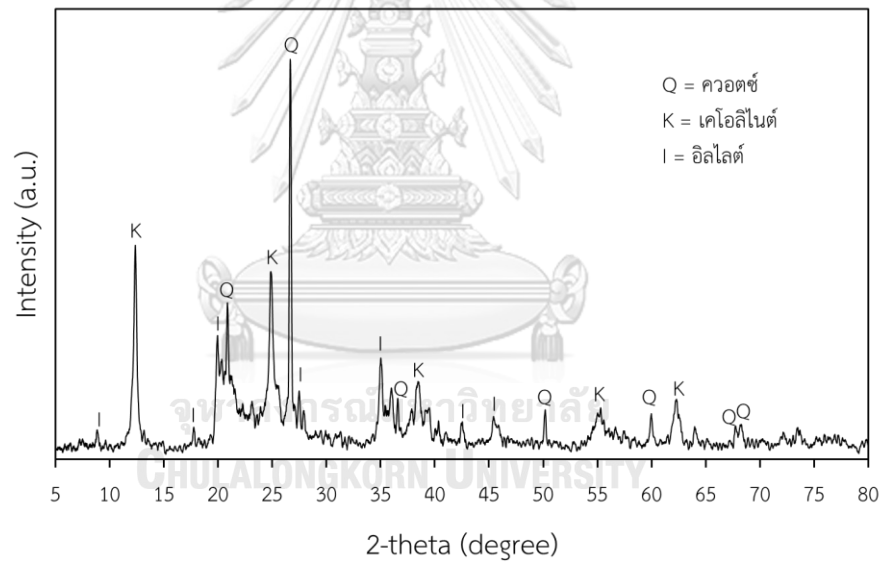
#### 4.1.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของซีโอไลต์โซเดียม เอ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบทั้งหมดคือซีโอไลต์โซเดียม เอ ซึ่งอยู่ในระบบ LTA มีผลึกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ส่วนองค์ประกอบทางเฟสของดินดำสุราษฎร์ธานีพบว่ามีเฟสหลักคือ ควอตซ์และเคลโอลินต์ เฟสรองคือ อิลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนในรูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 พบว่าประกอบด้วยอนาเทสเป็นเฟสหลักและรูไทล์เป็นเฟสรอง และเมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ของไฟไรต์แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าเฟสหลักคือไฟไรต์และยังพบเซอร์โคเนียเป็นเฟสรอง ซึ่งมีผลเป็นทางเดียวกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

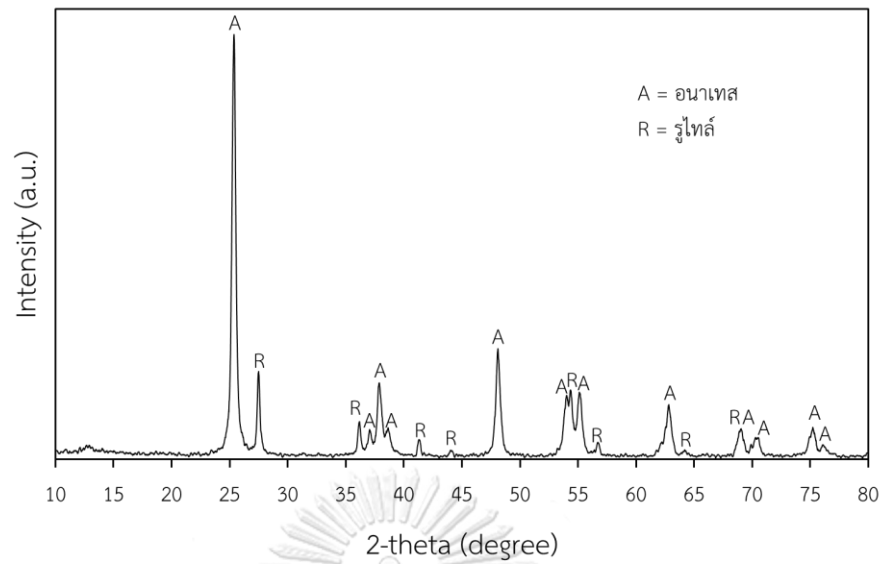




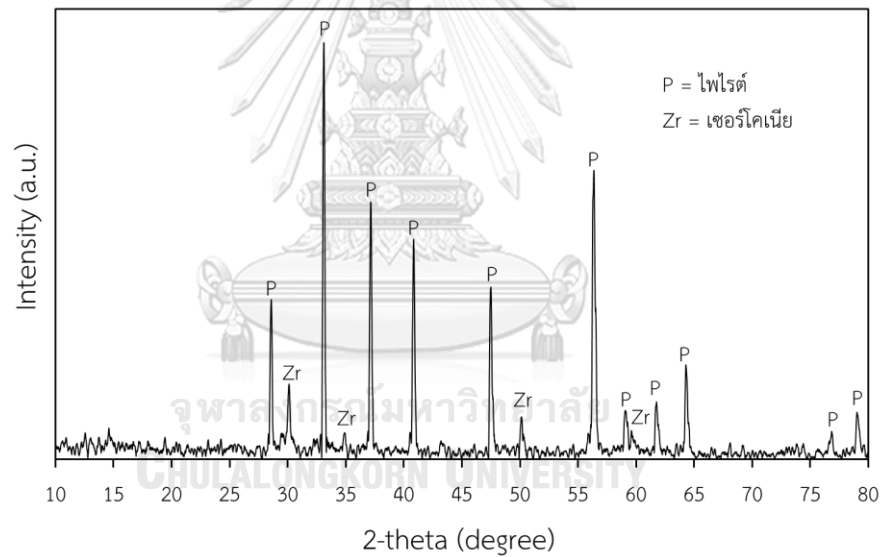
รูปที่ 4.1 XRD pattern ของซีโอไลต์โซเดียม เอ



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของดินดำสุราษฎร์ธานี



รูปที่ 4.3 XRD pattern ของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25



รูปที่ 4.4 XRD pattern ของไพไรต์

#### 4.1.3 ผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดิบในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกคือถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ โซเดียม เอ และดินดำสุราษฎร์ธานี มีขนาดอนุภาค 28.56 3.96 และ 9.72 ไมครอนเมตร ตามลำดับ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ มีค่า 1067.00 และ 47.44 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์มีขนาดอนุภาค 1.38 และ 4.77 ไมครอน ตามลำดับ และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 44.38 และ 5.20 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

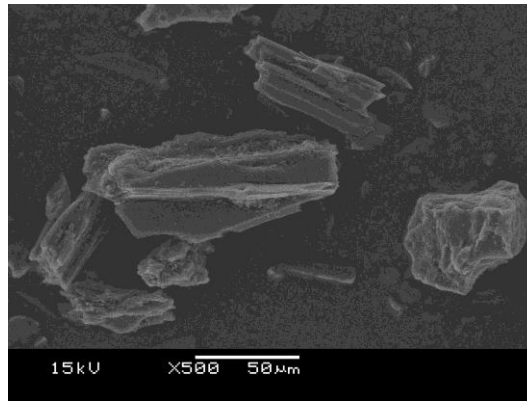
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัตถุดิบ

| วัตถุดิบ           | ขนาดอนุภาค<br>(d50, $\mu\text{m}$ ) | พื้นที่ผิวจำเพาะ<br>( $\text{m}^2/\text{g}$ ) |
|--------------------|-------------------------------------|---|
| ถ่านกัมมันต์       | 28.36                               | 1067.00                                       |
| ซีโอโลต์โซเดียม เอ | 3.96                                | 47.44   |
| ดินดำสุราษฎร์ธานี  | 9.72                                | -   |
| ไทเทเนียมไดออกไซด์ | 1.38                                | 44.38   |
| ไฟไรต์             | 4.77                                | 5.20*   |

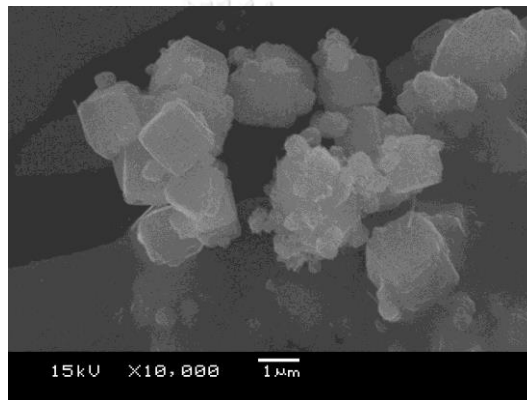
\*เผาที่ 300 องศาเซลเซียส

#### 4.1.4 ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

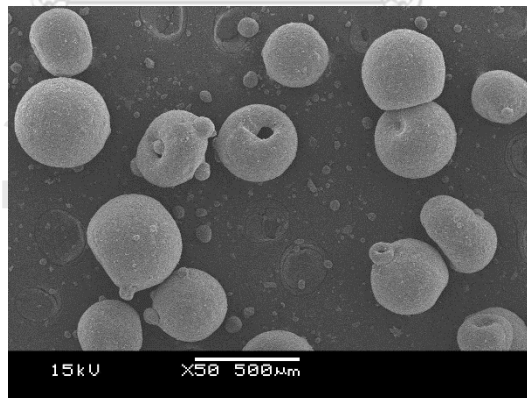
โครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการเตรียมขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนคือถ่านกัมมันต์ ซีโอโลต์โซเดียม เอ และดินดำสุราษฎร์ธานี และวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นวัสดุโพโตแคตาลิสต์คือไทเทเนียมไดออกไซด์ และไฟไรต์ แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.9 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะของอนุภาควัตถุดิบแต่ละชนิดมีรูปร่างแตกต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 – 75 ไมครอน ส่วนซีโอโลต์โซเดียม เอ มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ขนาดเล็กประมาณ 0.2 ไมครอน และขนาดใหญ่ประมาณ 2 ไมครอน ผสมกัน โดยขนาดเล็กเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และมีบางส่วนเกาะอยู่บนอนุภาคขนาดใหญ่ ในส่วนของดินดำพบว่าอนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมซึ่งเกิดจากวิธีการผลิตดินดำโดยทำให้ดินดำมีอนุภาคเป็นแกรนูล มีขนาดอยู่ในช่วง 200 – 400 ไมครอน เมื่อพิจารณาลักษณะอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเล็กน้อยกว่า 1 ไมครอน แต่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ขนาด 5- 10 ไมครอน และในส่วนของลักษณะอนุภาคไฟไรต์พบว่ามีรูปร่างไม่แน่นอน มีทั้งขนาดเล็กประมาณ 2 – 70 ไมครอน และมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคขนาดใหญ่



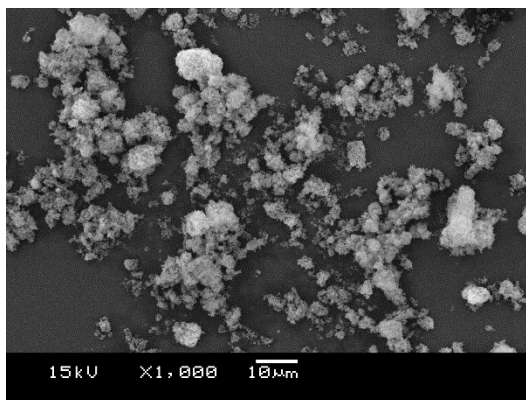
รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของถ่านกัมมันต์



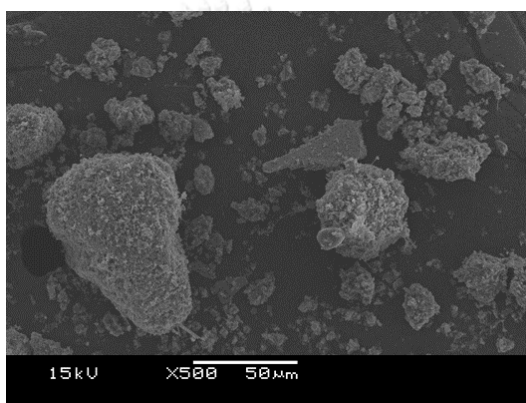
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอไลต์โซเดียม เอ



รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของดินดำสุราษฎร์ธานี



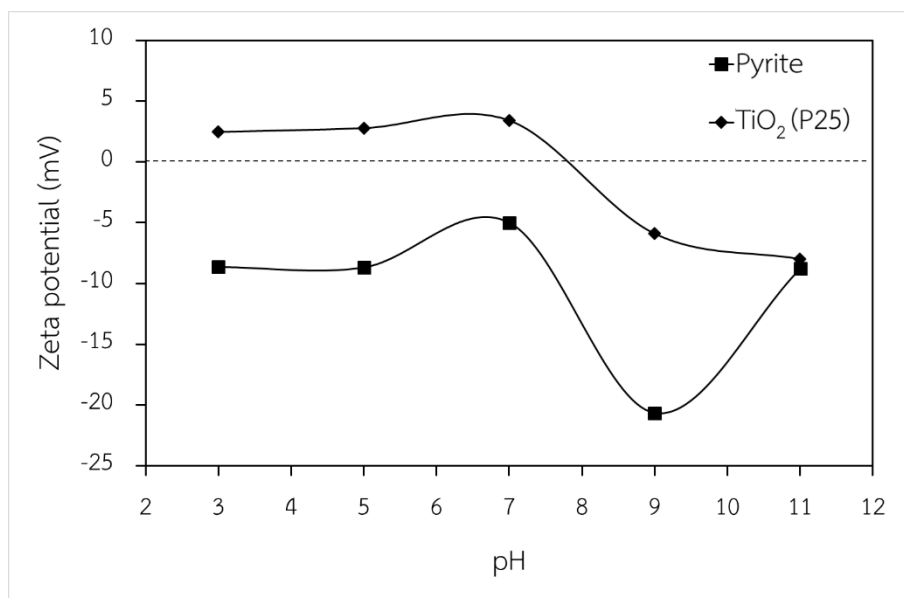
รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของไฟโรต์

#### 4.1.5 ค่าศักย์ซีตา

ในการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตาของวัตถุดิบ ทางผู้วิจัยมีความสนใจเฉพาะค่าของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟโรต์เท่านั้น เนื่องจากต้องการศึกษาประจุบริเวณพื้นผิวของอนุภาคเพื่อใช้ในการพิจารณาความสามารถในการยึดเกาะกันของวัสดุ 2 ชนิดนี้ จากผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าค่าศักย์ซีตาของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเป็นบวกเมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรดและเริ่มมีค่าเป็นลบเมื่อเข้าสู่สภาวะเป็นด่าง ส่วนค่าศักย์ซีตาของไฟโรต์มีค่าเป็นลบทั้งสภาวะเป็นกรดและด่าง เช่นเดียวกับการทดลองของ Fornasiero<sup>[82]</sup> ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถไปเกาะอยู่บนผิวของอนุภาคไฟโรต์ได้ เมื่ออยู่ในสภาวะเป็นกรดถึงกลางด้วยการยึดเกาะด้วยประจุที่ผิวที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ซีตาของไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์

## 4.2 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์

### 4.2.1 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการหล่อแบบ

จากการทดลองหล่อขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก โดยการใช้เวลาหล่อขึ้นรูปที่ 10 20 และ 30 นาที พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปมีความหนาของผนังชิ้นงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาการหล่อขึ้นรูปจาก 10 ถึง 30 นาที แต่พบว่าไม่สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ เนื่องจากชิ้นงานที่หล่อได้มีความหนาของผนังไม่เพียงพอถึงแม้จะใช้เวลาในการหล่อมากถึง 30 นาที ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่เหมาะสมต่อการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักเสียหาย จึงสรุปได้ว่าไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนด้วยวิธีการหล่อแบบได้

### 4.2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการอัดรีด

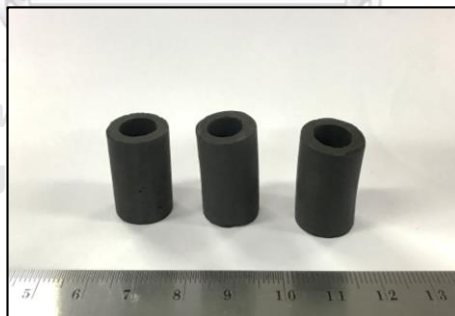
จากการทดลองขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบด้วยวิธีการอัดรีดเนื้อโพลิเมอร์มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ชิ้นงานที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.12 (ก) ได้ทุกสูตร ยกเว้นสูตรที่ไม่มีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์ (สูตร AC0 ดังแสดงในตารางที่ 3.1) เนื่องจากการผสมซีโอไลต์ไฮเดียม เอ กับสารละลายตัวช่วยประสาน ไม่สามารถทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวที่เหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีดได้ ส่วนสูตรที่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังขึ้นรูปสามารถคงรูปได้ และพบว่าชิ้นงานหลังอบมีความแข็งแรงมากพอต่อการขนย้าย และสามารถตัดให้มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.12 (ข)



รูปที่ 4.11 เนื้อโตะของส่วนผสมก่อนขึ้นรูปด้วยการอัดรีด



(ก)



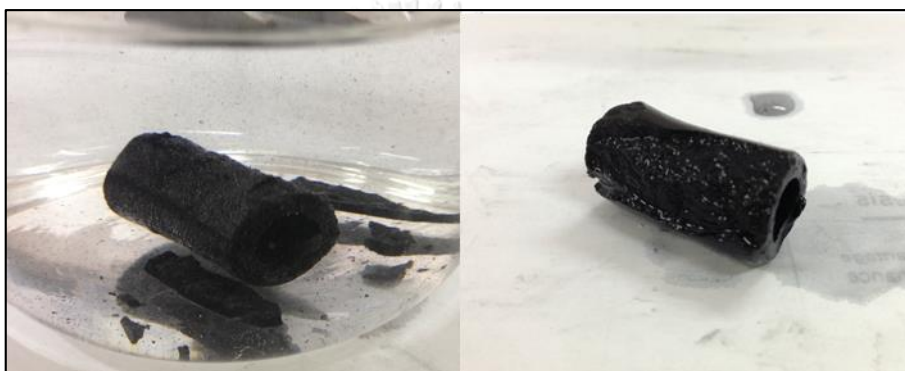
(ข)

รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด  
(ก) ชิ้นงานหลังการอัดรีด และ (ข) ชิ้นงานหลังตัดให้มีความยาว 2.5 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาสมบัติเบื้องต้นของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) หลังเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาวะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ โดยการนำชิ้นงานหลังเผาไปแช่ในน้ำเพื่อพิจารณาความสามารถในการนำไปใช้งานจริงในน้ำ พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกหักทันทีเมื่อสัมผัสกับน้ำดังรูปที่ 4.13 เนื่องจาก

ชิ้นงานมีความพรุนตัวสูง ซึ่งเกิดจากความพรุนตัวของถ่านกัมมันต์และการสลายตัวหลังเผาของตัวช่วยประสานซึ่งเป็นสารอินทรีย์<sup>[83-86]</sup> ส่งผลให้ชิ้นงานหลังเผาดูดซับน้ำเข้าไปในชิ้นงานเป็นปริมาณมากอย่างรวดเร็วแต่ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จึงเกิดการแตกหักของชิ้นงานขึ้น

ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ ที่ไม่มีตัวช่วยประสานที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงหลังเผา ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในขั้นการทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินในน้ำ จึงได้พัฒนาต่อโดยการเติมดินคำสุราษฎร์ธานีเข้ามาในส่วนผสม



รูปที่ 4.13 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผาเมื่อผ่านการแช่น้ำ

#### 4.2.3 การศึกษาผลของการเติมดินคำสุราษฎร์ธานีในส่วนผสมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

ในการศึกษาเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ เพื่อให้มีความแข็งแรงมากพอต่อการนำไปใช้งานจริง โดยการเติมดินคำสุราษฎร์ธานีในปริมาณต่างๆ จากการทดลองพบว่าส่วนผสมเนื้อโดทุกสูตรที่ได้จากการผสมผงวัตถุดิบแห่งหลังการบดผสมกับสารละลายตัวช่วยประสาน และหมักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในภาชนะปิด สามารถขึ้นรูปเป็นท่อทรงกระบอกกลวงได้ด้วยวิธีการอัดรีด โดยสูตรที่มีส่วนผสมของดินสามารถนวดผสมได้ดีกว่าสูตรที่ไม่มีดินเป็นส่วนผสม เนื่องจากสมบัติของดินสามารถช่วยเพิ่มความเหนียวของส่วนผสมได้ และพบว่าชิ้นงานหลังอบมีความแข็งแรงมากพอสำหรับการขนย้ายและสามารถตัดให้มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ได้

เมื่อพิจารณาสมบัติหลังเผาของชิ้นงานทั้ง 3 สูตร (ดังแสดงในตารางที่ 3.2) พบว่าชิ้นงานมีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาลดลงเมื่อปริมาณดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากในขั้นตอนการผสมขึ้นรูปมีการใช้สารละลายตัวช่วยประสานไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 3.2 คือสูตรที่มีปริมาณ

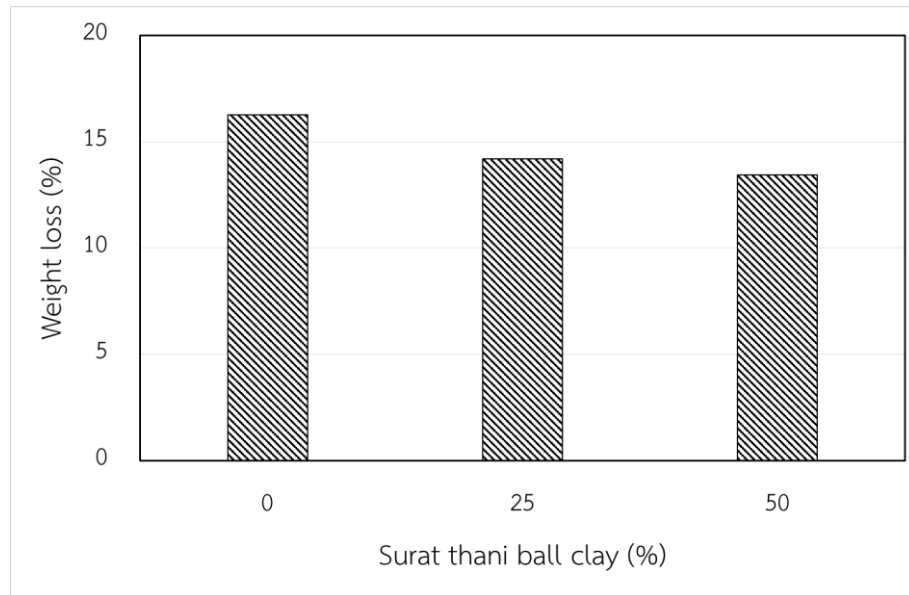


ดินดำร้อยละ 0 25 และ 50 โดยน้ำหนักรวมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ หรือ สูตร BC0 BC25 และ BC50 ตามลำดับ ใช้สารละลายตัวช่วยประสานร้อยละ 110 80 และ 70 โดยน้ำหนักของผงวัตถุดิบ ตามลำดับ สูตรที่มีปริมาณดินดำมากที่สุดใช้ปริมาณสารละลายตัวช่วยประสานน้อยที่สุด เนื่องจากดินดำสามารถเพิ่มความเหนียวให้กับส่วนผสมโดยรวมได้มากขึ้น รวมทั้งสัดส่วนของถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ ที่ใช้เป็นส่วนผสมมีปริมาณน้อยที่สุด ซึ่งวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นวัสดุที่ไม่มี ความเหนียวและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จึงต้องการน้ำและตัวช่วยประสานมากขึ้นเพื่อให้ส่วนผสมมีความเหนียวที่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดได้<sup>[87]</sup> เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ พบว่าตัวช่วยประสานที่มีในส่วนผสมของชิ้นงานเกิดการเผาไหม้และสลายไป จึงทำให้น้ำหนักหลังเผาสูญหายไป และอีกปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานคือปริมาณสารอินทรีย์และการสูญเสียน้ำในโครงสร้างของเคโอลิไนต์ในดินดำสุราษฎร์ธานี<sup>[88, 89]</sup> โดยพิจารณาจากค่า LOI ของดินดำสุราษฎร์ธานีดังแสดงในตารางที่ 4.1 แต่เนื่องจากผลของปริมาณตัวช่วยประสานมีอิทธิพลมากกว่าผลของปริมาณดินดำที่เพิ่มขึ้น จึงไม่กระทบต่อแนวโน้มของค่าการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมของชิ้นงาน

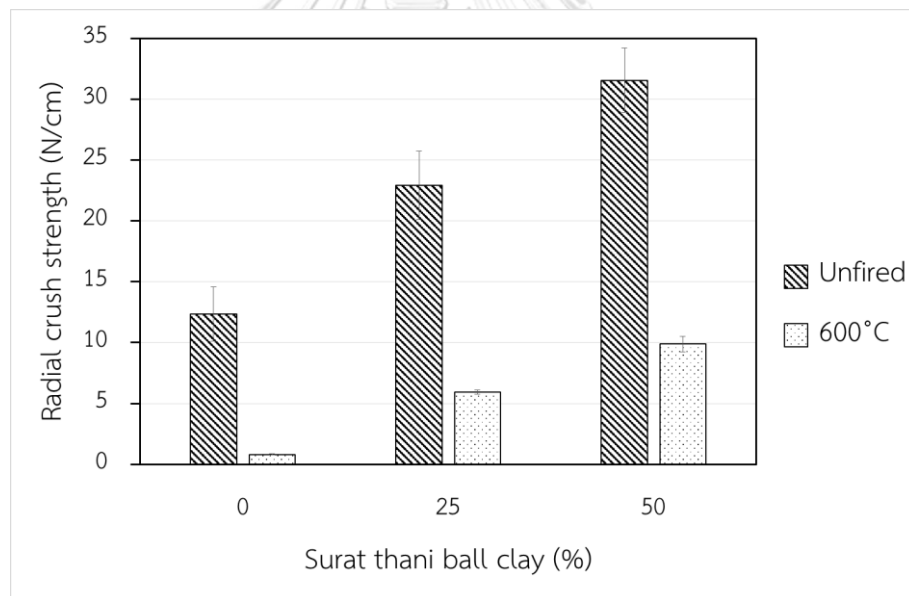
ในส่วนของความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกันทั้งก่อนและหลังเผา แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยชิ้นงานสูตร BC0 BC25 และ BC50 มีค่าความแข็งแรงก่อนเผา 12.36 22.93 และ 31.56 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าความแข็งแรงหลังเผา 0.81 5.94 และ 9.88 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนและหลังเผา พบว่าชิ้นงานก่อนเผามีค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานหลังเผาอย่างชัดเจน เนื่องจากชิ้นงานก่อนเผามีส่วนประกอบของตัวช่วยประสานซึ่งสามารถช่วยให้ชิ้นงานคงรูปได้และยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานได้ แต่เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้และสลายตัวของตัวช่วยประสาน ทิ้งไว้เพียงถ่านหรือคาร์บอนและรูพรุนภายในชิ้นงานเท่านั้น เมื่อชิ้นงานเกิดรูพรุนมากขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา<sup>[90]</sup>

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณดินดำในชิ้นงานพบว่าเมื่อมีปริมาณดินดำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเผามีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากดินดำเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสำหรับชิ้นงานก่อนเผาและยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับชิ้นงานหลังเผาได้ดี เพื่อช่วยประสานอนุภาควัสดุอื่นๆ ในชิ้นงานได้<sup>[91]</sup> นอกจากนี้การที่ความแข็งแรงของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเผามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณดินดำเพิ่มมากขึ้น

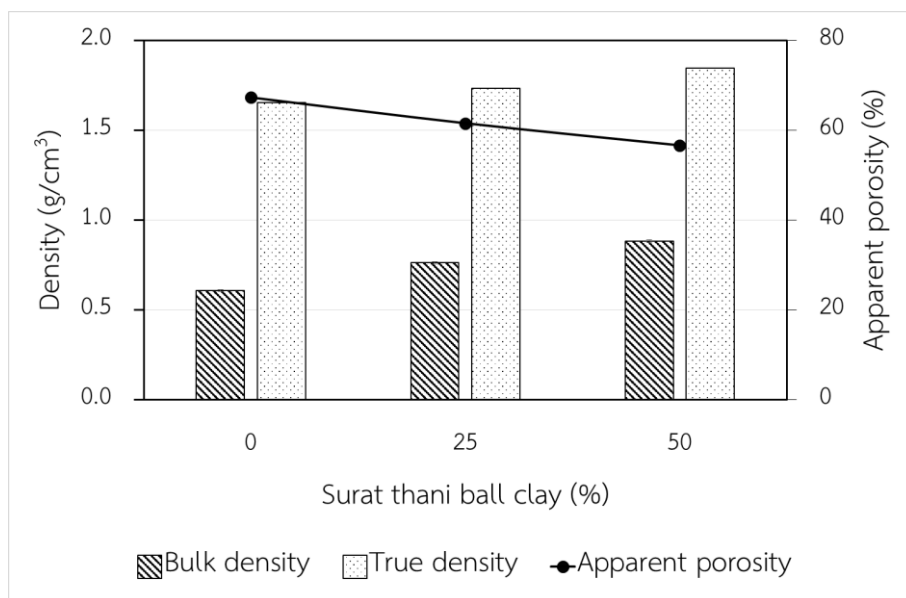
ยังเป็นผลมาจากการลดลงของสัดส่วนของถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ อีกด้วย<sup>[92, 93]</sup> และสำหรับความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผายังมีอีกปัจจัยที่ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณดินดำมากขึ้นคือรูพรุนที่เกิดจากการสลายตัวของตัวช่วยประสานหลังเผา กล่าวคือชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของดินดำเพิ่มมากขึ้น ใช้ปริมาณสารละลายตัวช่วยประสานน้อยลง เมื่อชิ้นงานถูกเผาก็เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงานในปริมาณที่ลดลง เมื่อพิจารณาความแข็งแรงและความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานหลังเผาพบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผามีผลสอดคล้องกับค่าความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานหลังเผาดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณดินดำมากขึ้น โดยค่าความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงาน สูตร BC0 BC25 และ BC50 หลังเผามีค่าลดลงจากร้อยละ 67.31 61.56 และ 56.64 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงของชิ้นงาน สูตร BC0 BC25 และ BC50 หลังเผาดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณดินดำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 25 และ 50 โดยน้ำหนักรวมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลท์โซเดียม เอ มีค่าความหนาแน่นรวม 0.61 0.76 และ 0.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นจริง 1.65 1.73 และ 1.84 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินดำเพิ่มขึ้นหรือปริมาณถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานที่ลดลง<sup>[94]</sup> รวมถึงในดินดำมีควอตซ์เป็นส่วนประกอบหลัก<sup>[95]</sup> โดยควอตซ์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ (0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)<sup>[96]</sup> และซีโอไลท์โซเดียม เอ (1.99 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)<sup>[71]</sup> จึงส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานเพิ่มขึ้นด้วย และยังส่งผลต่อค่าความหนาแน่นจริงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.14 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน

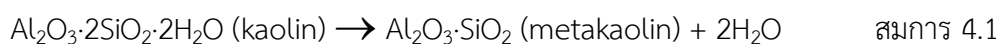


รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงก่อนและหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน

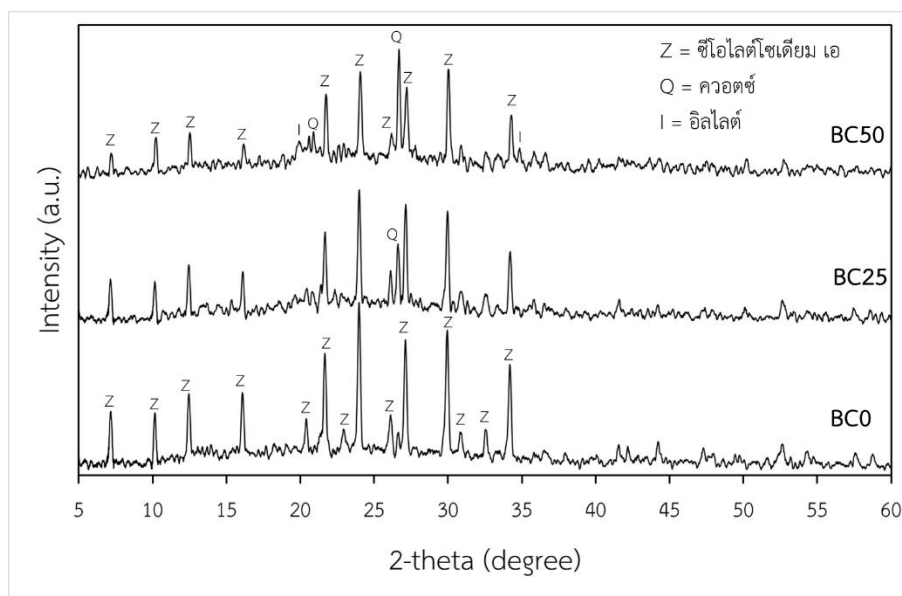


รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นจริงและความพรุนตัวปรากฏหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานสูตร BC0 BC25 และ BC50 หลังเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ในภาวะห่อหุ้ม โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ จากกราฟพบว่าไม่พบเฟสของถ่านกัมมันต์ในชิ้นงานทุกสูตร เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุอสัณฐานแต่พบว่าฐานของกราฟมีคลื่นรบกวนซึ่งเกิดจากการมีส่วนประกอบของวัสดุอสัณฐานของถ่านกัมมันต์และเมทาเคลลิน<sup>[97]</sup> เฟสหลักของชิ้นงานทั้ง 3 สูตร คือซีโอไลต์โซเดียม เอ และเมื่อมีปริมาณดินดำมากขึ้นพบว่ามีเฟสของควอตซ์และอิลไลต์ซึ่งเป็นเฟสหลักของดินดำสุราษฎร์ธานี แต่ไม่พบเฟสของเคโอลิไนต์ เนื่องจากเคโอลิไนต์เริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเมทาเคลลินที่อุณหภูมิประมาณ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส<sup>[98]</sup> ดังสมการ<sup>[99]</sup>

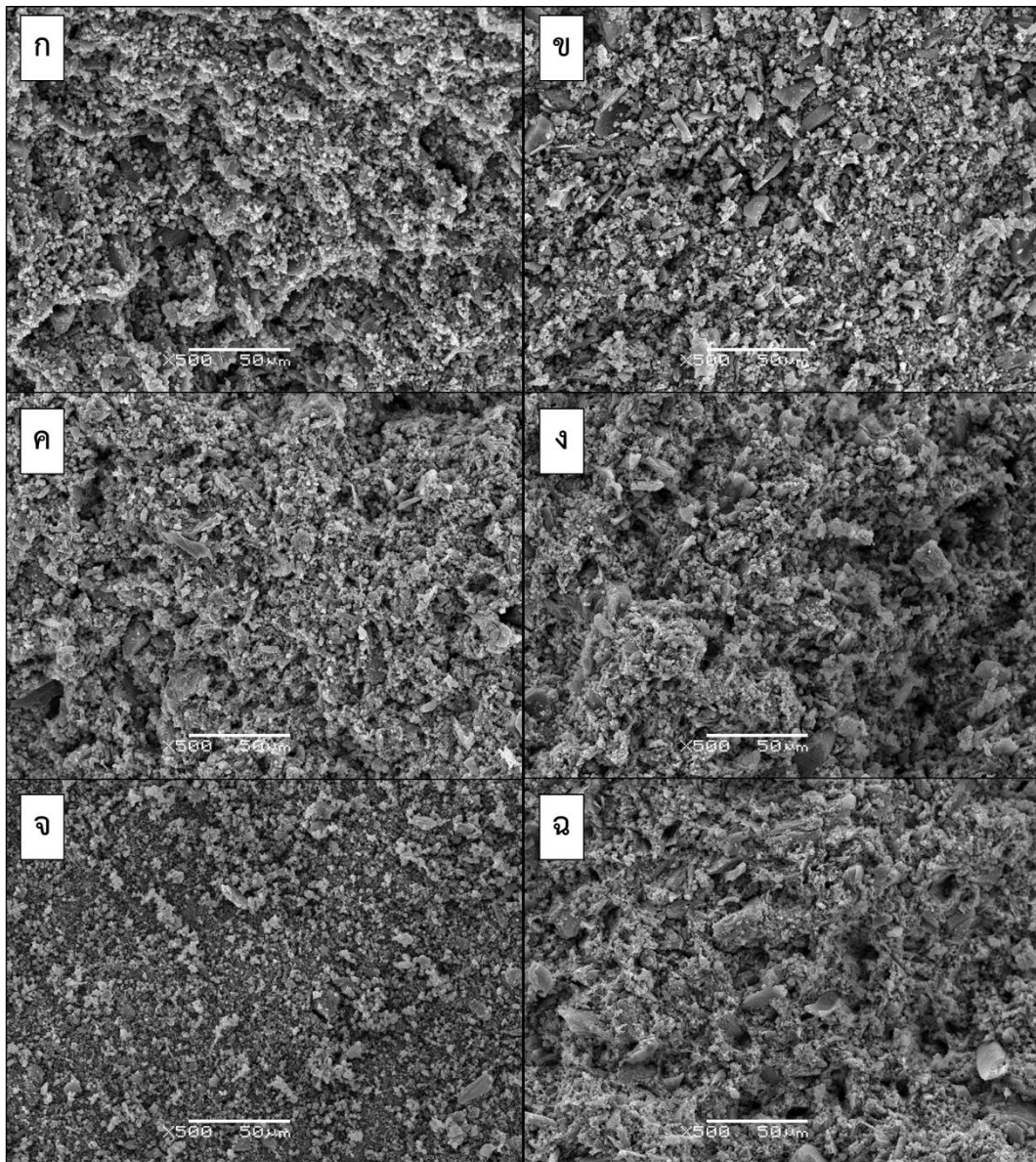


ซึ่งเมทาเคลลินอยู่ในรูปอสัณฐานจึงไม่แสดงพีคใน XRD pattern เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นวัสดุอสัณฐานเช่นกัน

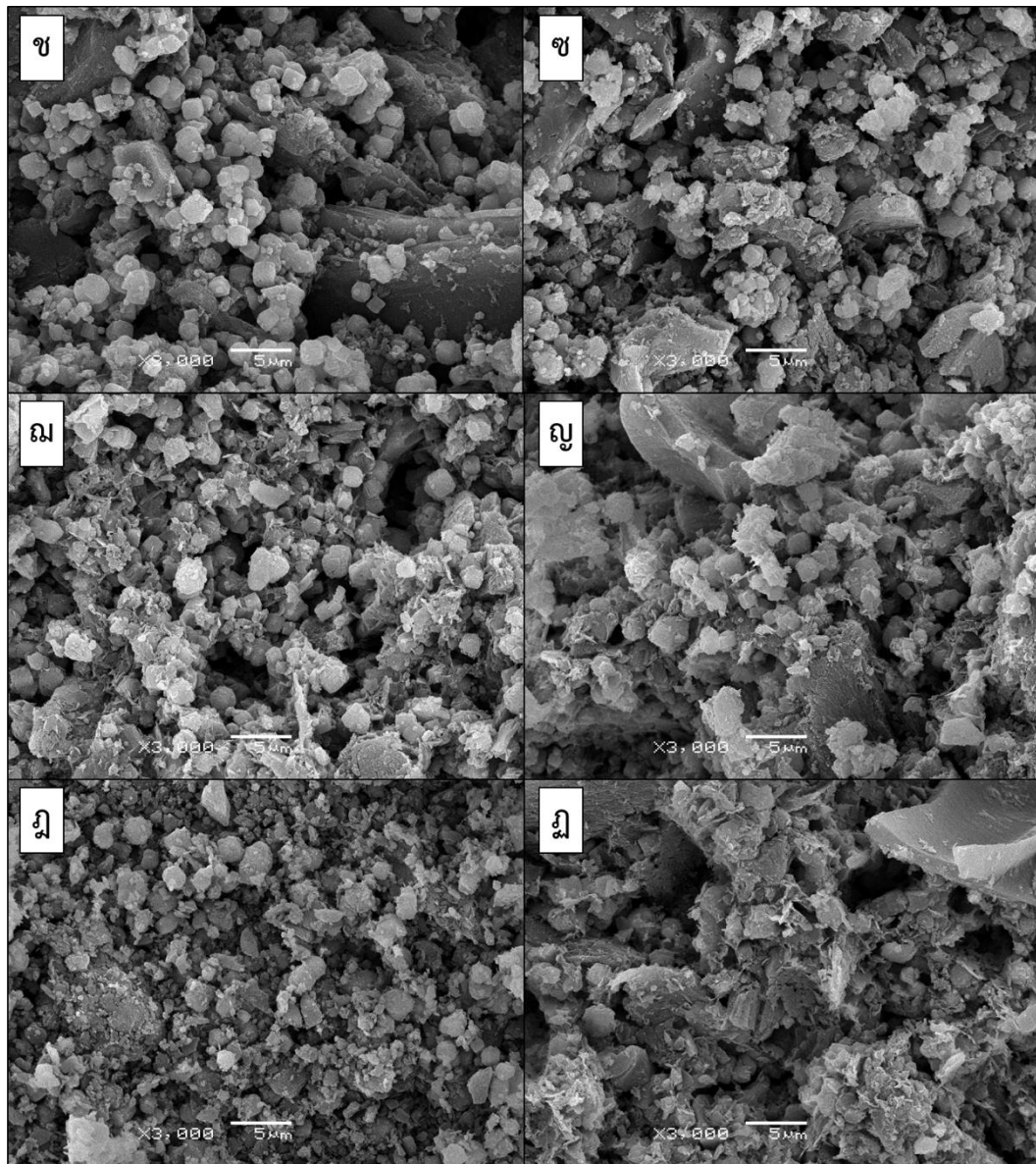


รูปที่ 4.17 XRD pattern ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน หลังเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) – (ฎ) โดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานก่อนเผาและชิ้นงานหลังเผาของทั้ง 3 สูตร จากรูป (ก) – (ฉ) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังเผาที่ กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหลังเผามีความพรุนตัวมากขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของตัวเชื่อมประสานซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบค่าความพรุนตัวปรากฏ ส่งผลให้ทั้งรูพรุนไว้ในเนื้อของชิ้นงาน และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเมื่อมีปริมาณดินดำต่างกัน พบว่าสูตร BC50 ซึ่งมีปริมาณดินดำมากที่สุด มีความพรุนตัวน้อยที่สุดทั้งก่อนและหลังเผา จากรูปที่ 4.18 (ซ) – (ฎ) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบก่อนและหลังเผาที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าเมื่อพิจารณาถึงการเชื่อมเกาะกันของอนุภาคภายในชิ้นงานพบว่าสูตร BC50 มีการเชื่อมเกาะกันมากกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากปริมาณดินดำที่มากขึ้นส่งผลให้ในชิ้นงานมีตัวช่วยประสานทั้งก่อนและหลังเผามากขึ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะชิ้นงานหลังเผาพบว่าผลึกของซีโอไลต์โซเดียม เอ ยังคงอยู่ ซึ่งมีรูปร่างทรงลูกบาศก์ และพบอนุภาคของควอตซ์กระจายอยู่ในเนื้อชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบอนุภาคของถ่านกัมมันต์กระจายอยู่ทั่วเนื้อชิ้นงานด้วย เพราะว่าการเผาชิ้นงานในภาชนะปิดและมีถ่านกลบปกคลุมเป็นการเผาเสมือนในสภาวะไม่มีออกซิเจนจึงสามารถช่วยป้องกันการสลายตัวของถ่านกัมมันต์ได้



รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำ  
 สุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน ก่อนและหลังเผา ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก) = สูตร BC0 ก่อนเผา  
 (ข) = สูตร BC0 หลังเผา (ค) = สูตร BC25 ก่อนเผา (ง) = สูตร BC25 หลังเผา  
 (จ) = สูตร BC50 ก่อนเผา และ (ฉ) = สูตร BC50 หลังเผา

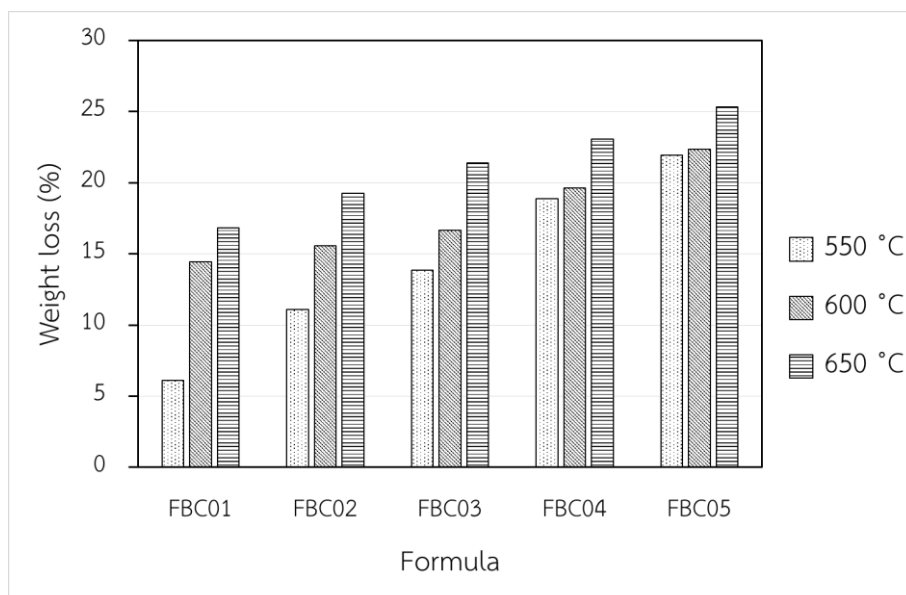


รูปที่ 4.18 (ต่อ) โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีปริมาณของดินดำสุราษฎร์ธานีแตกต่างกัน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ช) = สูตร BC0 ก่อนเผา (ซ) = สูตร BC0 หลังเผา (ฅ) = สูตร BC25 ก่อนเผา (ฆ) = สูตร BC25 หลังเผา (ฉ) = สูตร BC50 ก่อนเผา และ (ง) = สูตร BC50 หลังเผา

#### 4.2.4 การศึกษาผลของอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยมีดินดำสุราษฎร์ธานีเป็นตัวประสาน

ในการศึกษานี้ได้นำสูตร BC50 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณดินดำสุราษฎร์ธานีร้อยละ 50 ของน้ำหนักรวมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ จากการทดลองที่ 4.2.2 มาพัฒนาต่อโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ รวมถึงได้

ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้เผาชิ้นงาน เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนหลังเผา โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ จาก 0:100 25:75 50:50 75:25 และ 100:0 โดยกำหนดเป็นชื่อสูตรตัวอย่าง FBC01 ถึง FBC05 ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาจาก 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในส่วนของผลการทดลองมีดังนี้

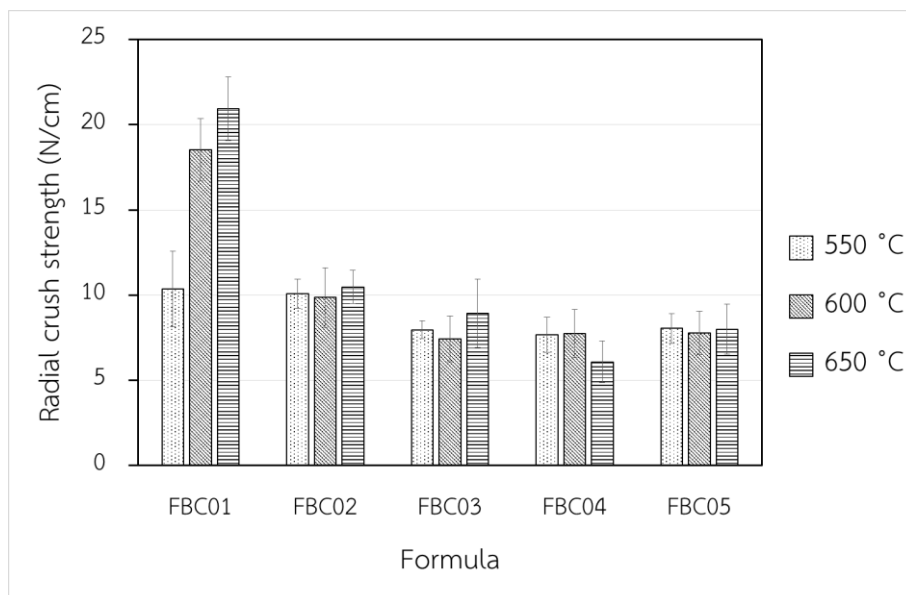


รูปที่ 4.19 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.19 แสดงการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน โดยการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานสูตร FBC01 FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละ 6.13 11.08 13.87 18.88 และ 21.95 ตามลำดับ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละ 14.45 15.59 16.64 19.63 และ 22.35 ตามลำดับ และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละ 16.84 19.26 21.40 23.09 และ 25.33 ตามลำดับ พบว่าเมื่อชิ้นงานมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเผาเดียวกัน เนื่องจากปริมาณของสารละลายตัวช่วยประสานที่ใช้ในการผสมขึ้นรูปที่ต่างกัน กล่าวคือมีการใช้สารละลายตัวช่วยประสานเพิ่มขึ้น เมื่อชิ้นงานมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์มากขึ้น จึงทำให้เกิดการสลายตัวของตัวช่วยประสานหลังเผาที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิเผาชิ้นงานพบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักหลังเผามีค่า



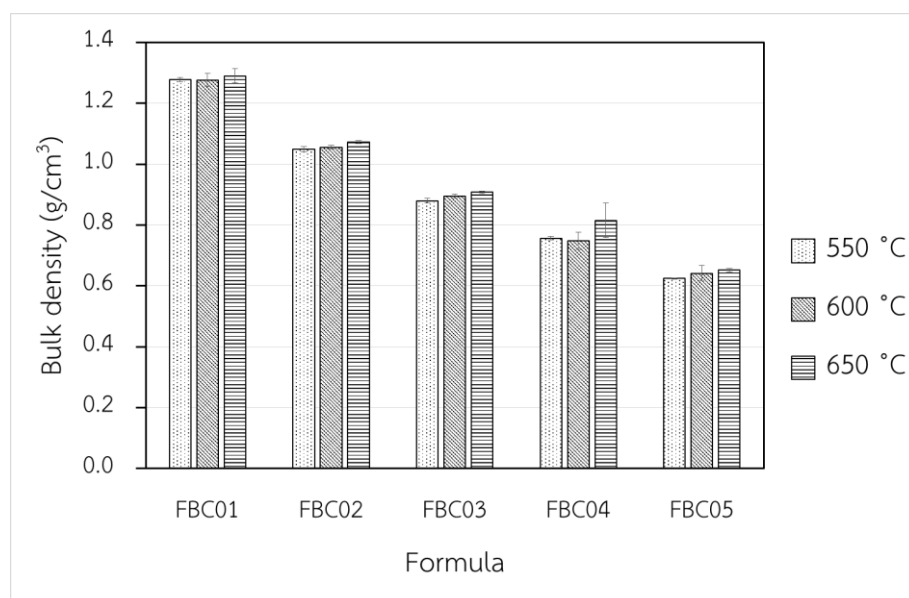
สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก 3 เหตุผล คือ การสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวช่วยประสานเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนเฟสของเคโอลิไนต์ไปเป็นเมทาเคอลินเพิ่มขึ้น และการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่มีในดินดำเพิ่มขึ้น



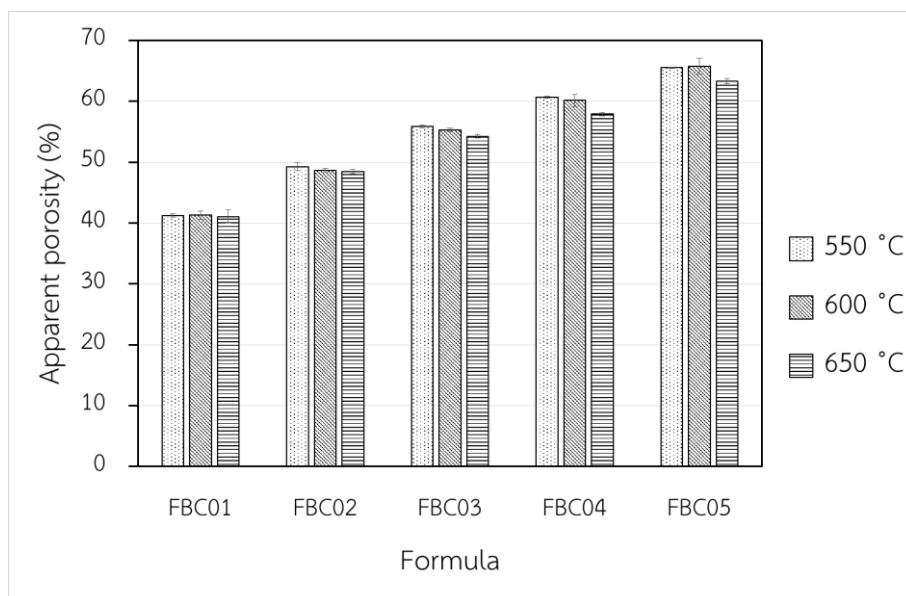
รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่างกัน

จากรูปที่ 4.20 แสดงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิเผาต่างๆ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่างกัน โดยความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร FBC01 FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีค่า 10.38 10.07 7.97 7.67 และ 8.05 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่า 18.53 9.86 7.42 7.74 และ 7.79 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีค่า 20.94 10.48 8.93 6.08 และ 8.00 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น เนื่องจากชิ้นงานมีความพรุนตัวที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่ออัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ในชิ้นงานมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ส่งผลให้เนื้อวัสดุที่อยู่ในชิ้นงานถูกแทนที่ด้วยรูพรุนจึงทำให้เนื้อวัสดุมีปริมาณน้อยลง ซึ่งเนื้อวัสดุที่อยู่ในชิ้นงานนั้นทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้ชิ้นงานได้<sup>[91]</sup> และการมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ในชิ้นงานมากขึ้น ยังเป็นการขัดขวางการเชื่อมประสานกันของอนุภาคดินดำในระหว่างการเผาด้วย<sup>[100]</sup> เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเผาชิ้นงานพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อค่าความ

แข็งแรงของชิ้นงานสูตร FBC01 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาจาก 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส แต่สำหรับสูตร FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่มีในชิ้นงานสามารถขัดขวางการเชื่อมประสานของอนุภาคดินดำในขณะที่เผาชิ้นงานได้ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิเผาก็จึงมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานไม่ชัดเจน ซึ่งสูตร FBC01 เป็นสูตรที่ไม่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นอนุภาคของดินดำจึงเกิดการเชื่อมประสานกันเพิ่มมากขึ้น เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น<sup>[101]</sup> ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นรวมหลังเผาที่อุณหภูมิเผาแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์ซีเคียม เอ แตกต่างกัน



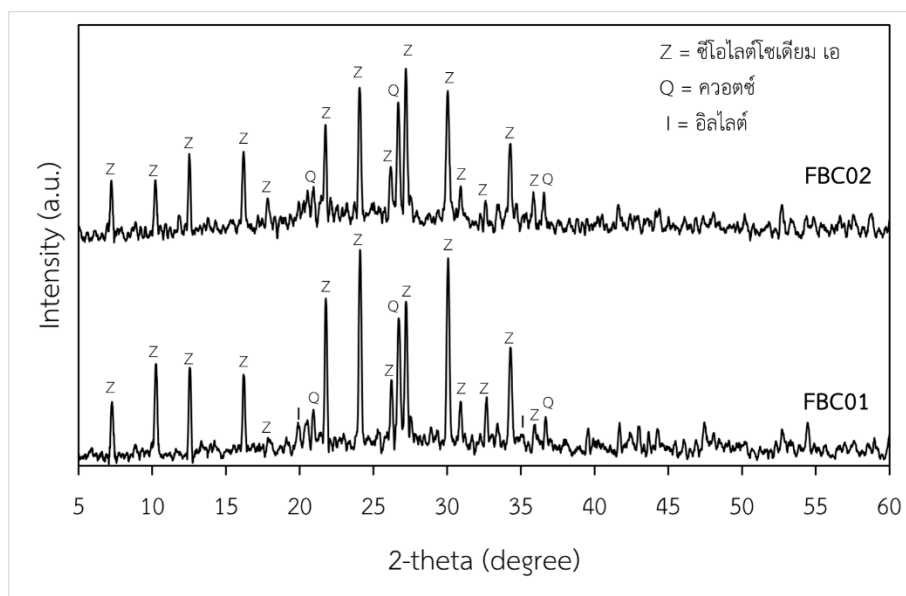
รูปที่ 4.22 ความพรุนตัวปรากฏหลังเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงค่าความหนาแน่นรวมและความพรุนตัวปรากฏหลังเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน โดยความหนาแน่นรวมหลังเผาของชิ้นงานสูตร FBC01 FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีค่า 1.28 1.05 0.88 0.76 และ 0.62 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่า 1.28 1.06 0.90 0.75 และ 0.64 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีค่า 1.29 1.07 0.91 0.82 และ 0.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนความพรุนตัวปรากฏหลังเผาของชิ้นงาน FBC01 FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละ 41.24 49.25 55.87 60.68 และ 65.50 ตามลำดับ เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่า 41.29 48.62 55.26 60.13 และ 65.74 ตามลำดับ และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีค่า 41.04 48.47 54.25 57.89 และ 63.29 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นรวมและความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผามีค่าสอดคล้องกัน คือเมื่ออัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและความพรุนตัวปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าซีโอไลต์โซเดียม เอ การเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ในชิ้นงานจึงส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงาน นอกจากนั้นการเชื่อมกันของอนุภาคภายในชิ้นงานก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมเช่นกัน เนื่องจากการเชื่อมประสานกันของ

ดินดำเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อชิ้นงานมีถ่านกัมมันต์มากขึ้น จึงส่งผลให้มีรูพรุนอยู่ในชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งรูพรุนที่มีในชิ้นงานนั้นเกิดขึ้นจากการสลายตัวของตัวช่วยประสานอินทรีย์ที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยมีการใช้สารละลายตัวช่วยประสานในการขึ้นรูปมากขึ้นเมื่อชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์สูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนั้นความพรุนตัวปรากฏหลังเผาของชิ้นงานจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ความพรุนตัวในชิ้นงานยังเกิดจากปริมาณสารอินทรีย์และการสูญเสียน้ำในโครงสร้างของเคโอลิไนต์ในดินดำสุราษฏร์ธานี ดังที่กล่าวในการทดลองที่ 4.2.2 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานจาก 550 600 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและความพรุนตัวปรากฏมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการเชื่อมประสานกันของอนุภาคภายในชิ้นงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

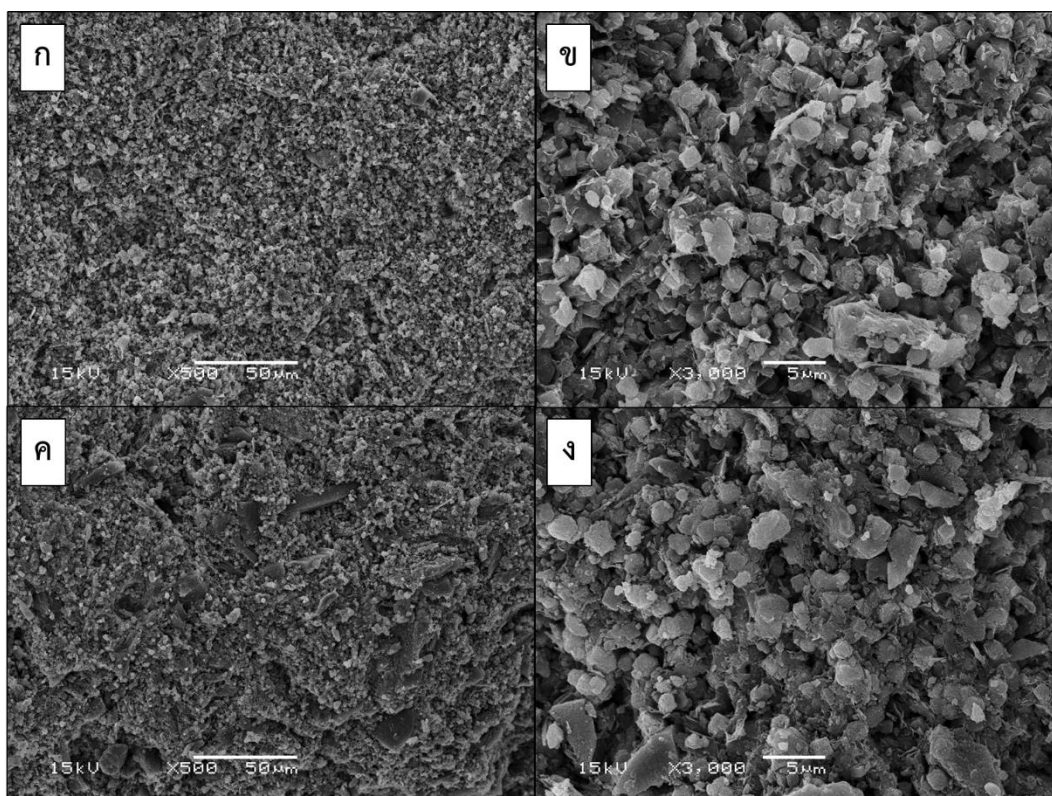
จากผลของสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ โซเดียม เอ ในการทดลองนี้พบว่าชิ้นงานสูตร FBC01 และ FBC02 ซึ่งมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ 0:100 และ 25:75 และมีดินดำสุราษฏร์ธานีร้อยละ 50 โดยน้ำหนักรวมของถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์โซเดียม เอ เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีสมบัติที่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงหลังเผาที่มีค่ามากกว่า 10 นิวตันต่อเซนติเมตร จึงได้นำ 2 สูตรนี้ มาศึกษาองค์ประกอบทางเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคต่อไป

จากรูปที่ 4.23 แสดงองค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานสูตร FBC01 และ FBC02 หลังเผาที่ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาวะขณะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ จากผลการวิเคราะห์พบว่าชิ้นงานทั้ง 2 สูตร มีเฟสหลักคือซีโอไลต์โซเดียม เอ และควอตซ์ และพบเฟสรองคืออิลไลต์ แต่ไม่พบเฟสของถ่านกัมมันต์เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุอสัณฐานจึงไม่แสดงพีคในแผนภาพ XRD แต่ไม่พบเฟสของเคโอลิไนต์เนื่องจากเคโอลิไนต์เริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเมทาเคลลินที่อุณหภูมิประมาณ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเมทาเคลลินเป็นวัสดุอสัณฐาน



รูปที่ 4.23 XRD patterns ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยี่นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาวะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ

ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบสูตร FBC01 และ FBC02 หลังเผาที่ 650 องศาเซลเซียส ยี่นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาวะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยรูป (ก) และ (ข) คือโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสูตร FBC01 และรูป (ค) และ (ง) คือโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานสูตร FBC02 จากรูปพบว่าชิ้นงานสูตร FBC01 ซึ่งไม่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบ มีความพรุนตัวน้อยกว่าชิ้นงานสูตร FBC02 ซึ่งมีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ 25:75 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดสอบค่าความพรุนตัวหลังเผา สำหรับชิ้นงานสูตร FBC01 พบว่ามีผลึกรูปทรงลูกบาศก์ของซีโอไลต์โซเดียม เอ กระจายอยู่ทั่วเนื้อชิ้นงานและยังพบการเชื่อมยึดกันของอนุภาคที่มีรูปร่างแบบไม่แน่นอนขององค์ประกอบในดินดำอยู่ด้วย ส่วนสูตร FBC02 นอกจากพบผลึกรูปทรงลูกบาศก์ของซีโอไลต์โซเดียม เอ และการเชื่อมยึดกันของอนุภาคที่มีรูปร่างแบบไม่แน่นอนแล้ว ยังพบอนุภาคของถ่านกัมมันต์กระจายอยู่ทั่วเนื้อชิ้นงานด้วย เนื่องจากการเผาชิ้นงานในภาวะปิดและมีถ่านแกลบปกคลุมเป็นการช่วยป้องกันการสลายตัวของถ่านกัมมันต์ได้ นอกจากนั้นในเนื้อของชิ้นงานทั้ง 2 สูตร ยังสังเกตเห็นว่ามีผลึกของซีโอไลต์โซเดียม เอ เกิดเกาะกลุ่มกันบางส่วน



รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโพลีโพรพิลีน เอ แตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในสถานะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบที่กำลังขยาย 500 และ 3,000 เท่า (ก) และ (ข) = สูตร FBC01 และ (ค) และ (ง) = สูตร FBC02

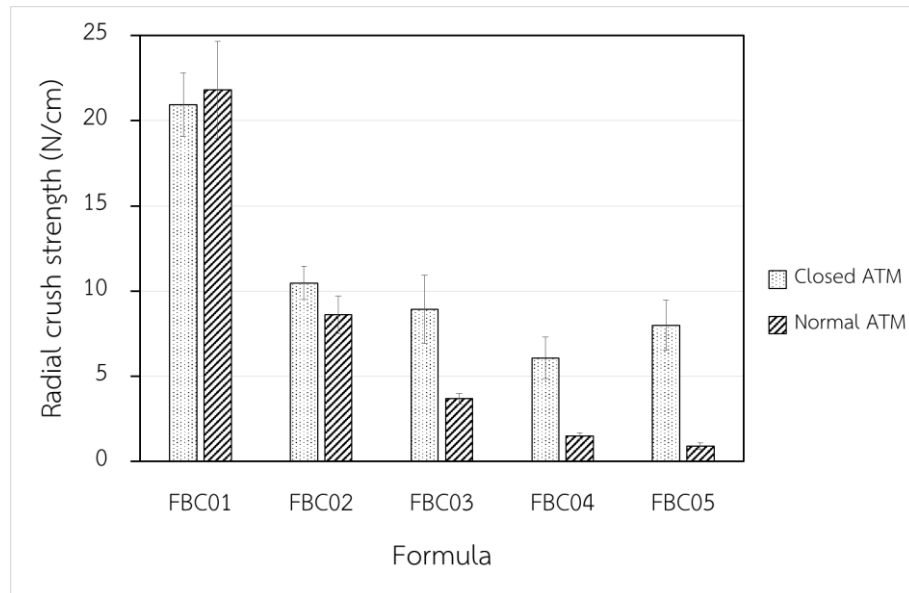
#### 4.2.5 การศึกษาผลของบรรยากาศการเผาชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเผา

ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบบรรยากาศในการเผาต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโพลีโพรพิลีน เอ แตกต่างกัน โดยเฉพาะความแข็งแรงและความหนาแน่นรวมหลังเผา ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำชิ้นงานไปใช้งานจริงอย่างยิ่ง โดยเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พิจารณาเปรียบเทียบบรรยากาศการเผา 2 สภาวะ คือสภาวะในสถานะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบจากการทดลองที่ 4.2.4 และสภาวะบรรยากาศปกติ เนื่องจากต้องการศึกษาการเชื่อมเกาะกันของอนุภาคภายในชิ้นงานเมื่อถ่านกัมมันต์สลายตัวระหว่างการเผาชิ้นงาน

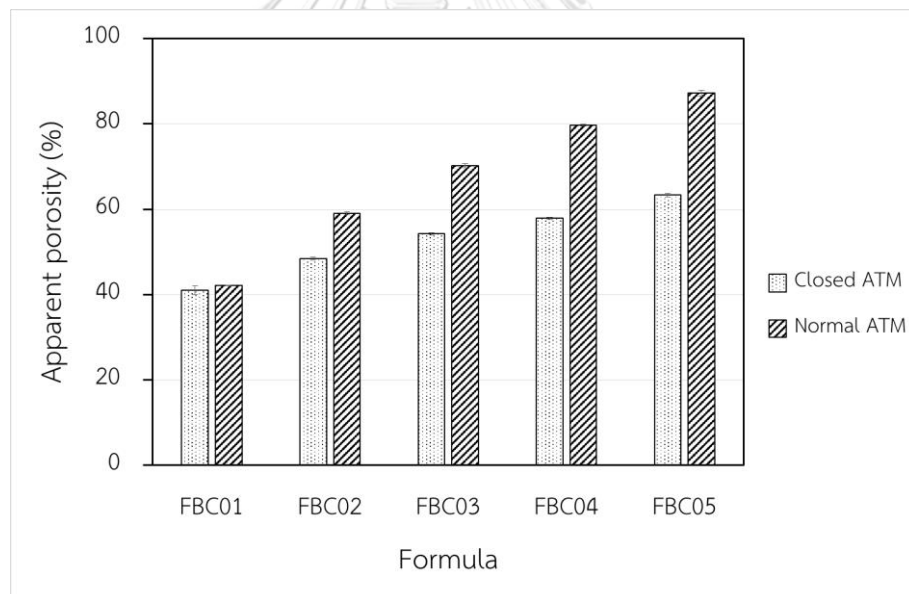
ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่สภาวะต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.25 โดยความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร FBC01 FBC02 FBC03 FBC04 และ FBC05 เผาที่อุณหภูมิ

650 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ มีค่า 20.94 10.48 8.93 6.08 และ 8.00 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเผาในบรรยากาศปกติมีค่า 21.81 8.62 3.68 1.51 และ 0.91 นิวตันต่อเซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่า การเผาชิ้นงานในสภาวะต่างกันไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานสูตร FBC01 เนื่องจากชิ้นงานสูตรนี้ไม่มีองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ สิ่งที่แตกต่างกันเนื่องจากสภาวะการเผาที่แตกต่างกันคือการสลายตัวของสารช่วยประสานอินทรีย์เท่านั้น ซึ่งชิ้นงานหลังเผาที่บรรยากาศปกติเกิดการสลายตัวของสารช่วยประสานอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ แต่ชิ้นงานหลังเผาในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ เกิดการสลายตัวของสารช่วยประสานอินทรีย์เพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วนชิ้นงานสูตร FBC02 ถึง FBC05 ซึ่งมีปริมาณถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบมากขึ้นตามลำดับ พบว่าความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานที่เผาในบรรยากาศปกติมีค่าน้อยกว่าการเผาชิ้นงานในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ เนื่องจากเกิดการสลายตัวของถ่านกัมมันต์และสารช่วยประสานอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ในชิ้นงานที่เผาในสภาวะปกติ แต่ไม่เกิดกับชิ้นงานที่เผาในภาชนะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ การสลายตัวของถ่านกัมมันต์ส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน จึงทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผามีค่าน้อยลงอย่างชัดเจน<sup>[102]</sup> และความแข็งแรงมีค่าน้อยลงอย่างต่อเนื่องเมื่อชิ้นงานมีปริมาณถ่านกัมมันต์สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณถ่านกัมมันต์สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนจากการสลายตัวของถ่านกัมมันต์ในชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเผาในบรรยากาศปกติ ซึ่งสามารถยืนยันด้วยผลความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผาดังรูปที่ 4.26 การสลายตัวของถ่านกัมมันต์และสารช่วยประสานอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ของชิ้นงานหลังเผาที่บรรยากาศปกติเกิดจากปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์ในชิ้นงาน และเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

จากผลที่ได้ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการเผาชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ไม่สามารถทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นได้ แต่ยังทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง เมื่อมีปริมาณถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นในชิ้นงานเท่านั้น แต่ไม่สามารถสร้างการเชื่อมยึดกันของอนุภาคภายในชิ้นงานได้ อาจเกิดจากอุณหภูมิที่ใช้เผาไม่เพียงพอต่อการทำให้ดินเกิดการเชื่อมยึดกันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 ความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในสภาวะต่างกัน ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน



รูปที่ 4.26 ความพรุนตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ในสภาวะต่างกัน ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ แตกต่างกัน

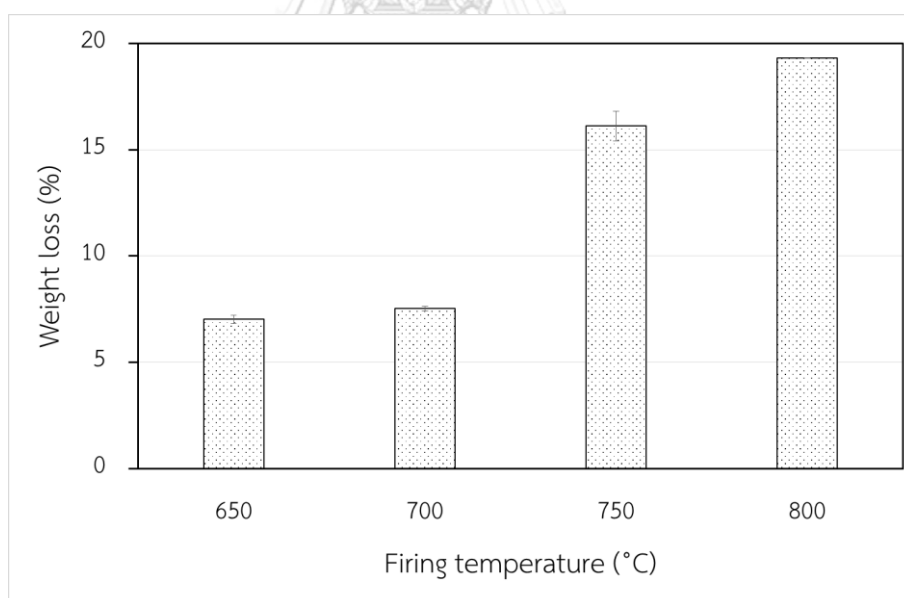
#### 4.2.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกสูตร FBC01 มีความแข็งแรงสูงที่สุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ในการทดลองนี้จึงต้องการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานที่



สูงขึ้นต่อสมบัติหลังเผาของชิ้นงานสูตร FBC01 ซึ่งไม่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบ โดยเปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานสูตร FBC01 ที่อุณหภูมิ 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ

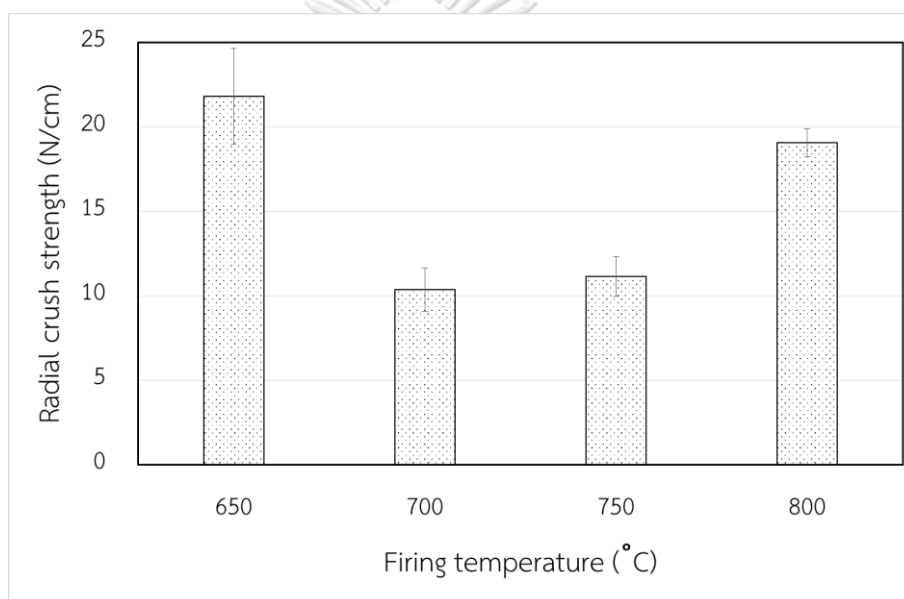
จากรูปที่ 4.27 แสดงการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีถ่านกัมมันต์เป็นส่วนประกอบ พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.02 7.53 16.11 และ 19.31 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 650 และ 700 องศาเซลเซียส มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เกิดเพียงการสลายตัวของสารช่วยประสานที่มีอยู่ในชิ้นงาน เท่านั้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาไปที่ 700 องศาเซลเซียส โครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียม เอ ในชิ้นงานเริ่มเกิดการพังหรือสลายตัว (Collapse) และเกิดอย่างต่อเนื่องที่ 750 องศาเซลเซียส จนสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส<sup>[103-105]</sup> นอกจากนั้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ยังเป็นอุณหภูมิที่ซิลิเกตเริ่มเกิดการสลายตัวด้วย



รูปที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ความแข็งแรงมีค่า 21.81 10.36 11.13 และ 19.05 นิวตันต่อเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาจาก 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า

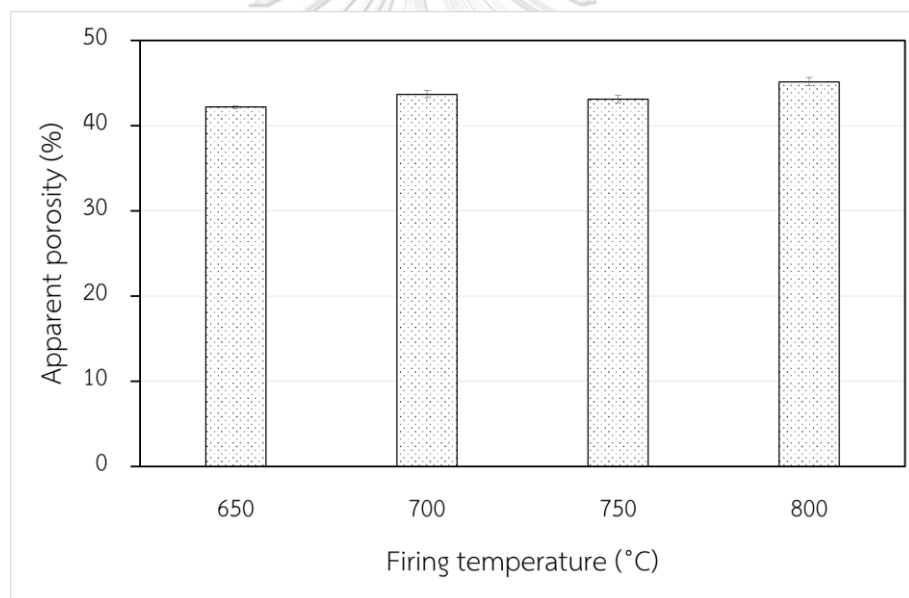
ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 750 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการพังของซีโอไลต์โซเดียม เอ ที่เริ่มเกิดเมื่ออุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และเกิดมากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งการพังของโครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียม เอ นั้น ทำให้สูญเสียความเป็นผลึกและเปลี่ยนเป็นวัสดุอสัณฐาน จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพอร์นมีค่าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นถึง 800 องศาเซลเซียส ดินดำในชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อแก้ว (Vitrification) และทำให้เกิดการเชื่อมยึดกันของอนุภาคในชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น<sup>[89, 101, 106]</sup>



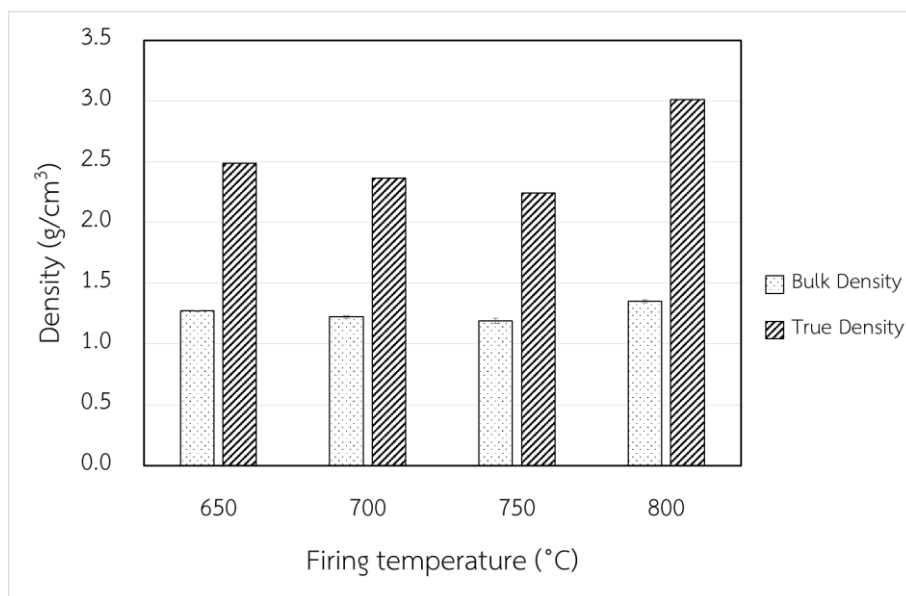
รูปที่ 4.28 ความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ

เมื่อพิจารณาความพรุนตัวปรากฏ ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30 พบว่าความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาจาก 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยมีค่าร้อยละ 42.16 43.69 43.12 และ 45.16 ตามลำดับ เนื่องจากการพังของโครงสร้างซีโอไลต์โซเดียม เอ ที่อุณหภูมิ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส<sup>[103]</sup> จึงทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การพังเกิดสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ในเวลาเดียวกันดินดำในชิ้นงานเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อแก้วซึ่งส่งผลให้ความพรุนตัวมีค่าลดลง จึงทำให้ความพรุนตัวปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียม เอ เป็นส่วนผสมหลักของ

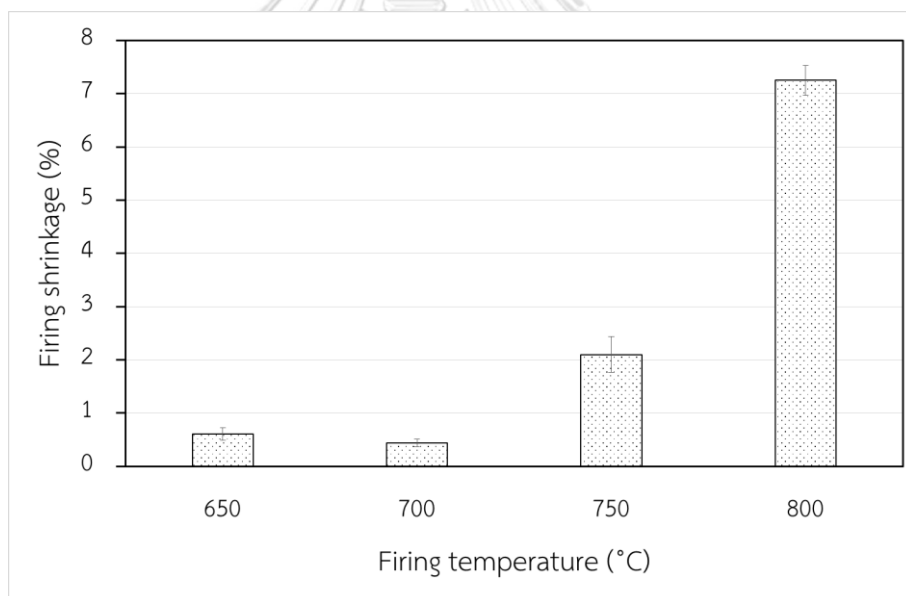
ชิ้นงานสูตร FBC01 เมื่อเกิดการพังและเปลี่ยนเป็นวัสดุอสังฐาน จึงส่งผลต่อค่าความพรุนตัวได้มากกว่าผลของการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อแก้วของดินดำ ซึ่งสามารถอธิบายได้เพิ่มเติมเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริง โดยความหนาแน่นรวมมีค่า 1.27 1.22 1.19 และ 1.35 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นจริงมีค่า 2.49 2.37 2.25 และ 3.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาจาก 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 650 700 และ 750 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการพังของโครงสร้างของซีโอไลต์โซเดียมเอ และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากดินดำเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อแก้วและเกิดการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.31 และเกิดการเปลี่ยนเฟสของซีโอไลต์โซเดียมเอ ที่เป็นอสังฐานไปเป็นผลึกของโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ยืนยันได้ด้วยผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.29 ความพรุนตัวปรากฏของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ



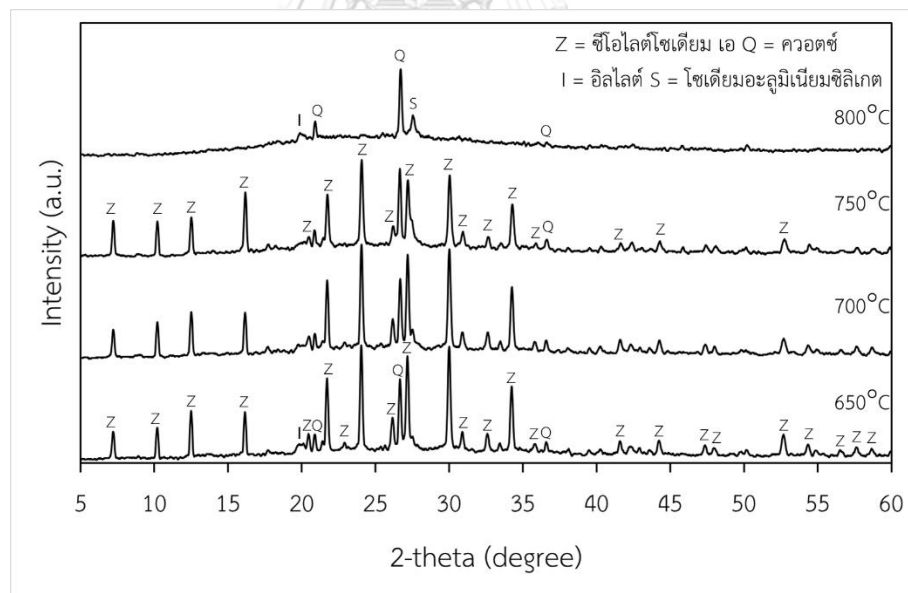
รูปที่ 4.30 ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงของชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ



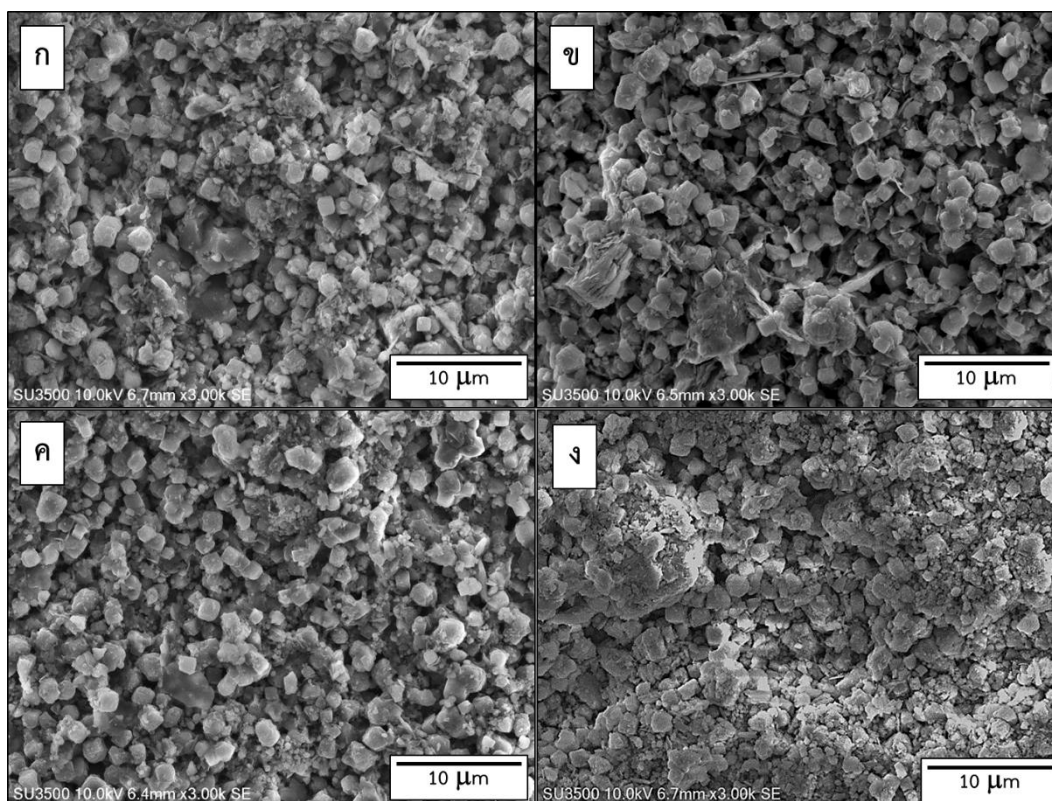
รูปที่ 4.31 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 ถึง 800 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าเฟสหลักที่พบในชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 700 และ 750 องศาเซลเซียส คือซีโอไลต์โซเดียม เอ และควอตซ์ ส่วนเฟสรองคือ อิลไลต์ ซึ่งมาจากวัตถุดิบหลักคือซีโอไลต์โซเดียม เอ และดินดำ เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของซีโอไลต์โซเดียม เอ โดยเปรียบเทียบจากความสูงของพีคควอตซ์และ

พีคซีโอไลต์โซเดียม เอ พบว่าซีโอไลต์โซเดียม เอ มีความเป็นผลึกลดน้อยลงเมื่อเผาขึ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โซเดียม เอ พังเพิ่มขึ้นเมื่อขึ้นงานถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อขึ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าเฟสซีโอไลต์โซเดียม เอ ได้ถูกทำลายพังและหายไป และพบเฟสใหม่เกิดขึ้นคือโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต<sup>[107]</sup> การสลายไปของซีโอไลต์โซเดียม เอ สามารถยืนยันได้ด้วยภาพโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 4.33 (ก) ถึง (ง) ซึ่งแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของขึ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าผลึกทรงลูกบาศก์ของซีโอไลต์โซเดียม เอ ยังคงมีอยู่ในขึ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 700 และ 750 องศาเซลเซียส แต่พบว่าความเป็นรูปผลึกทรงลูกบาศก์ของซีโอไลต์โซเดียม เอ เริ่มสูญเสียไปเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาเป็น 700 และ 750 องศาเซลเซียส และยังพบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ความเป็นรูปผลึกทรงลูกบาศก์ของซีโอไลต์โซเดียม เอ ได้สูญเสียไปอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียม เอ เป็นชนิดที่มีสัดส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ดังนั้นซีโอไลต์โซเดียม เอ จึงเริ่มพังและสลายตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าซีโอไลต์ชนิดอื่นๆ



รูปที่ 4.32 XRD pattern ของขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์ หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.33 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่ไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์หลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศปกติ ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ก) 650 °C (ข) 700 °C (ค) 750 °C และ (ง) 800 °C

จากผลการทดลองการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโฟโตแคทาไลสต์สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นตัวรองรับเพื่อเคลือบผงวัสดุโฟโตแคทาไลสต์คือ ชิ้นงานสูตร FBC01 และ FBC02 ซึ่งชิ้นงานสูตร FBC01 มีปริมาณของซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อดินดำสุราษฏร์ธานีเท่ากับ 100:50 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ โดยชิ้นงานหลังเผามีค่าความแข็งแรง 21.81 นิวตันต่อเซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 42.16 ความหนาแน่นรวม 1.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลักคือซีโอไลต์โซเดียม เอ และควอตซ์ เฟสรองคืออิลไลต์ ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.34 (ก) ส่วนชิ้นงานสูตร FBC02 มีปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อดินดำสุราษฏร์ธานี เท่ากับ 25:75:50 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาวะปิด โดยชิ้นงานถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ โดยชิ้นงานหลังเผามีค่าความแข็งแรง 10.48 นิวตันต่อเซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 48.47 ความหนาแน่นรวม 1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลักคือซีโอไลต์โซเดียม เอ และควอตซ์ เฟสรองคืออิลไลต์ ลักษณะชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.34 (ข)



รูปที่ 4.34 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับ เคลือบวัสดุโฟโตแคตาลิสต์หลังเผาที่ 650 องศาเซลเซียส สูตร (ก) FBC01 และ (ข) FBC02

#### 4.3 การพัฒนาวัสดุโฟโตแคตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์

การศึกษานี้ได้สนใจการปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำหน้าที่เป็น วัสดุโฟโตแคตาลิสต์ และช่วยให้สามารถมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกมากขึ้น ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ โดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์มาทำงานร่วมกับไฟไรต์จากกากของเสีย มาร์คาไซด์ และในการศึกษาได้ใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงเนื่องจากมีช่วง คลื่นแสงที่เป็นช่วงแสงยูวีและช่วงแสงที่ตามองเห็นรวมอยู่ด้วย จึงนำมาใช้เป็นตัวแทนของแสงจาก ดวงอาทิตย์ และวัดความเข้มแสงของหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนที่ระยะ 30 เซนติเมตร พบว่ามีความเข้ม แสงสูงสุดประมาณ 440 วัตต์/ตารางเมตร และความเข้มแสงช่วงยูวี (290 – 390 นาโนเมตร) สูงสุด ประมาณ 27 วัตต์/ตารางเมตร โดยมีการศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการบดต่อขนาดอนุภาคของไฟไรต์

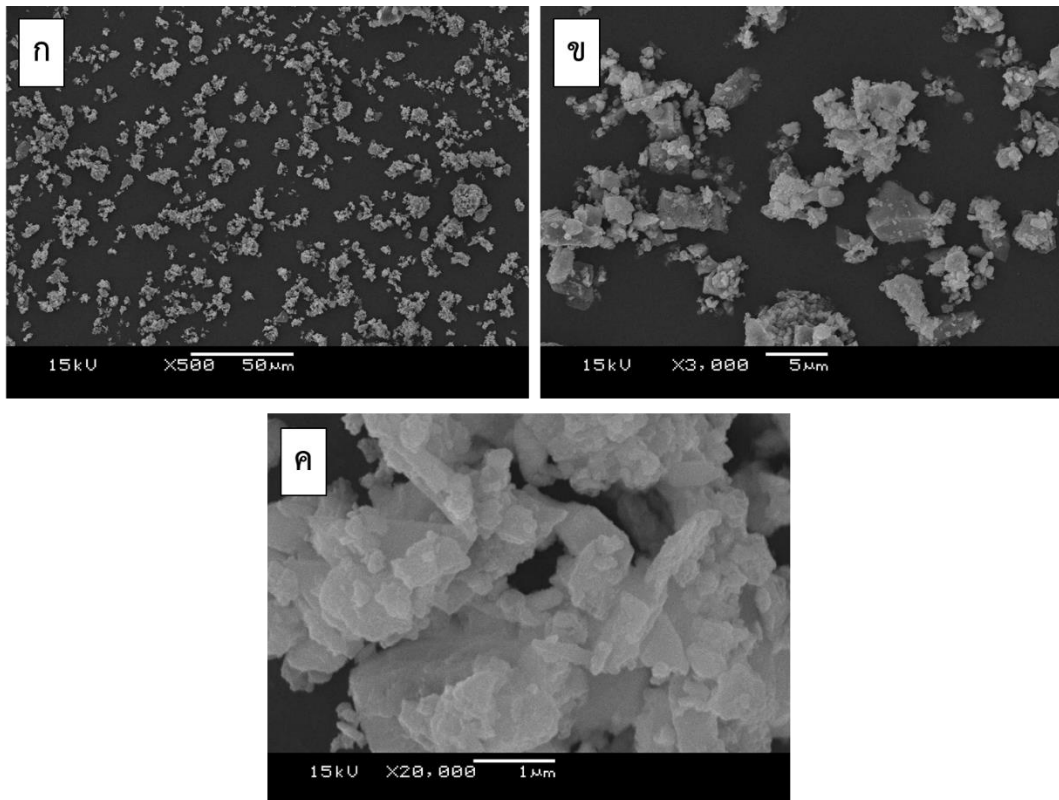
ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาผลของระยะเวลาการบดต่อขนาดของไฟไรต์จากกากของ เสียโรงงานเจียรไนมาร์คาไซด์เพื่อคัดเลือกระยะเวลาการบดที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ใน การทดลองขั้นต่อไป จากการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคก่อนผ่านการบดและหลังการบดที่ ระยะเวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง ในตารางที่ 4.3 พบว่าขนาดอนุภาคที่ d50 ของไฟไรต์ที่ไม่ผ่าน การบด มีค่า 4.77 ไมครอน และเมื่อบดด้วยระยะเวลา 6 12 และ 24 ชั่วโมง มีค่า 2.22 1.69 และ 1.79 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนขนาดอนุภาคที่ d10 มีค่า 0.88 0.84 0.73 และ 0.69 ไมครอน และขนาดอนุภาคที่ d90 มีค่า 15.03 10.18 9.87 และ 8.64 ไมครอน จากผลการ ทดลองพบว่าการบดไฟไรต์โดยใช้ระยะเวลาบดมากขึ้น มีผลให้ขนาดอนุภาคลดลงอย่าง ชัดเจน และจากการพิจารณาขนาดอนุภาคโดยรวมพบว่าการบดไฟไรต์ด้วยระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลงมากที่สุด ถึงแม้ว่าค่าที่ d50 จะมากกว่าการบดที่ ระยะเวลา 12 ชั่วโมง และเมื่อคิดร้อยละของขนาดที่ลดลงเมื่อใช้เวลาบด 24 ชั่วโมง พบว่า

ขนาดอนุภาคลดลงจากไฟไรต์ที่ไม่ผ่านการบดประมาณร้อยละ 60 โดยมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 4.35 (ก) – (ค) พบว่าไฟไรต์หลังบดมีขนาดอนุภาคตั้งแต่เล็กจนถึงใหญ่ปะปนกัน มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งเกิดจากการบดไฟไรต์ให้มีขนาดเล็กลง อนุภาคบางส่วนมีการเกาะรวมกันเป็นก้อน (agglomerate) ซึ่งส่วนมากเป็นอนุภาคขนาดเล็กเกาะบนผิวของอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคหลังบด และเมื่อนำผงไฟไรต์หลังบด 24 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์หองค์ประกอบทางแร่ได้ผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.36 พบว่าประกอบด้วยเฟสหลักคือ ไฟไรต์ และโซโลโมไกต์ และมีเฟสรองคือ เซอร์โคเนีย และยิปซัม เกิดเฟสของโซโมลโนไกต์ (szomolnokite) มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  เนื่องจากเกิดการดูดซับน้ำที่ผิวของไฟไรต์ในขณะบดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจนเกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของไฟไรต์<sup>[108]</sup> ส่วนเซอร์โคเนียและยิปซัมมาจากกระบวนการเจียรไนเครื่องประดับ มาร์คาไซด์และเพชรเทียม

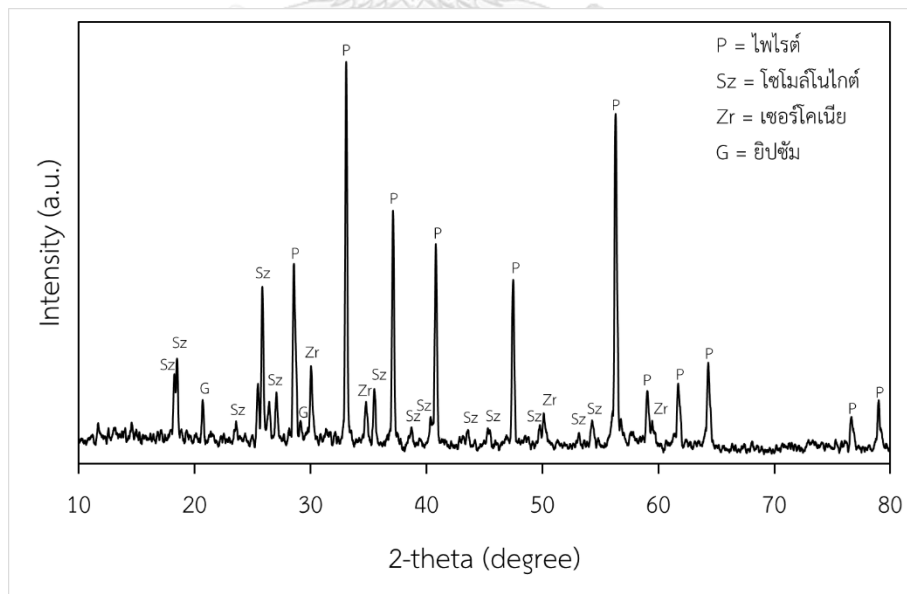
ตารางที่ 4.3 ขนาดของไฟไรต์หลังบดด้วยเวลาแตกต่างกัน

| ระยะเวลาบด (ชั่วโมง) | ขนาดอนุภาค (ไมครอน) |      |       |
|----------------------|---------------------|------|-------|
|                      | d10                 | d50  | d90   |
| 0                    | 0.88                | 4.77 | 15.03 |
| 6                    | 0.84                | 2.22 | 10.18 |
| 12                   | 0.73                | 1.69 | 9.87  |
| 24                   | 0.69                | 1.79 | 8.64  |





รูปที่ 4.35 โครงสร้างทางจุลภาคของไฟโรต์หลังบด 24 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 3,000 เท่า และ (ค) 20,000 เท่า



รูปที่ 4.36 XRD pattern ของไฟโรต์บด 24 ชั่วโมง

#### 4.3.2 การศึกษาผลของการเตรียมไฟไรต์ด้วยวิธีการบดล้างและอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

การทดลองนี้ต้องการศึกษาสมบัติและความสามารถของวัสดุโฟโตแคตาไลสต์เชิงประกอบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับไฟไรต์ที่บด 24 ชั่วโมง ซึ่งใช้ไฟไรต์ที่ไม่ล้างและล้างด้วยอะซิโตน โดยใช้อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ 95:5 90:10 85:15 80:20 และ 0:100 โดยน้ำหนัก และกำหนดชื่อตัวอย่างสำหรับส่วนผสมที่ใช้ไฟไรต์แบบไม่ล้างให้เป็น T95P5 T90P10 T85P15 T80P20 และ Pyrite ตามลำดับ และสำหรับส่วนผสมที่ใช้ไฟไรต์ที่ล้างให้เป็น T95P5W T90P10W T85P15W T80P20W และ PyriteW ตามลำดับ เเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการเผา 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ในเข้าอะลูมินาปิด โดยผงถูกปกคลุมด้วยถ่านแกลบ

การพิจารณาขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีส่วนผสมของไฟไรต์ทั้งไม่ล้างและล้างในอัตราส่วนที่ต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีการปั่นกววนในขณะวัด ส่วนในกรณีของสูตร Pyrite และ PyriteW หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ใช้วิธีการปั่นกววนเปรียบเทียบกับวิธีการปั่นกววนควบคู่กับการใช้คลื่นความถี่สูงเพื่อช่วยให้ได้ขนาดอนุภาคที่แท้จริง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 พบว่าวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่ใช้ไฟไรต์ไม่ผ่านการล้าง มีขนาดอนุภาค (d50) เท่ากับ 28.50 24.20 19.11 และ 22.01 ไมโครเมตร เมื่อมีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์จาก 95:5 90:10 85:15 และ 80:20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสูตรที่ใช้ไฟไรต์ที่ผ่านการล้าง ซึ่งมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 20.11 19.16 17.32 และ 17.30 ไมโครเมตร ตามลำดับ และยังพบว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และไฟไรต์ เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเกาะอยู่บนผิวของไฟไรต์ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าของอนุภาคทั้ง 2 ชนิด<sup>[60]</sup> ซึ่งเกาะกันในลักษณะ core/shell โดยมีไฟไรต์เป็นแกนกลาง (core) และมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้ม (shell) ดังภาพวาดแบบจำลองในรูปที่ 4.37 โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุที่ผิวเป็นบวกที่สภาวะ pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 ในขณะที่ไฟไรต์มีประจุเป็นลบ ดังผลวิเคราะห์ค่าศักย์ซีตา ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ใช้ไฟไรต์ไม่ผ่านการล้าง ในอัตราส่วนมากขึ้นพบว่าขนาดอนุภาคลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฟไรต์จากร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการมีปริมาณอนุภาคไฟไรต์ในส่วนผสมน้อย ส่งผลให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปริมาณมากไปเกาะที่ผิวของอนุภาคไพไรต์ 1 อนุภาค จึงทำให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่เมื่อมีอนุภาคของไพไรต์เพิ่มมากขึ้น ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะบนผิวของอนุภาคไพไรต์ 1 อนุภาค จึงน้อยลงส่งผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลง แต่เมื่ออัตราส่วนของไพไรต์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงจากร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีผลไปในแนวทางเดียวกับการใช้ไพไรต์ที่ผ่านการล้าง คือขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบเล็กลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไพไรต์ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่ใช้ไพไรต์ที่ไม่ผ่านการล้างและผ่านการล้าง พบว่าการล้างไพไรต์ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบมีขนาดเล็กกว่าการใช้ไพไรต์ที่ไม่ผ่านการล้าง เนื่องจากการล้างทำให้สารอินทรีย์หลุดออก จึงทำให้เหลือเพียงอนุภาคไพไรต์เท่านั้น ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง และเมื่อพิจารณาขนาดของสูตร Pyrite ที่ใช้ไพไรต์ไม่ผ่านการล้างและผ่านการล้างพบว่าให้ผลในทางกลับกันคือสูตร Pyrite มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของสูตร PyriteW โดยมีค่า 4.02 และ 8.99 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์โดยการปั่นกวาน และมีค่า 1.17 และ 1.79 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์โดยการปั่นกวานร่วมกับการใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งอาจเกิดจากการล้างไพไรต์ทำให้อนุภาคเล็กกว่าไพไรต์ที่ไม่ผ่านการล้างแต่เนื่องจากเกิดการเกาะรวมกลุ่มกันของอนุภาคขนาดเล็กได้ง่าย ดังนั้นเมื่อเผาแล้วทำให้เกิดการเกาะรวมกันแน่นขึ้นและยากที่จะทำให้แตกออกจากกัน (hard agglomerate) แต่สำหรับไพไรต์ที่ไม่ผ่านการล้าง เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่ ส่งผลให้การเกาะรวมกันแน่นของอนุภาคเล็กเกิดขึ้นได้ยาก

ส่วนผลของการใช้ไพไรต์ที่ผ่านการล้างพบว่ามีความหนาแน่นเช่นเดียวกัน แต่มีขนาดของพื้นที่ผิวน้อยกว่าการใช้ไพไรต์ที่ไม่ล้าง เนื่องจากไพไรต์ที่ไม่ล้างมีสารอินทรีย์เกาะอยู่ที่ผิวของไพไรต์ เมื่อเผาแล้วจึงเหลือเพียงคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งส่งผลให้มีขนาดพื้นที่ผิวที่มากกว่าการใช้ไพไรต์ที่ไม่ล้าง

ตารางที่ 4.4 ยังแสดงพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ จากไพไรต์ไม่ล้างและล้าง สำหรับการใช้ไพไรต์ที่ไม่ล้างพบว่าวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนของไพไรต์เพิ่มมากขึ้นจะมีแนวโน้มของพื้นที่ผิวจำเพาะลดน้อยลงจาก 44.38 45.42 36.80 33.56 และ 5.20 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่ออัตราส่วนไพไรต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ เกิดจากการผสมกันของวัสดุ 2 ชนิดที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่างกัน ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเท่ากับ 44.38 ตารางเมตรต่อกรัม และสูตร Pyrite มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 5.20 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อมีอัตราส่วนของ

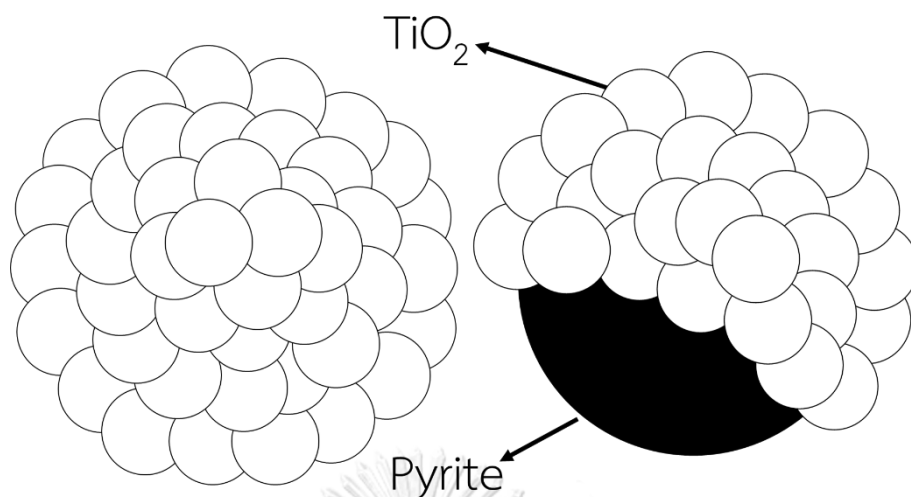
ไฟโรต์มากขึ้นจึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ยกเว้นตัวอย่างที่มีไฟโรต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะไม่ต่างกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีไฟโรต์ปริมาณน้อยจึงไม่ทำให้เห็นถึงความแตกต่าง ส่วนผลของการใช้ไฟโรต์ที่ผ่านการล้างพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่มีขนาดของพื้นที่ผิวน้อยกว่าการใช้ไฟโรต์ที่ไม่ล้าง เนื่องจากไฟโรต์ที่ไม่ล้างมีสารอินทรีย์เกาะอยู่ที่ผิวของไฟโรต์ เมื่อเผาแล้วจึงเหลือเพียงคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งส่งผลให้มีขนาดพื้นที่ผิวที่มากกว่าการใช้ไฟโรต์ที่ไม่ล้าง

ตารางที่ 4.4 ขนาดของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟโรต์แตกต่างกัน

| วัสดุเชิงประกอบ<br>โพโตแคตาไลสต์ | ขนาดอนุภาค (d50)<br>(ไมครอน) |        | พื้นที่ผิวจำเพาะ<br>(ตารางเมตรต่อกรัม) |       |
|----------------------------------|------------------------------|--------|--|-------|
|                                  | ไม่ล้าง                      | ล้าง   | ไม่ล้าง                                | ล้าง  |
| TiO <sub>2</sub> *               | 1.38                         |        | 44.38                                  |       |
| T95P5                            | 28.50                        | 20.11  | 45.42                                  | 43.76 |
| T90P10                           | 24.20                        | 19.16  | 39.12                                  | 42.42 |
| T85P15                           | 19.11                        | 17.32  | 36.80                                  | 32.80 |
| T80P20                           | 22.01                        | 17.30  | 33.56                                  | 30.25 |
| Pyrite                           | 4.02                         | 8.99   | 5.20                                   | 2.96  |
|                                  | 1.17**                       | 1.79** |  |       |

\*ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ

\*\*ผ่านการกระจายตัวด้วยคลื่นความถี่สูง



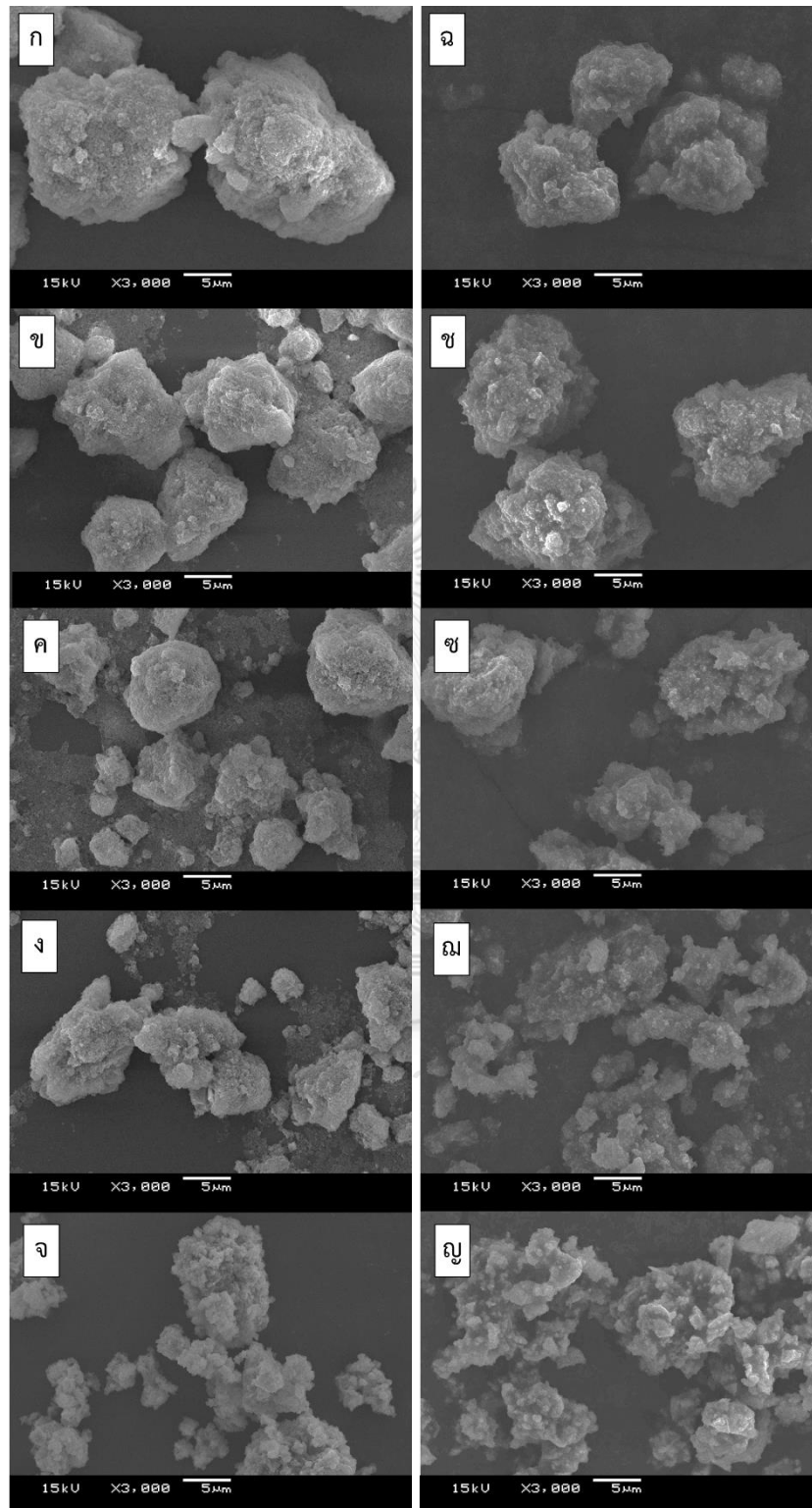
รูปที่ 4.37 ภาพวาดจำลองลักษณะอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีลักษณะเป็น core/shell

เพื่อยืนยันลักษณะการยึดเกาะของอนุภาควัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ จึงได้นำตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคดังรูปที่ 4.38 (ก) – (ง) พบว่าอนุภาคตัวอย่างสูตร T95P5 – T80P20 และสูตร T95P5W – T80P20W หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแบบ core/shell โดยสังเกตเห็นว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมาเกาะหุ้มผิวของอนุภาคไพไรต์ที่มีขนาดใหญ่กว่า แต่เมื่อพิจารณาสูตรที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าลักษณะของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงจากก่อนเผามากนัก คืออนุภาคยังคงมีรูปร่างแบบไม่แน่นอน



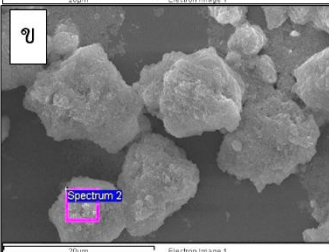
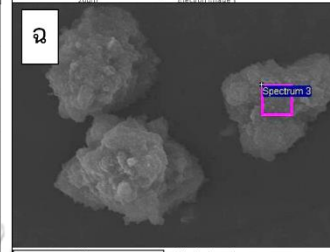
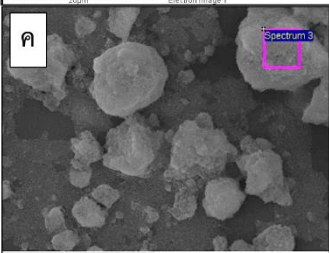
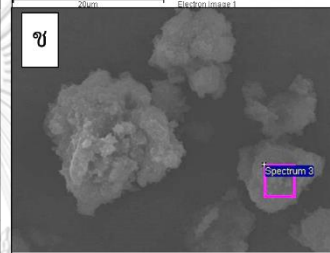
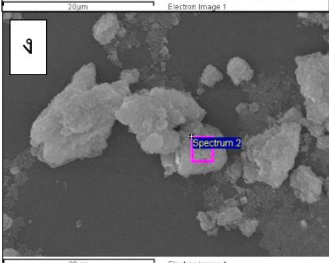
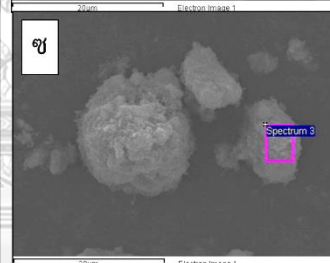
เพื่อยืนยันว่าวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ มีการยึดเกาะกันแบบ core/shell คือตรงกลางของอนุภาคควรต้องเป็นอนุภาคไพไรต์ จึงได้วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDS ดังรูปที่ 4.39 พบว่ามีธาตุไทเทเนียม ออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไทเทเนียมไดออกไซด์ และพบธาตุเหล็กและซัลเฟอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของไพไรต์ในสูตรที่มีองค์ประกอบของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยปริมาณที่ตรวจพบจะแตกต่างกันตามปริมาณของไพไรต์ที่มีในแต่ละสูตร ซึ่งพบว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของไพไรต์น้อยจะพบธาตุไทเทเนียมและออกซิเจนเป็นปริมาณมากกว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของไพไรต์มาก เนื่องจากความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะบนผิวของอนุภาคไพไรต์มีน้อยลงเมื่ออัตราส่วนของไพไรต์มากขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในการอธิบายก่อนหน้านี้นี้ แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของอะตอมของธาตุเหล็กและซัลเฟอร์ในอนุภาคที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์พบว่าร้อยละของอะตอมไม่ตรงกับของไพไรต์ อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาที่ผิวของไพไรต์กับ

น้ำและเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ชั้นที่ผิว<sup>[109]</sup> นอกจากนั้นเพื่อยืนยันผลการพบการเกิดสารประกอบออกไซด์ที่ผิวของไฟไรต์ ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟสก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ซึ่งจะอธิบายต่อไป





รูปที่ 4.38 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ไพไรต์ไม่ล้าง (ก) T95P5 (ข) T90P10 (ค) T85P15 (ง) T80P20 (จ) Pyrite ไพไรต์ล้าง (ฉ) T95P5W (ช) T90P10W (ซ) T85P15W (ณ) T80P20W และ (ญ) PyriteW

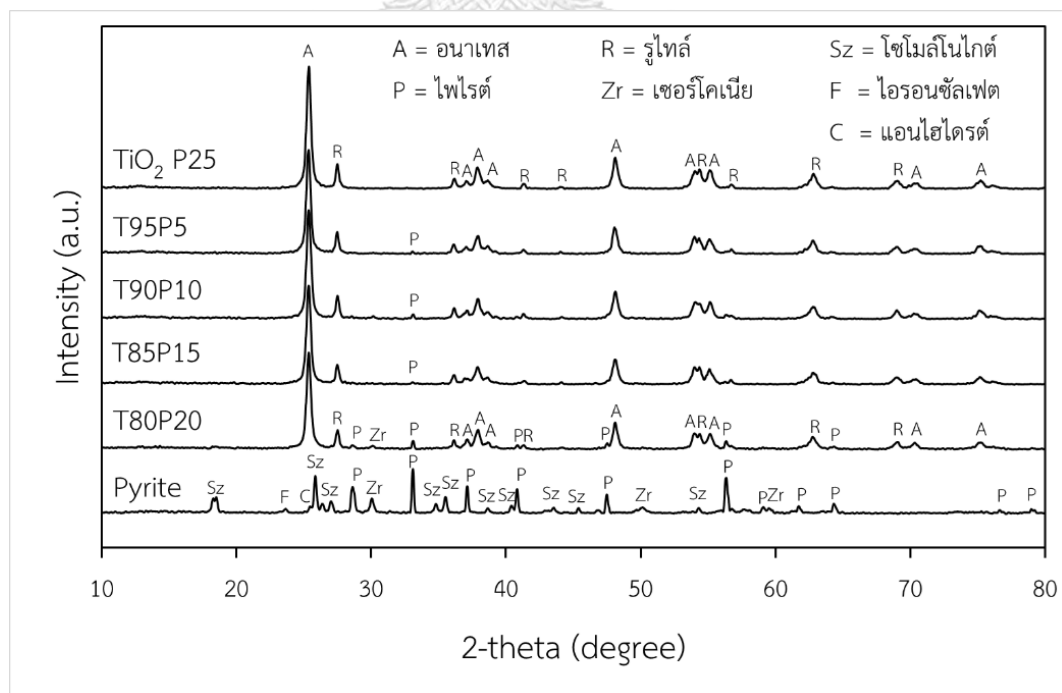
|    | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>53.51</td></tr> <tr><td>S K</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>44.48</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>1.31</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 53.51 | S K | 0.70 | Ti K | 44.48 | Fe K | 1.31 | Totals | 100.00 |    | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>56.26</td></tr> <tr><td>S K</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>42.77</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 56.26 | S K | 0.10 | Ti K | 42.77 | Fe K | 0.87 | Totals | 100.00 |
|---|--|---------|---------|-----|-------|-----|------|------|-------|------|------|--------|--------|--|--|---------|---------|-----|-------|-----|------|------|-------|------|------|--------|--------|
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 53.51  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 0.70   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 44.48  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 1.31   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 56.26  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 0.10   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 42.77  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 0.87   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
|    | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>44.89</td></tr> <tr><td>S K</td><td>0.90</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>52.79</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>1.42</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 44.89 | S K | 0.90 | Ti K | 52.79 | Fe K | 1.42 | Totals | 100.00 |    | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>55.87</td></tr> <tr><td>S K</td><td>0.69</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>42.81</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>0.64</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 55.87 | S K | 0.69 | Ti K | 42.81 | Fe K | 0.64 | Totals | 100.00 |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 44.89  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 0.90   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 52.79  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 1.42   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 55.87  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 0.69   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 42.81  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 0.64   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
|   | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>46.64</td></tr> <tr><td>S K</td><td>3.47</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>45.63</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>4.26</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 46.64 | S K | 3.47 | Ti K | 45.63 | Fe K | 4.26 | Totals | 100.00 |   | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>56.21</td></tr> <tr><td>S K</td><td>2.21</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>38.95</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>2.62</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 56.21 | S K | 2.21 | Ti K | 38.95 | Fe K | 2.62 | Totals | 100.00 |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 46.64  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 3.47   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 45.63  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 4.26   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 56.21  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 2.21   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 38.95  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 2.62   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
|  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>45.93</td></tr> <tr><td>S K</td><td>3.80</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>46.16</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>4.11</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 45.93 | S K | 3.80 | Ti K | 46.16 | Fe K | 4.11 | Totals | 100.00 |  | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>O K</td><td>51.51</td></tr> <tr><td>S K</td><td>3.35</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>41.80</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>3.34</td></tr> <tr><td>Totals</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table> | Element | Weight% | O K | 51.51 | S K | 3.35 | Ti K | 41.80 | Fe K | 3.34 | Totals | 100.00 |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 45.93  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 3.80   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 46.16  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 4.11   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Element   | Weight%  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| O K   | 51.51  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| S K   | 3.35   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Ti K  | 41.80  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Fe K  | 3.34   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |
| Totals  | 100.00   |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |  |  |         |         |     |       |     |      |      |       |      |      |        |        |

รูปที่ 4.39 โครงสร้างทางจุลภาคและการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน EDS ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ไฟไรต์ไม่ล้าง (ก) T95P5 (ข) T90P10 (ค) T85P15 (ง) T80P20 ไฟไรต์ล้าง (จ) T95P5W (ฉ) T90P10W (ซ) T85P15W และ (ซ) T80P20W

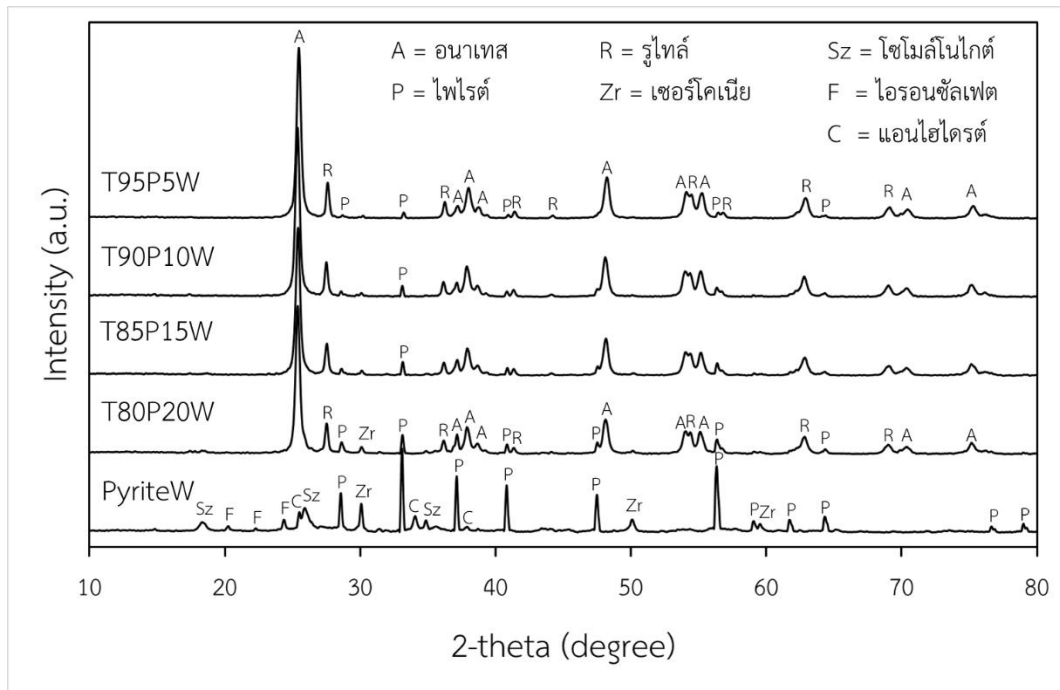
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุเชิงประกอบโพโตแคตตาลิสต์ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีอัตราส่วนของไฟไรต์ที่ไม่ผ่านการล้างแตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.40 จากผลการวิเคราะห์พบว่าในวัสดุเชิงประกอบโพโตแคตตาลิสต์ที่มีอัตราส่วนของไฟไรต์ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (T95P5 T90P10 และ T85P15) มีองค์ประกอบทางเฟสหลักคืออนาเทสและรูไทล์ นอกจากนั้นยังสามารถตรวจพบองค์ประกอบของไฟไรต์ได้ และมีความสูงของพีกซ์เจนขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีส่วนองค์ประกอบทางเฟสของสูตร Pyrite ซึ่งไม่มีส่วนประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า



นอกจากเฟสไฟไรต์ซึ่งเป็นเฟสหลักของวัสดุแล้ว ยังตรวจพบเฟส โซโมลโนโกต์ เนื่องจากเกิดการดูดซับน้ำที่ผิวของไฟไรต์ในขณะบดและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจนเกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของไฟไรต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบพบว่าตรวจไม่มีเฟสดังกล่าว อาจเนื่องจากเฟสดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยากับอะตอมออกซิเจนในไทเทเนียมไดออกไซด์ ขณะเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นพันธะระหว่างผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์ได้<sup>[110]</sup> ซึ่งเป็นพันธะของ Fe-O-Ti เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และไฟไรต์ และยังพบเฟสเซอร์โคเนีย ไอออนซัลเฟตและแอนไฮไดรต์ ซึ่งเฟสเซอร์โคเนียเป็นเฟสที่พบในไฟไรต์ที่ได้รับมา ส่วนไอออนซัลเฟตเป็นเฟสที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ผิวของไฟไรต์กับน้ำ และเฟสแอนไฮไดรต์เกิดจากการสลายตัวของน้ำในองค์ประกอบของยิปซัมที่อุณหภูมิประมาณ 63.5 องศาเซลเซียส<sup>[111]</sup> เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเฟสของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ผ่านการล้าง ดังรูปที่ 4.41 พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นไม่ต่างกับไฟไรต์ที่ไม่ล้าง แต่จะสังเกตเห็นว่าฟีกของไฟไรต์ชัดเจน ในสูตร T95P5 T90P10 T85P15 และ T80P10 และชัดเจนกว่าฟีกที่พบในวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่ใช้ไฟไรต์ที่ไม่ล้าง เนื่องจากการล้างด้วยอะซิโตนทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนในไฟไรต์หมดไป ส่งผลให้หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ไม่มีคาร์บอนหลงเหลืออยู่ทำให้เห็นฟีกของเฟสรองชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในสูตร PyriteW



รูปที่ 4.40 XRD pattern ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟไรต์ไม่ล้าง แตกต่างกัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.41 XRD pattern ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไพไรต์ต่าง กัน หลังเผาที่ 300 องศาเซลเซียส

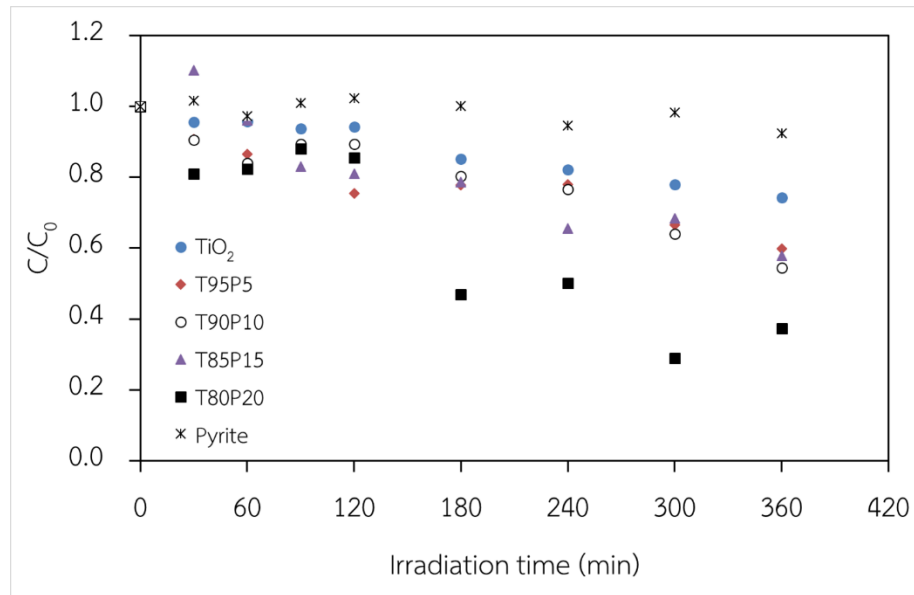
ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสารละลายลิควินความเข้มข้น 100 ส่วนในน้ำหนึ่งล้านส่วน ด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่ไม่ล้าง หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน โดยพิจารณาหลังจากปั่นกวนผงวัสดุเชิงประกอบโพโตแคตาลิสต์ในสารละลายลิควินในที่มีเป็นเวลา 120 นาที เพื่อให้วัสดุอิ่มตัวและหยุดสมบัติทางผิวของไพไรต์<sup>[109]</sup> ก่อนนำไปฉายแสง ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิควินหลังการย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่ใช้ไพไรต์ไม่ล้างอัตราส่วนต่างกัน เมื่อเวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการฉายแสงทั้งหมด 6 ชั่วโมง และมีการปั่นกวนตลอดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.42 จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของลิควินเมื่อถูกย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนของไพไรต์ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 6 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิควินลดลงได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไพไรต์ในวัสดุเชิงประกอบ และเมื่ออัตราส่วนของไพไรต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (T95P5 T90P10 T85P15 และ T80P20) สามารถย่อยสลายลิควินได้ร้อยละ 40.20 45.51 42.25 และ 62.61 ตามลำดับ ที่เวลาฉายแสง 6 ชั่วโมง โดยลดได้มากกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เพียงชนิดเดียว ที่ลดความเข้มข้นสารละลายลิควินได้เพียงร้อยละ

25.79 เท่านั้น ในขณะที่การใช้สูตร Pyrite ซึ่งเป็นไพไรต์ที่ไม่ล้าง พบว่าค่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายแสงถึงแม้ว่าไพไรต์จะมีแถบพลังงานที่แคบ เนื่องจากเกิดการรวมกลับเข้าหากันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นอย่างรวดเร็ว<sup>[112]</sup> จึงไม่สามารถเกิดการย่อยสลายลิกนินด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการย่อยสลายลิกนินจากการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า  $\ln(C/C_0)$  และเวลาในการฉายแสง และนำมาคำนวณด้วยสูตรดังสมการที่ 4.2

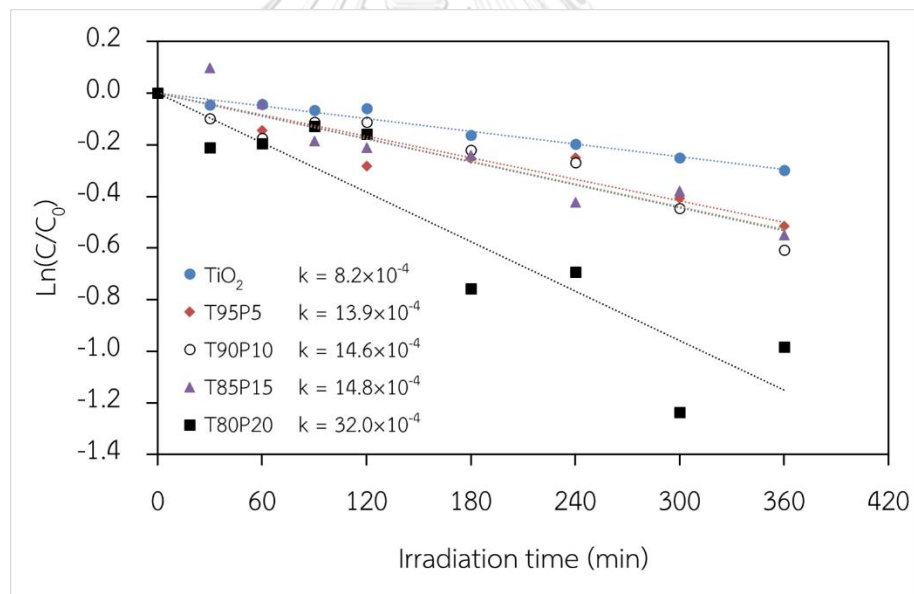
$$\ln(C/C_0) = -kt \quad \text{สมการ 4.2}$$

โดยให้ C คือความเข้มข้นของสารละลายลิกนินที่เวลานั้นๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $C_0$  คือความเข้มข้นของสารละลายลิกนินเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) k คืออัตราการย่อยสลายของลิกนิน และ t คือระยะเวลาฉายแสง (นาทิจ) โดยเส้นแนวโน้มคำนวณโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าเส้นแนวโน้มที่ได้เป็นเส้นตรงและค่าความชันของเส้นแนวโน้มแสดงถึงอัตราการย่อยสลายสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ไม่ล้าง และเห็นได้ว่าสูตร T80P20 มีอัตราการย่อยสลายลิกนินมากที่สุดคือ  $32 \times 10^{-4}$  ต่อนาทิจ และช้าลงเมื่ออัตราส่วนของไพไรต์ลดน้อยลงเนื่องจากการเพิ่มไพไรต์ในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้ค่าแถบพลังงานแคบลงจึงสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ดีขึ้นซึ่งมีมากในแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนและแสงจากดวงอาทิตย์ หรืออาจเกิดจากการอยู่ร่วมกันของไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์ทำให้ลดการรวมกลับเข้าหากันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้<sup>[60]</sup> โดยอธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำและเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของไพไรต์ก่อนที่จะตกลงสู่แถบวาเลนซ์อีกครั้ง และอีกเหตุผลที่อาจทำให้อัตราการย่อยสลายลิกนินเพิ่มขึ้นคือเกิดการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีดังสมการที่ 4.3 และการถูกออกซิไดซ์ด้วยอิเล็กตรอนในแถบตัวนำและซูปเปอร์ออกไซด์ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11<sup>[113]</sup> ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยการตรวจวัดค่า pH ของสารละลายพบว่าค่า pH ของสารละลายลิกนินก่อนการย่อยสลายมีค่าประมาณ 6.90 และหลังการย่อยสลายด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ไม่ล้าง ที่มีอัตราส่วนของไพไรต์จากร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเป็น 5.63 4.20 3.65 3.50 และ 3.35 ตามลำดับ





รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง ที่เวลาในการฉายแสงเพิ่มขึ้น



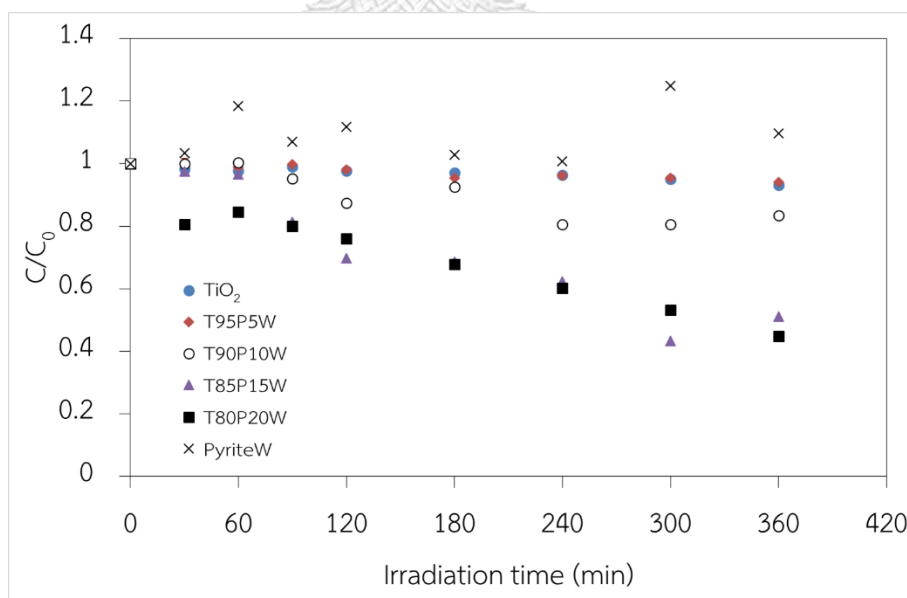
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ของค่า  $\ln(C/C_0)$  และเวลาในการฉายแสง ของลิกนินเมื่อถูกย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง

เมื่อพิจารณาผลการย่อยสลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่มีอัตราส่วนของไฟไรต์ที่ผ่านการล้างด้วยอะซิโตนต่างกัน โดยเลือกใช้วัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไฟไรต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าในระหว่างการทำให้ผงวัสดุเชิงประกอบอิมัลชันด้วยลิกนินในที่มีดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินลดลงต่ำมากซึ่งเป็นผลจากการ

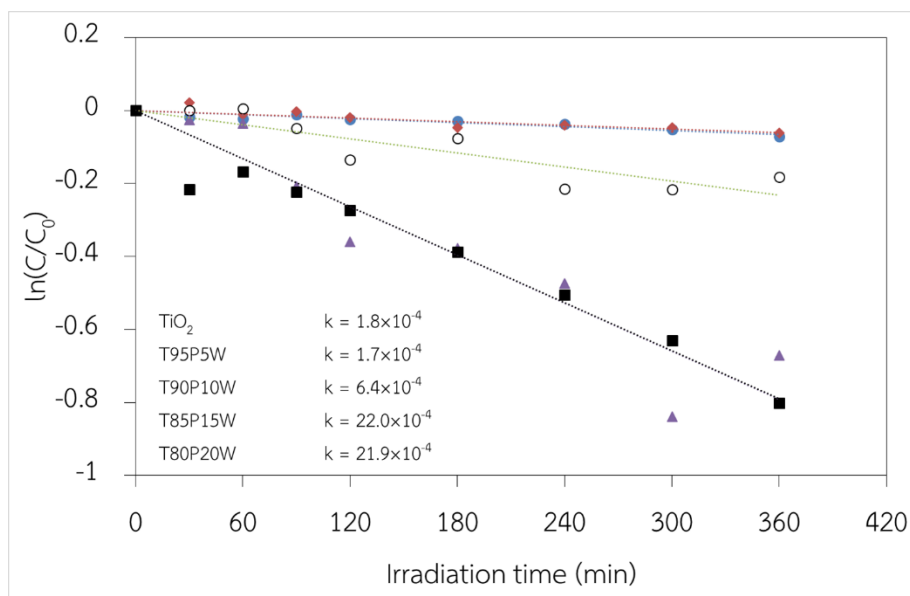
ดูดซับและสมบัติทางผิวของไฟไรต์<sup>[109]</sup> เนื่องจากการล้างลิกนินด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนต่างๆ ทำให้ผิวของไฟไรต์เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น รวมทั้งเมื่อสารอินทรีย์ถูกกำจัดไปทำให้การใช้ไฟไรต์ที่อัตราส่วนที่เท่ากันโดยน้ำหนักในวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณของเฟสไฟไรต์มากกว่าไฟไรต์ที่ไม่ผ่านการล้าง หรืออธิบายได้ว่าการใช้ไฟไรต์ที่ไม่ผ่านการล้างและผ่านการล้างด้วยอะซิโตนที่น้ำหนัก 20 กรัม เท่ากัน จะมีน้ำหนักของเฟสไฟไรต์ไม่เท่ากัน โดยไฟไรต์ที่ไม่ผ่านการล้างจะมีน้ำหนักของสารอินทรีย์ปนเปื้อนรวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายลิกนินจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้สามารถพิจารณาผลของการฉายแสงได้

ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 ส่วนในน้ำหนึ่งล้านส่วน ด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ที่ผ่านการล้าง หลังเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้การฉายแสงจากหลอดทั้งสเดอนฮาโลเจน โดยพิจารณาหลังจากปั่นกวนผงวัสดุเชิงประกอบโฟโตแคตาไลสต์ในสารละลายลิกนินในที่มีดเป็นเวลา 120 นาที และ 150 นาที สำหรับผงไฟไรต์ที่ไม่มีส่วนประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ (PyriteW) เพื่อให้วัสดุอิมพัลส์และหุุดสมบัติทางผิวของไฟไรต์<sup>[109]</sup> ก่อนนำไปฉายแสง ซึ่งสังเกตได้ว่าการใช้ PyriteW มีการอิมพัลส์สูงกว่าสูตร Pyrite เนื่องจากเมื่อล้างไฟไรต์ด้วยอะซิโตนส่งผลให้ผิวของไฟไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าไฟไรต์ที่ไม่ล้าง ผลการทดลองการย่อยสลายลิกนินแสดงดังรูปที่ 4.44 พบว่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารละลายลิกนินลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฟไรต์ในวัสดุเชิงประกอบ และเมื่ออัตราส่วนของไฟไรต์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (T95P5W T90P10W T85P15W และ T80P20W) สามารถย่อยสลายลิกนินได้ร้อยละ 5.91 16.63 48.90 และ 55.16 ตามลำดับ ที่เวลาฉายแสง 6 ชั่วโมง โดยสูตร T90P10W T85P15W และ T80P20W ลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนินได้มากกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 เพียงชนิดเดียว ซึ่งลดความเข้มข้นสารละลายลิกนินได้เพียงร้อยละ 6.96 เท่านั้น และมีผลใกล้เคียงกับสูตร T95P5W อาจเนื่องจากอัตราส่วนของไฟไรต์ในวัสดุเชิงประกอบไม่เพียงพอ จึงทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยึดเกาะบนผิวได้มากจนสร้างเป็นชั้นหนาจึงทำให้ไม่แสดงผลของไฟไรต์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก รวมทั้งความเข้มข้นของสารละลายลิกนินที่สูงเกินไปทำให้แสงยูวีผ่านได้น้อยลง<sup>[114]</sup> ในขณะที่การใช้สูตร PyriteW พบว่าค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารละลายลิกนินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายแสงด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการอธิบายผลของการใช้สูตร Pyrite จึงไม่สามารถเกิดการย่อยสลายลิกนินด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการย่อยสลายลิกนินจากการพิจารณา

ความสัมพันธ์ของค่า  $\ln(C/C_0)$  และเวลาในการฉายแสง และนำมาคำนวณด้วยสูตรตั้งสมการที่ 4.2 ได้ผลดังรูปที่ 4.45 พบว่าอัตราการย่อยสลายลิกนินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไฟโรต์ในวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ ยกเว้นสูตร T95P5W ที่มีค่าไม่ต่างกับผลของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และพบว่าสูตร T85P15W และ T80P20W มีอัตราการย่อยสลายใกล้เคียงกันคือประมาณ  $22 \times 10^{-4}$  ต่อนาที แสดงให้เห็นว่าการใช้ไฟโรต์มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อาจมีผลของอัตราการย่อยสลายลิกนินไม่แตกต่างกับการใช้ไฟโรต์ร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีแนวโน้มว่าเมื่อมีอัตราส่วนไฟโรต์เพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าแถบพลังงานแคบลงมากเกินไป จึงอาจเกิดการรวมกลับเข้าหากันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น<sup>[60]</sup> การที่อัตราการย่อยสลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ที่ล้าง มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไฟโรต์มากขึ้นอาจเกิดจากเหตุผลเช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้ไฟโรต์ที่ไม่ล้าง และสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยการตรวจวัดค่า pH ของสารละลายพบว่าค่า pH ของสารละลายลิกนินก่อนการย่อยสลายมีค่าประมาณ 7.67 และหลังการย่อยสลายด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ที่ล้าง ที่มีอัตราส่วนของไฟโรต์จากร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเป็น 5.29 5.08 4.79 4.46 และ 4.02 ตามลำดับ

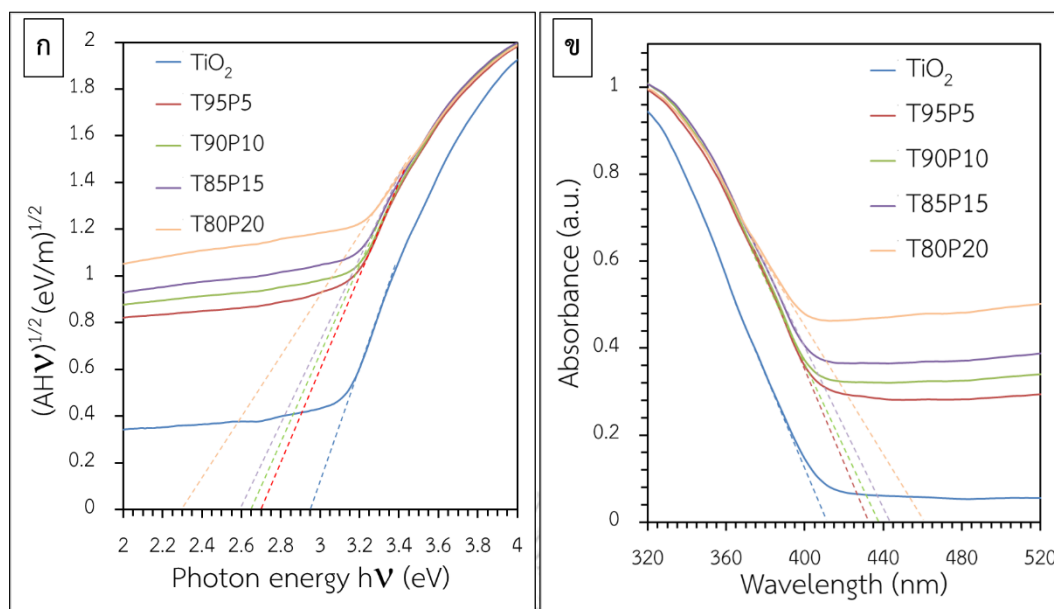


รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ที่ล้าง ที่เวลาในการฉายแสงต่างกัน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ของค่า  $\ln(C/C_0)$  และเวลาในการฉายแสง ของลิกนินเมื่อถูกย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ล้าง

เพื่อยืนยันผลของการลดค่าแถบพลังงานจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าแถบพลังงานและความยาวคลื่นแสงที่สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.46 (ก) และ (ข) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนไฟไรต์เพิ่มจากร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.95 2.68 2.67 2.57 และ 2.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และความยาวคลื่นแสงที่สามารถกระตุ้นวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 413 430 437 444 และ 460 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากผลวิเคราะห์จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าการที่วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ไฟไรต์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลากลิกนินได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ภายใต้การฉายด้วยแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนเนื่องจากแถบพลังงานของวัสดุเชิงประกอบแคบกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ง่ายขึ้น กล่าวคือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำของวัสดุเชิงประกอบใช้พลังงานกระตุ้นน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[60]</sup> โดยมีภาพจำลองความเป็นไปได้ของแถบพลังงานของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ดังรูปที่ 4.47 ซึ่งเกิดจากอยู่ร่วมกันของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีค่าแถบพลังงานต่างกัน

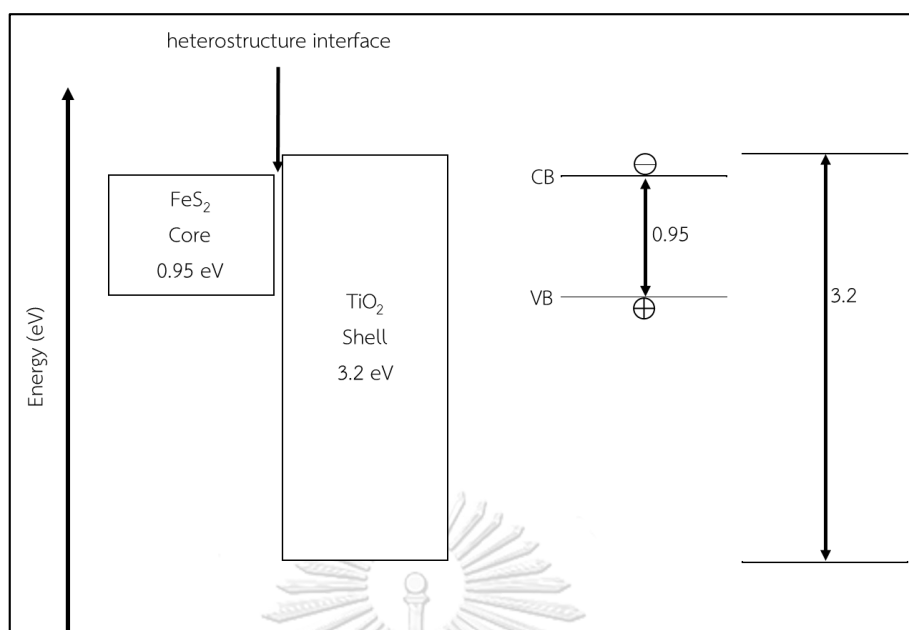


รูปที่ 4.46 (ก) Tauc plot (ข) แถบ UV/VIS ของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์

ตารางที่ 4.5 ค่าช่องว่างแถบพลังงานและความยาวคลื่นแสงที่สามารถกระตุ้นวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์

| วัสดุ            | Band gap energy (hV) | Wavelength (nm) |
|------------------|----------------------|-----------------|
| TiO <sub>2</sub> | 2.95                 | 413             |
| T95P5            | 2.68                 | 430             |
| T90P10           | 2.67                 | 437             |
| T85P15           | 2.57                 | 444             |
| T80P20           | 2.30                 | 460             |





รูปที่ 4.47 ภาพจำลองแถบพลังงานของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์

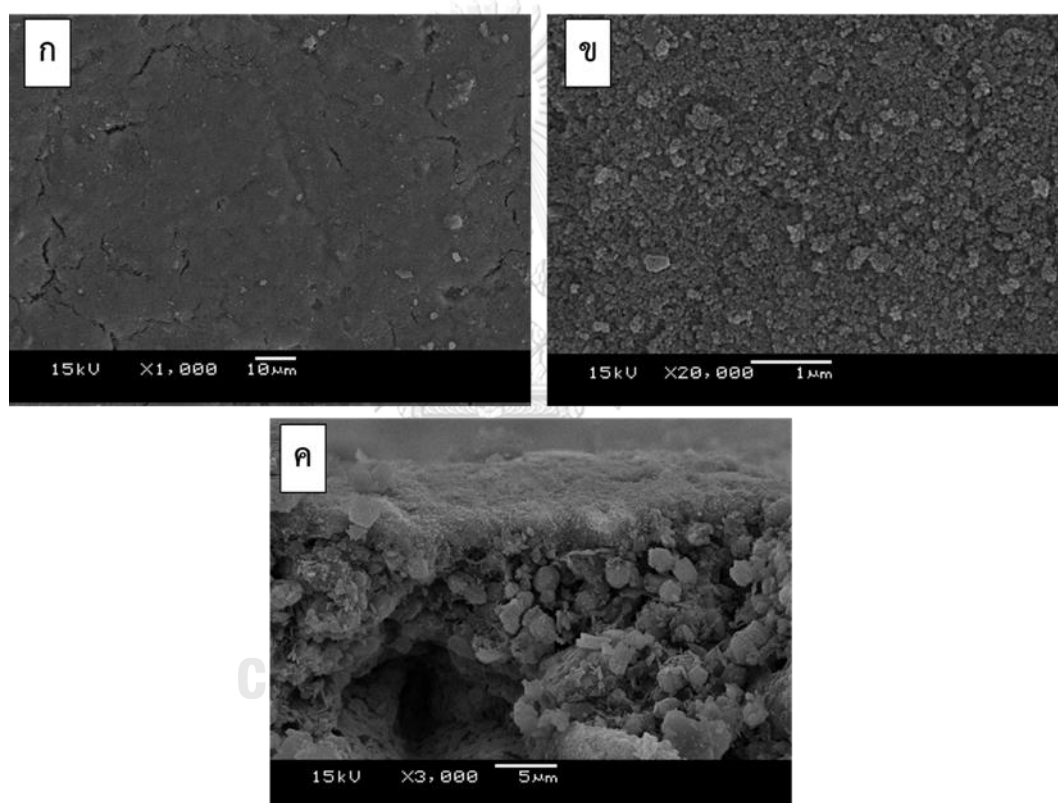
#### 4.4 การเคลือบวัสดุโฟโตแคตาไลสต์บนวัสดุตัวรองรับเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ

การศึกษานี้ได้นำวัสดุโฟโตแคตาไลสต์ชนิดผงมายึดเกาะหรือเคลือบบนผิวของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 4.2 ทั้ง 2 สูตร และนำชิ้นงานหลังเคลือบมาทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนินในน้ำภายใต้การฉายจากหลอดแสงยูวีในช่วงแรก (สำหรับการทดสอบด้วยสูตร BC50) และเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับการใช้งานได้แสงอาทิตย์มากขึ้น จึงเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน (สำหรับการทดลองด้วยสูตร FBC01 และ FBC02) โดยวัสดุที่ใช้ในการเคลือบนั้นแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์โฟโตแคตาไลสต์

##### 4.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินในน้ำของวัสดุเชิงประกอบพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาไลสต์

ในการทดลองช่วงแรก ได้นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนสูตร BC50 มาเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในน้ำดีไอโอไนซ์ ด้วยวิธีการชุบเคลือบเป็นเวลา 1 นาที โดยปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กตลอดการชุบ และเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยปกคลุมด้วยถ่านกลบ จากการทดลองพบว่าผิวเคลือบยึดเกาะบนผิวของวัสดุเชิงประกอบพรุนได้ดี เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยึดเกาะกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ได้ด้วยพันธะทางเคมี<sup>[115]</sup> หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบไปตรวจสอบโครงสร้าง

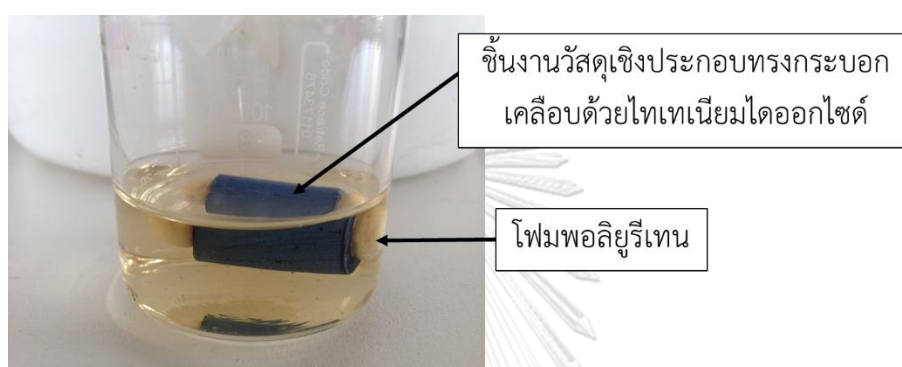
ทางจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.48 (ก) – (ค) จากรูป (ก) พบว่าผิวของชั้นเคลือบมีความสม่ำเสมอดี แต่มีรอยร้าวเล็กน้อยเนื่องจากการหดตัวของชั้นเคลือบ และเมื่อสังเกตผิวของเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ในรูป (ข) พบว่าผิวเคลือบเกิดจากการเกาะกันของอนุภาคขนาดเล็กไทเทเนียมไดออกไซด์ และในรูป (ค) แสดงภาพตัดขวางชั้นเคลือบและวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่เป็นตัวรองรับ พบว่ามีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก และมีบางส่วนที่เข้ามาในผิวของตัวรองรับ เนื่องจากผิวของวัสดุตัวรองรับมีความพรุนตัวสูง เมื่อชุบชิ้นงานลงในสารเคลือบจึงเกิดการดูดสารเคลือบบางส่วนเข้ามาในชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบ พบว่ามีความหนาประมาณ 2 – 3 ไมครอน



รูปที่ 4.48 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกสูตร BC50 เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า และ (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

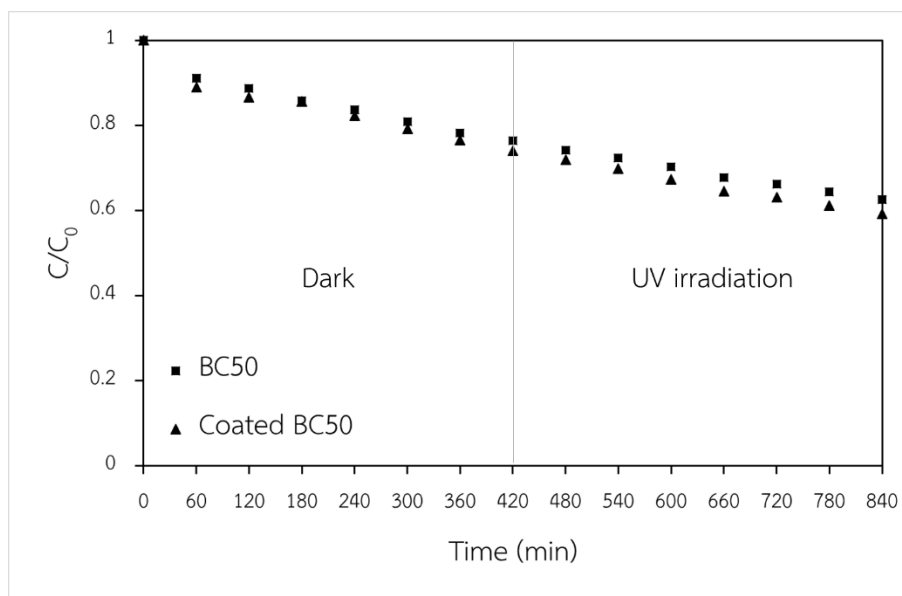
สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินในน้ำด้วยชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนสูตร BC50 ที่ผ่านการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชิ้นงานจำเป็นต้องลอยน้ำได้ เพื่อให้สัมผัสกับแสงได้โดยตรง เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นยูวีได้และยังมีความเข้มข้นของลิกนินในน้ำมาก ยิ่งส่งผลให้แสงยูวีไม่สามารถส่องผ่านลงไปใต้น้ำได้ เพื่อ

แก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ฉีดโฟมพอลิยูรีเทนเข้าไปในรูกลวงของชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานสามารถลอยบนผิวของสารละลายได้ดังรูปที่ 4.49 โดยใช้ชิ้นงาน 1 ชิ้น ลอยบนสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยไว้ในที่มืดเป็นเวลา 7 ชั่วโมง และฉายด้วยแสงจากหลอดยูวี 18 วัตต์ จำนวน 3 หลอด เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กตลอดการทดลอง และมีระยะห่างระหว่างผิวของชิ้นงานและหลอดยูวี 4 เซนติเมตร วัดความเข้มแสงยูวีช่วงความยาวคลื่น 290 – 390 นาโนเมตร ได้ประมาณ 0.8 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.49 การลอยบนสารละลายลิกนินของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณสูตร BC50 เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และฉีดโฟมพอลิยูรีเทน

ผลการทดลองประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เคลือบโดยพิจารณาจากความเข้มข้นสัมพันธ์ ( $C/C_0$ ) กับเวลา ดังรูปที่ 4.50 พบว่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มการทดสอบในที่มืด และเมื่อฉายแสงพบว่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของลิกนินยังคงลดลงด้วยอัตราการลดเท่าเดิม ซึ่งเกิดเช่นเดียวกันทั้งชิ้นงานที่เคลือบและไม่เคลือบ โดยความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินลดลงด้วยอัตราการดูดซับที่สูงในชั่วโมงที่ 1 และเริ่มลดลงด้วยอัตราคงที่หลังเวลา 2 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าอัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีอิทธิพลมากกว่าการย่อยสลายของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก เป็นเช่นนี้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์บนชิ้นงานมีปริมาณน้อยมาก ประกอบกับการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวชิ้นงานมีผลกระทบทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกมีค่าต่ำลงกว่าการใช้วัสดุโฟโตแคตาไลสต์ชนิดผง ดังนั้นจึงได้พยายามเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณ นอกจากนั้นยังได้เปลี่ยนสูตรของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณในการนำมาเป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบด้วย ดังได้กล่าวไว้ในบททดลองที่ 4.2



รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสัมพันธ์ของสารละลายลิกนินเทียบกับเวลาด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

หลังจากการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณในการทดลองที่ 4.2 และได้สูตรชิ้นงานที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการนำมาเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 2 สูตร คือ สูตร FBC01 (ซีโอดีโซเดียม เอ ต่อ ดินดำ ร้อยละ 100 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก) และ FBC02 (ถ่านกัมมันต์ ต่อ ซีโอดีโซเดียม เอ ต่อ ดินดำ ร้อยละ 25 ต่อ 75 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก) เพื่อให้ได้ชิ้นงานเคลือบที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด จึงได้พยายามเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวของชิ้นงานสูตร FBC01 และ FBC02 ด้วยวิธีต่างๆ และได้ผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าการเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เกิดการหลุดล่อนของผิวเคลือบทั้งหมด และให้ผลไม่ต่างกันเมื่อเปลี่ยนวิธีเคลือบ ไม่ว่าจะเป็วิธีการชุบเคลือบด้วยระยะเวลาต่างๆ การพ่นเคลือบที่จำนวนรอบต่างๆ และการทาที่จำนวนรอบต่างๆ เนื่องจากความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นไม่สามารถยึดเกาะกันเองได้ ถ้าชั้นเคลือบมีความหนามาก ผิวเคลือบจะเกิดการหลุดล่อนได้มาก รวมทั้งชั้นเคลือบไม่สามารถยึดเกาะกับผิวของชิ้นงานได้ โดยเฉพาะชิ้นงานสูตร FBC01 ซึ่งไม่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์ ชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จึงไม่สามารถสร้างพันธะหรือแรงกระทำกับผิวของชิ้นงานได้ แต่สำหรับชิ้นงานสูตร FBC02 ซึ่งมีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์ พบว่าชั้นเคลือบสามารถยึดเกาะได้ดี แต่เมื่อนำชิ้นงานเคลือบไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผิวเคลือบจะเกิดการหลุดล่อนเมื่อสัมผัส ตัวอย่างชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบหลังเคลือบที่เกิดการหลุดล่อนแสดงดังรูปที่ 4.51 ต่อจากนั้นจึงลดความเข้มข้นของสารเคลือบลงเหลือเพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยโดยใช้วิธีการทาเคลือบ พบว่าผิวเคลือบก่อนเผายึดเกาะบนผิวของชิ้นงานทั้ง 2 สูตร ได้ดี แต่เมื่อเผาชิ้นงานแล้วพบว่าผิวเคลือบบางส่วนจะหลุดติดมือเมื่อสัมผัสและเมื่อนำชิ้นงานไปแช่น้ำและปั่นกวนด้วยแท่ง

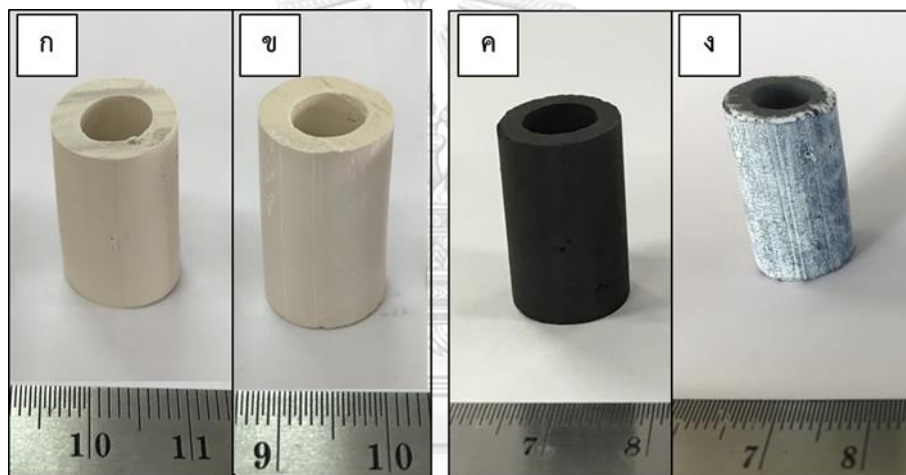
แม่เหล็กผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบไว้จะหลุดออกทีละน้อย ส่งผลให้น้ำขุ่นขึ้นเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานาน จึงแก้ปัญหาด้วยการเติมสารตัวเติมคือ CMC และโซเดียมซิลิเกต ร้อยละ 0.2 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าผิวเคลือบยึดเกาะได้ดีบนผิวชิ้นงานทั้ง 2 สูตร ทั้งก่อนและหลังเผา เนื่องจาก CMC มีอิทธิพลต่อการยึดเกาะก่อนเผาได้<sup>[116]</sup> กล่าวคือ CMC สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันของผงไทเทเนียมในชั้นเคลือบและการยึดเกาะของชั้นเคลือบกับผิวของชิ้นงานได้ ส่วนผลของการเติมโซเดียมซิลิเกตส่งผลให้เคลือบยึดเกาะบนผิวของชิ้นงานและยึดเกาะกันเองได้ดีหลังเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส<sup>[117]</sup> โดยใช้น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูน 1 ชิ้น ได้ประมาณ 0.072 กรัม หรือประมาณ 6.11 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีลักษณะชิ้นงานก่อนและหลังเคลือบดังรูปที่ 4.52

ตารางที่ 4.6 ผลการเคลือบวัสดุโพโตแคทาลิสต์บนชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนด้วยวิธีต่างๆ

| สูตรวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก | สารเคลือบ            | สารตัวเติม  | วิธีเคลือบ | ผลการเคลือบ                    |
|------------------------------|----------------------|---|------------|--------------------------------|
| FBC01 และ FBC02              | TiO <sub>2</sub> 10% | -   | ชุบ        | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01 และ FBC02              | TiO <sub>2</sub> 10% | ดินดำ 5%  | พ่น        | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 10% | -   | พ่นและทา   | เคลือบหลุดล่อนเมื่อสัมผัส      |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 10% | CMC 1 และ 5%                                      | พ่นและทา   | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 10% | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 5%               | พ่น        | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 5%  | -   | ชุบ        | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 5%  | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 5%               | พ่น        | เคลือบหลุดล่อน                 |
| FBC01                        | TiO <sub>2</sub> 1%  | -   | ทา         | เคลือบติดได้แต่หลุดเมื่อสัมผัส |
| FBC01 และ FBC02              | TiO <sub>2</sub> 1%  | CMC 0.2%<br>Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> 0.5% | ทา         | เคลือบติดดี                    |



รูปที่ 4.51 ตัวอย่างลักษณะการหลุดล่อนของผิวเคลือบหลังเผา บนชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบสูตร (ก)FBC01 และ (ข) FBC02

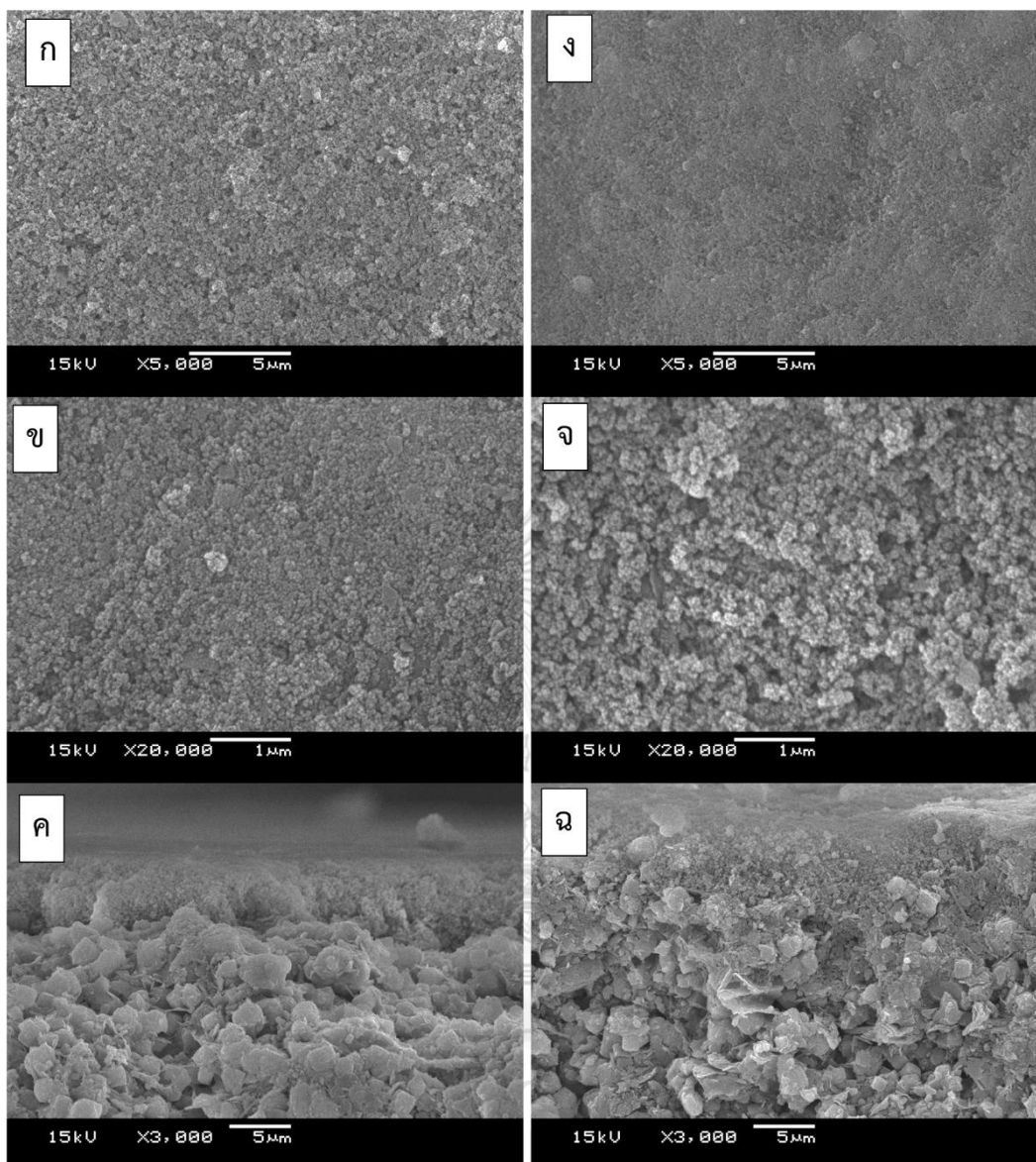


รูปที่ 4.52 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบทรงกระบอกพูน สูตร FBC01 (ก) ก่อนเคลือบ (ข) หลังเคลือบ และ สูตร FBC02 (ค) ก่อนเคลือบ (ง) หลังเคลือบ

หลังจากนั้นจึงได้นำชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบทรงกระบอกพูนหลังเคลือบมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคเพื่อพิจารณาลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างเคลือบกับผิวของชิ้นงานทั้ง 2 สูตร รวมทั้งเพื่อสังเกตความหนาของชั้นเคลือบด้วย ได้ผลดังรูปที่ 4.53 สำหรับชิ้นงานวัสดุเซรามิกประกอบทรงกระบอกพูนสูตร FBC01 และสูตร FBC02 จากการพิจารณารูปที่ 4.53 (ก) และ (ง) พบว่าลักษณะผิวเคลือบมีความแตกต่างกับวัสดุเซรามิกประกอบที่ใช้เป็นตัวรองรับอย่างชัดเจน ซึ่งชั้นผิวเคลือบมีลักษณะของอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากยึดเกาะกันอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบในรูปที่ 4.53 (ค) และ (ฉ) พบว่าชั้นเคลือบบนผิวของวัสดุเซรามิกประกอบสูตร FBC01 มีความหนาประมาณ 3 – 5 ไมโครเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับความหนาของชั้นเคลือบบนผิวของวัสดุเซรามิกประกอบสูตร FBC02 แต่มีข้อแตกต่างกันที่เนื้อเคลือบสามารถแทรกซึมเข้ามาในผิวของ

วัสดุเชิงประกอบสูตร FBC02 ได้มากกว่าสูตร FBC01 เนื่องจากความพรุนตัวของสูตร FBC02 มีค่ามากกว่าสูตร FBC01 และเนื่องจากสูตร FBC02 มีองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์จึงสามารถช่วยเรื่องการดูดซับสารเคลือบเข้ามาในผิวของชิ้นงานมากกว่า ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.53 (ข) และ (จ) พบว่าการเกาะกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของวัสดุเชิงประกอบสูตร FBC02 มีความหนาแน่นของอนุภาคน้อยกว่าบนสูตร FBC01 ซึ่งเกิดจากลักษณะผิวของวัสดุเชิงประกอบที่เป็นตัวรองรับที่แตกต่างกัน



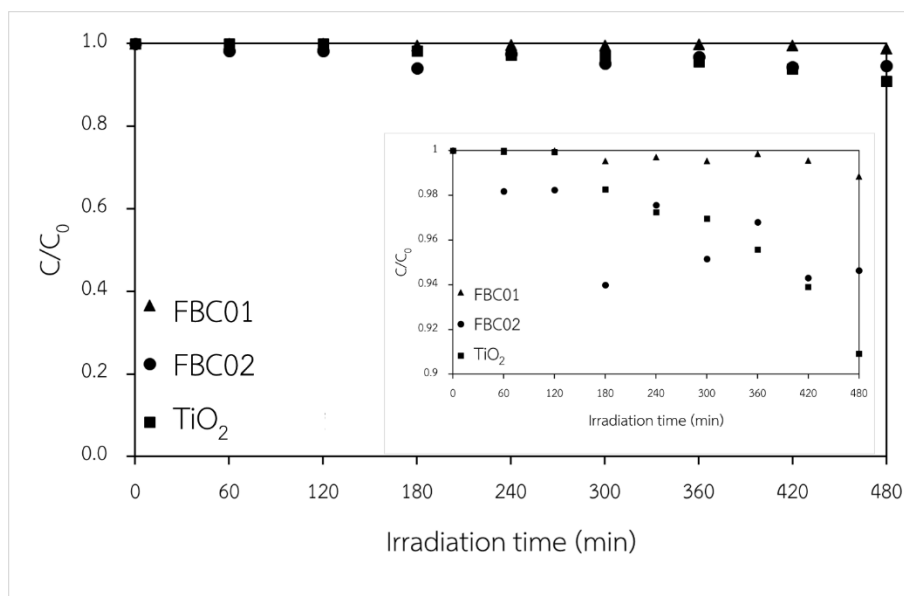


รูปที่ 4.53 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สูตร FBC01 (ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า และ สูตร FBC02 (ง) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (จ) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ฉ) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารละลายลิแกนด์ด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนหลังเคลือบด้วยวัสดุโพแทสเซียมและผ่านการฉีดโฟมพอลิยูรีเทนเหลวไว้ในรูกลวงของท่อ จำนวน 5 ชั้น โดยใช้สารละลายลิแกนด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร เป็นตัวแทนของน้ำเสียในการทดสอบ โดยก่อนทำการฉายแสงด้วยหลอดฟลูออโรฮาโลเจน ระยะห่าง 30 เซนติเมตร วัดความเข้มข้น



แสงยูวีสูงสุดได้ประมาณ 27 วัตต์ต่อตารางเมตร และความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดได้ประมาณ 440 วัตต์ต่อตารางเมตร และใช้เครื่องปั๊มลมขนาดเล็กช่วยให้สารละลายลิกนินหมุนเวียนได้ ก่อนการฉายแสงจำเป็นต้องทำชิ้นงานให้อิ่มด้วยสารละลายลิกนิน ก่อนนำมาทดสอบเพื่อตัดผลจากการดูดซับของวัสดุเชิงประกอบที่เป็นตัวรองรับออก (วิธีการได้อธิบายในภาคผนวก ค) ผลการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนินของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบทั้ง 2 สูตร แสดงดังรูปที่ 4.54 และยังได้เปรียบเทียบกับผลของการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.036 กรัม ซึ่งเท่ากับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณ 1 ด้าน เนื่องจากในการทดลองชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกสามารถลอยน้ำและสัมผัสกับแสงได้เพียง 1 ด้าน จากผลการทดลองโดยพิจารณาความเข้มข้นสัมพันธ์ที่เวลาการฉายแสงที่เพิ่มขึ้น พบว่าการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนให้กับวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา 480 นาที สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน ได้ประมาณร้อยละ 1 สำหรับวัสดุตัวรองรับสูตร FBC01 และ ร้อยละ 6 สำหรับวัสดุตัวรองรับสูตร FBC02 เห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายลิกนินโดยรวมลดลงไม่มากนักเนื่องจากการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกลดลง<sup>[50]</sup> รวมทั้งปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มากเพียงพอต่อการลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน<sup>[29]</sup> เมื่อพิจารณาการใช้เพียงผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.036 กรัม ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 200 มิลลิกรัม และฉายด้วยแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนินได้ประมาณร้อยละ 10 ซึ่งมากกว่าการเคลือบผิวของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพียง 0.036 กรัม ภายใต้การฉายแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนก็ยังไม่เพียงพอต่อการกำจัดลิกนินในน้ำให้สมบูรณ์ได้ และในกรณีเปรียบเทียบผลของการใช้วัสดุที่ใช้เป็นตัวรองรับต่างกัน คือสูตร FBC01 ไม่มีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์ และสูตร FBC02 มีส่วนประกอบของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่มีในชิ้นงานสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน เนื่องจากสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ถึงแม้ว่าจะทำให้ชิ้นงานอิ่มด้วยสารละลายลิกนินแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากระบบการดูดซับเมื่อเข้าถึงสภาวะสมดุลจะมีการดูดและคายลิกนิน ก่อให้เกิดการนำลิกนินเข้ามาสัมผัสผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของชิ้นงานได้มากขึ้น เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสัมผัสกับลิกนินได้มากขึ้นทำให้ลิกนินถูกย่อยได้ง่ายขึ้น<sup>[66]</sup>



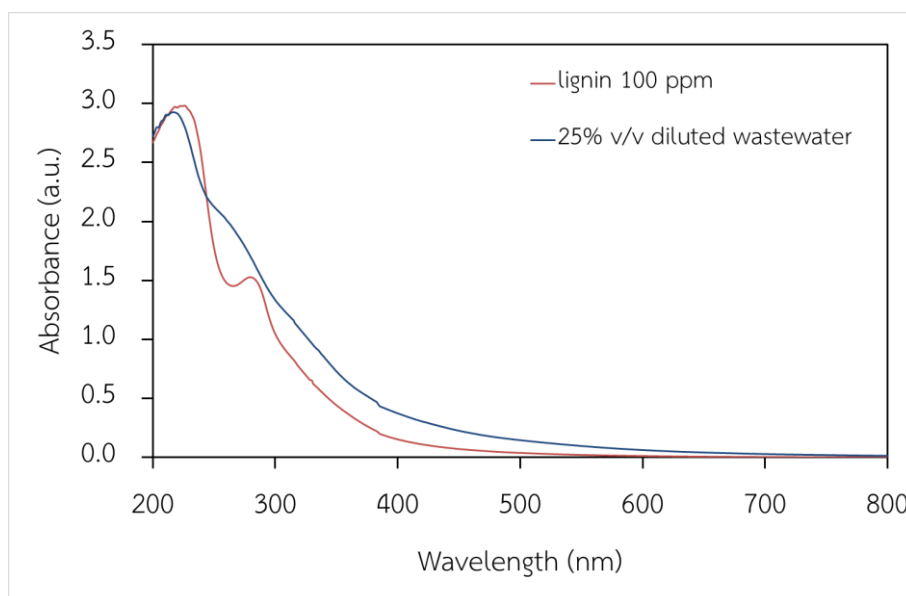
รูปที่ 4.54 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพันธ์เมื่อเวลาการฉายแสงเพิ่มขึ้นของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (แผนภาพเล็กแสดงการพิจารณาที่ค่า  $C/C_0$  ในช่วง 0.9 – 1)

#### 4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์

การทดลองนี้ได้นำผงวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ และวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ มาทดสอบประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานน้ำมันปาล์ม ซึ่งได้รับมาจากบริษัท ตรีงน้ำมันปาล์ม จำกัด โดยพิจารณาจากร้อยละความเข้มข้นของน้ำทิ้ง

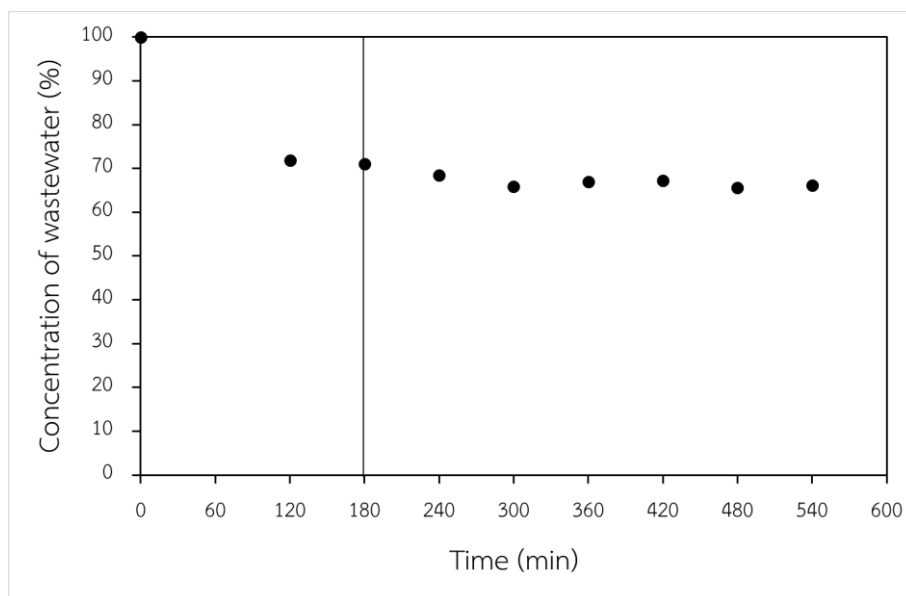
ในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีของน้ำทิ้งด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ล้าง ได้นำน้ำทิ้งซึ่งมีของแขวนลอยขนาดเล็กกระจายอยู่ไปผ่านตะกอนด้วยการหมุนเหวี่ยง ก่อนนำไปทดสอบโดยคัดเลือกลูท T80P20W มาใช้ในการทดสอบ ใช้ผงวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบ 0.30 กรัม กระจายตัวในน้ำทิ้งปริมาณ 300 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีการเดียวการทดลองที่ 4.1.1 และเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งที่เวลาการทดสอบต่างๆ มาเจือจางให้มีความเข้มข้นเหลือเพียงร้อยละ 25 โดยปริมาตร เพื่อนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเส้นแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ ด้วยเครื่อง UV/VIS spectrophotometer และพิจารณาการลดลงของค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร และคิดเป็นร้อยละความเข้มข้นของน้ำทิ้ง โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำทิ้งที่ได้รับมาเป็นร้อยละ 100 เนื่องจากยังไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของลิกนิน

ในน้ำทิ้งได้ ประกอบกับน้ำทิ้งที่ได้รับมามีแถบการดูดกลืนแสงที่แตกต่างจากลิกนินที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.55 ซึ่งเกิดจากกระบวนการสกัดลิกนินจากพืชที่แตกต่างกัน<sup>[27]</sup>

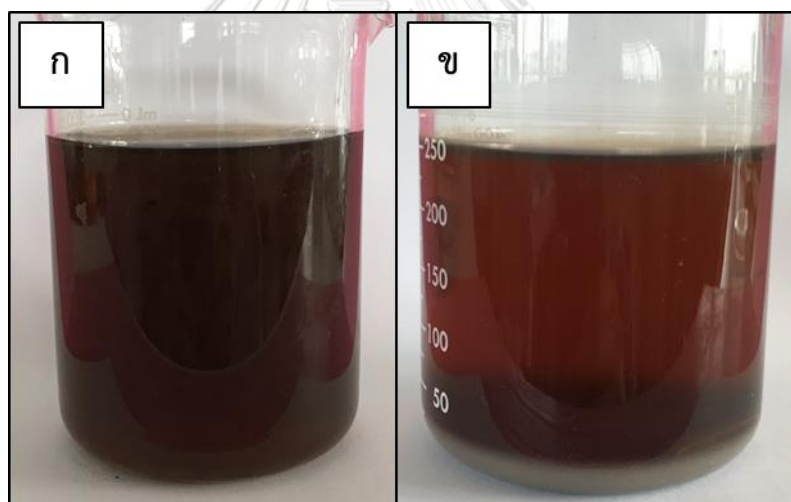


รูปที่ 4.55 แถบการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีร้อยละความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร และสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งแสดงดังรูปที่ 4.56 พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งลดลงได้ประมาณร้อยละ 28 หลังกระจายผงวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ล้าง สูตร T80P20W และปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากการดูดซับของวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบและการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของไฟไรต์<sup>[109]</sup> และเมื่อฉายด้วยแสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งลดลงไปประมาณเป็นร้อยละ 33 ซึ่งลดลงจากก่อนฉายแสงเพียงร้อยละ 5 เท่านั้น เนื่องจากน้ำทิ้งมีความเข้มข้นที่สูงมาก ส่งผลให้แสงผ่านลงไปสัมผัสกับอนุภาควัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ได้ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิติกได้ไม่เต็มที่ และเมื่อสังเกตลักษณะความเข้มข้นของน้ำทิ้งด้วยตาเปล่าทั้งก่อนและหลังการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.57 พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการทดสอบมีความเจือจางกว่าน้ำทิ้งก่อนการทดสอบ



รูปที่ 4.56 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์



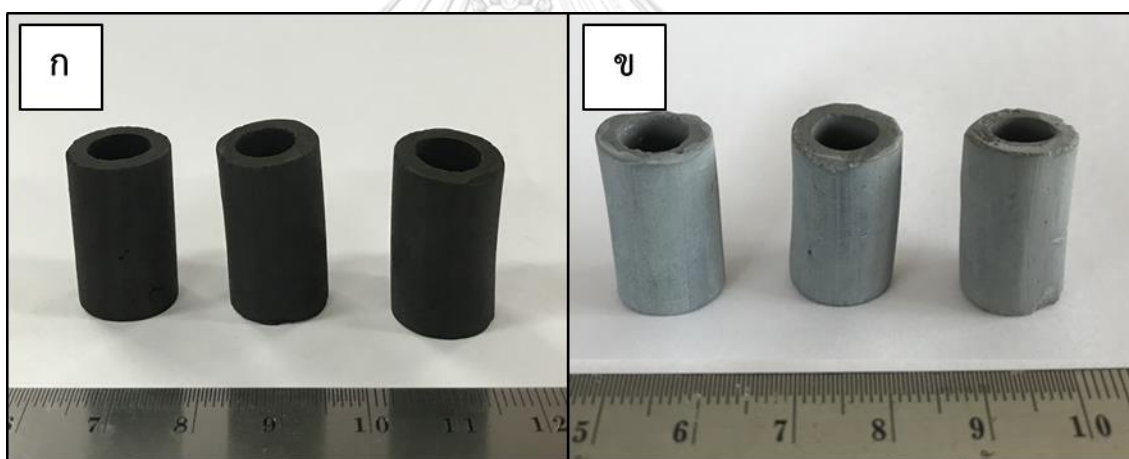
รูปที่ 4.57 ลักษณะสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์ม

(ก) ก่อนทดสอบ และ

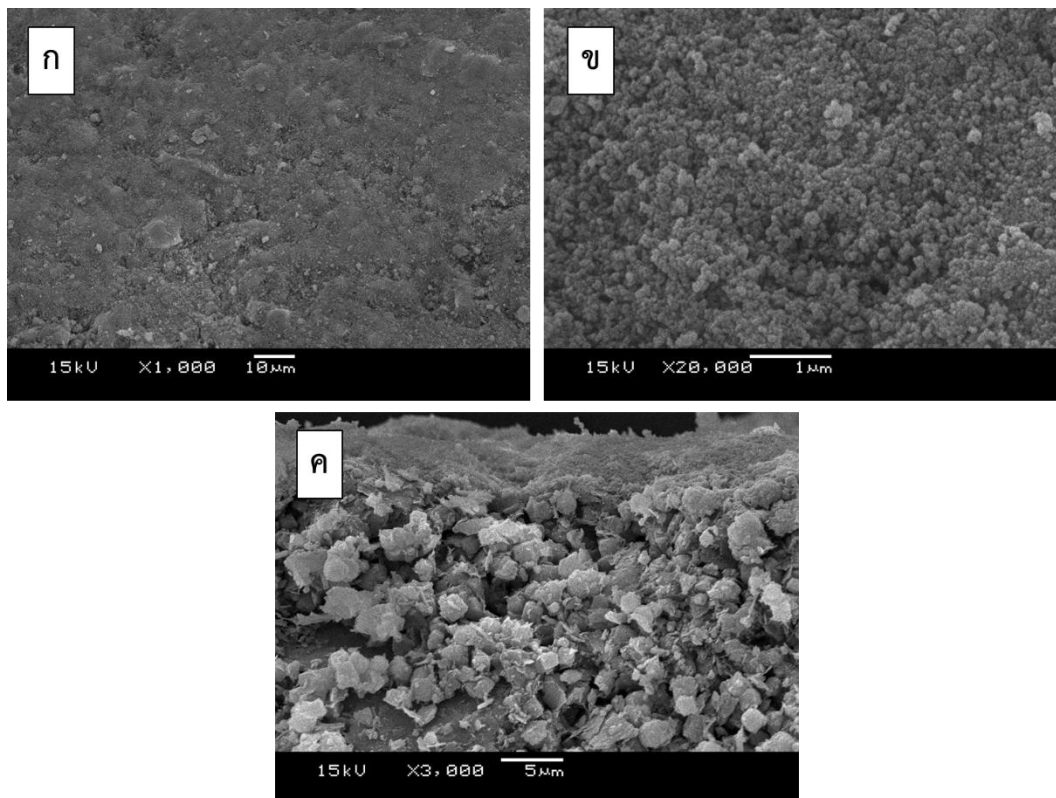
(ข) หลังทดสอบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์

สำหรับการทดสอบความสามารถในการลดความเข้มสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ล้าง ได้นำผงวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ที่ล้าง สูตร T80P20W มาเคลือบบนวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนสูตร FBC02 และเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใน

ภาชนะปิดและปกคลุมด้วยถ่านแกลบ ได้ชิ้นงานมีลักษณะดังรูปที่ 4.58 (ก) และ (ข) พบว่าชิ้นงานหลังเคลือบมีสีที่ผิวเป็นสีเทาซึ่งเป็นสีของวัสดุโพลีโพรพิลีนที่เคลือบไว้ หลังจากนั้นก็ให้นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.59 (ก) – (ค) จากรูป (ก) พบว่าชั้นเคลือบปกคลุมผิวของวัสดุตัวรองรับได้ดีแต่สังเกตเห็นว่าบางจุดมีรอยแยกของผิวเคลือบซึ่งอาจเป็นรอยต่อของอนุภาควัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.59 (ก) – (ค) จากรูป (ก) พบว่าชั้นเคลือบปกคลุมผิวของวัสดุตัวรองรับได้ดีแต่สังเกตเห็นว่าบางจุดมีรอยแยกของผิวเคลือบซึ่งอาจเป็นรอยต่อของอนุภาควัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ และเมื่อสังเกตผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20000 เท่า ในรูป (ข) พบว่าผิวเคลือบเกิดจากการเกาะกันอย่างหลวมๆ ของอนุภาคขนาดเล็กของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของไฟไรต์ และในรูป (ค) แสดงภาพตัดขวางชั้นเคลือบและวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกที่เป็นตัวรองรับ พบว่ามีอนุภาคของวัสดุโพลีโพรพิลีนที่เคลือบไว้ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ เกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอก และมีบางส่วนที่เข้ามาในผิวของตัวรองรับ เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบพบว่ามีความหนาเพียง 1 – 2 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.58 ลักษณะชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพอร์น (ก) ก่อนเคลือบ และ (ข) หลังเคลือบด้วยวัสดุโพลีโพรพิลีนที่เคลือบไว้ไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์



รูปที่ 4.59 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ที่ล่าง (ก) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) ผิวเคลือบที่กำลังขยาย 20,000 เท่า และ (ค) ภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

หลังจากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ มาฉีดด้วยโพลีเมทิลอะครีเลตเพื่อให้งานลอยบนผิวน้ำได้ และนำไปทดสอบความสามารถในการลดสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 50 ชิ้น ลอยบนผิวน้ำที่ปริมาณ 2,000 มิลลิลิตร ในตู้กระจก โดยมีความลึกของน้ำที่ประมาณ 56 เซนติเมตร และใช้เครื่องปั๊มลมขนาดเล็กช่วยให้น้ำที่หมุนเวียนได้ ดังรูปที่ 4.60 โดยเริ่มทดสอบเมื่อเวลา 9.00 น. ของวันที่ 28 มีนาคม ถึงเวลา 9.00 น. ของวันที่ 31 มีนาคม 2561 และเก็บน้ำทิ้งตัวอย่างมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเส้นแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ ด้วยเครื่อง UV/VIS spectrophotometer และพิจารณาการลดลงของค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร และคิดเป็นความเข้มข้นของน้ำทิ้งเป็นร้อยละ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำทิ้งที่ได้รับมาเป็นร้อยละ 100 และเปรียบเทียบกับ การทดสอบซ้ำชิ้นงานในที่มีดในเวลาเท่ากัน

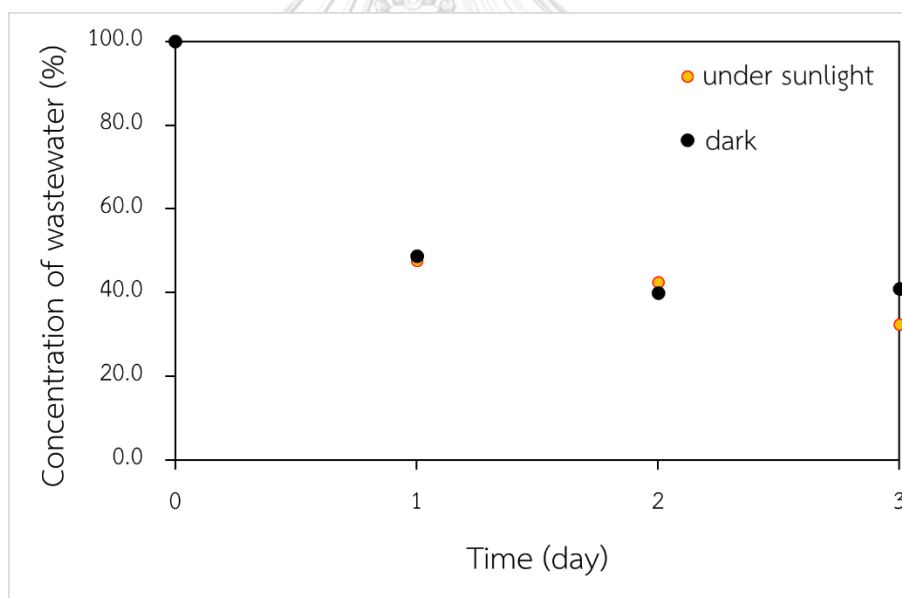


รูปที่ 4.60 การทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.61 พบว่าร้อยละความเข้มข้น (ความเข้มข้น) ของน้ำทิ้งของการทดสอบแซ่ชิ้นงานในที่มืดและภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ มีค่าลดลงเหลือประมาณร้อยละ 50 ในเวลา 1 วัน และเหลือประมาณร้อยละ 40 ในเวลา 2 วัน แต่เมื่อพิจารณาเมื่อเวลา 3 วัน พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการแซ่ชิ้นงานในที่มืดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากวันที่ 2 เนื่องจากชิ้นงานเริ่มอิ่มตัว แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานสามารถอิ่มตัวได้ในเวลา 2 วัน ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการแซ่ชิ้นงานภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ในวันที่ 3 มีความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 30 เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาลิติกของชิ้นงานภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ในช่วงวันที่ 2 ถึง 3 ซึ่งแสดงผลชัดเจนหลังชิ้นงานอิ่มตัว ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งลดลงประมาณร้อยละ 10 และเมื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของน้ำทิ้งของทั้ง 2 การทดสอบ ด้วยตาเปล่าดังแสดงในรูปที่ 4.62 และรูปที่ 4.63 พบว่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการแซ่ชิ้นงานภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนจากก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ 3 วัน ซึ่งแตกต่างจากความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการแซ่ชิ้นงานในที่มืด โดยเฉพาะหลังการทดสอบ 2 และ 3 วัน และเมื่อคิดประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งในการทดสอบ 3 วัน ต่อชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ 1 ชิ้น หลังการแซ่ชิ้นงานภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ พบว่ามีค่าเป็นร้อยละ 1.4

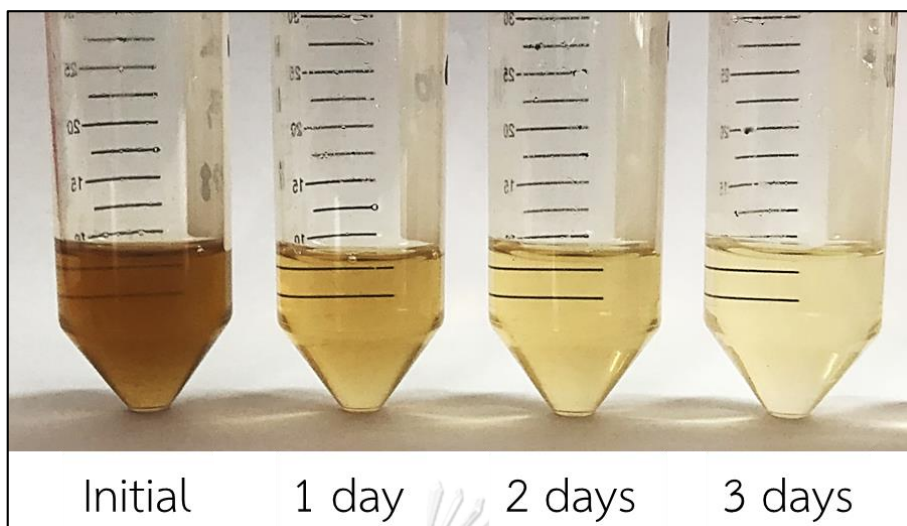


ต่อการใช้ชั้นงาน 1 ชั้น ในน้ำทิ้งปริมาณ 2,000 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบของทั้ง 2 การทดสอบ มาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในน้ำทิ้ง โดยนำน้ำทิ้งไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำออก พบว่าน้ำทิ้งก่อนการทดสอบมีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 0.49 โดยน้ำหนัก ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านการทดสอบในที่มืดและภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ พบว่ามีปริมาณของแข็งลดลงเหลือประมาณร้อยละ 0.43 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณของแข็งของน้ำทิ้งหลังการทดสอบทั้ง 2 การทดสอบ มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำทิ้งก่อนการทดสอบ เนื่องจากกลินในน้ำทิ้งถูกดูดซับด้วยชั้นงานวัสดุเชิงประกอบ ส่วนปริมาณของแข็งในน้ำทิ้งที่ผ่านการทดสอบในที่มืดและภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากกลินในน้ำทิ้งหลังการทดสอบภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์อาจเกิดการย่อยสลายไปเป็นสารประกอบชนิดอื่นที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงและไม่มีสี จึงตรวจสอบไม่ได้ด้วยเครื่อง UV/Vis ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ยังคงมีสภาพเป็นของแข็งหลังการระเหยน้ำออกไป

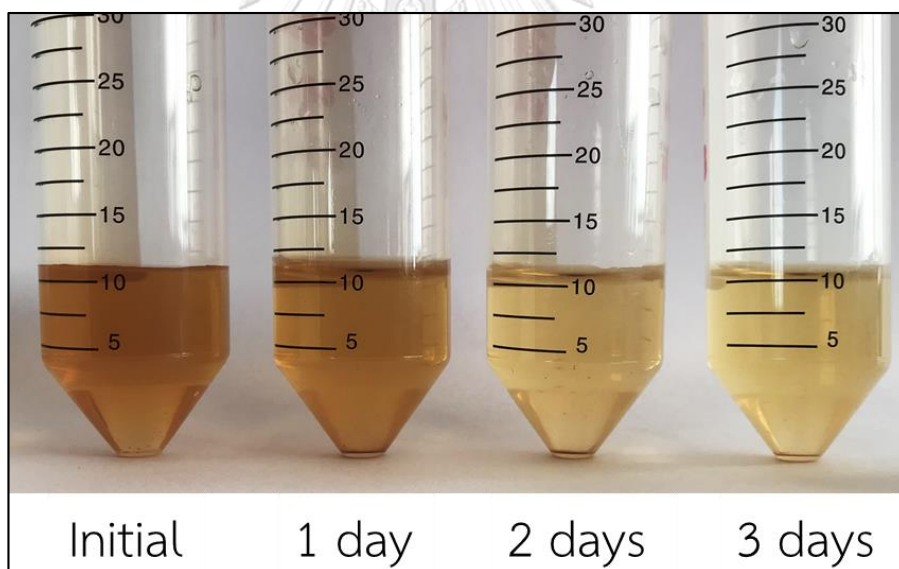


รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ในที่มืดและภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์





รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาลีสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์



รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มในการทดสอบประสิทธิภาพการลดสีด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาลีสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ ในที่มีมืด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/วัสดุโพลีแคตตาไลสต์ ทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุน ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดและเผา สามารถแบ่งได้ 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

##### 5.1.1 การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุน เพื่อใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบวัสดุโพลีแคตตาไลสต์

- สามารถพัฒนาวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ ทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุน โดยใช้สารอินทรีย์เป็นตัวช่วยประสานและใช้ดินดำสุราษฎร์ธานีช่วยเพิ่มความแข็งแรงหลังเผา ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อซีโอไลต์โซเดียม เอ ต่อดินดำสุราษฎร์ธานีที่เหมาะสมคือ 1 ต่อ 3 ต่อ 2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเผาที่เหมาะสมคือ 650 องศาเซลเซียส ยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในภาชนะปิดและปกคลุมด้วยถ่านกลบ โดยชิ้นงานหลังเผามีความแข็งแรง 10.48 นิวตันต่อเซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 48.47 ความหนาแน่นรวม 1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และชิ้นงานประกอบด้วยเฟสหลักคือซีโอไลต์โซเดียม เอ และควอตซ์ เฟสรองคืออิลไลต์ และยังคงพบถ่านกัมมันต์อยู่ในชิ้นงาน

##### 5.1.2 การพัฒนาวัสดุโพลีแคตตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์และไพไรต์

- สามารถพัฒนาวัสดุโพลีแคตตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ร่วมกับไพไรต์จากกากของเสียจากโรงงานเจียรไนมาร์คาไซต์ ที่ผ่านการล้างด้วยอะซิโตน เเผาที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะปิด โดยวัสดุมีโครงสร้างทางจุลภาคเป็น core/shell ซึ่งมีไพไรต์เป็นแกนกลางและไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเปลือกหุ้ม โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับไมครอน

- จากการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินภายใต้แสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจนพบว่าวัสดุโพลีแคตตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ ที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียม-ไดออกไซด์ต่อไพไรต์ร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก สามารถย่อยสลายลิกนินในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 300 มิลลิตร ได้ประมาณร้อยละ 55.16 โดยใช้ระยะเวลาฉายแสง 360 นาที โดยใช้ผงวัสดุเชิงประกอบ 0.03 กรัม

- สามารถลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มปริมาณ 300 มิลลิตร ได้ประมาณร้อยละ 33 ด้วยวัสดุโพลีแคตตาไลสต์เชิงประกอบไทเทเนียมได

ออกไซด์/ไฟโรต์ที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟโรต์ร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 0.03 กรัม ภายใต้แสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

### 5.1.3 การเคลือบวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์บนวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุน

- สามารถเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ลงบนวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกกลวงที่มีเนื้อพรุน ด้วยการทาสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หรือวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ ที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟโรต์ร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 0.5 และ 0.2 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยประสาน และเผาที่ 600 องศาเซลเซียส สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ และ 300 องศาเซลเซียส สำหรับวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาวะปิดและปกคลุมด้วยถ่านแกลบ โดยมีปริมาณผงไทเทเนียมไดออกไซด์บนชิ้นงาน 1 ชิ้น ประมาณ 0.072 กรัม หรือประมาณ 6.11 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร

- สามารถย่อยสลายลิกลินินในสารละลายลิกลินินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 200 มิลลิตร ได้ประมาณร้อยละ 5 ด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังฉีดโฟมพอลิยูรีเทนเหลว จำนวน 5 ชิ้น ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

- สามารถลดความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของโรงงานน้ำมันปาล์มปริมาณ 2,000 มิลลิตร ได้ประมาณร้อยละ 70 ด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ ทรงกระบอกที่มีเนื้อพรุน เคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไฟโรต์ร้อยละ 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก จำนวน 50 ชิ้น ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ในเวลา 3 วัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เพื่อการศึกษาผลของการใช้งานจริงของวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียมเอ ทรงกระบอกพรุนเคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตตาลิสต์ จึงควรคำนวณจำนวนชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการใช้งานในบ่อน้ำทิ้งขนาดประมาณ 1 ไร่ มีความลึก 1 - 3 เมตร เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ของบ่อน้ำทิ้งจริง

- 2) ตรวจสอบปริมาณสารอินทรีย์และชนิดของอนุพันธ์ของลิกนินหลังกระบวนการย่อยสลายด้วยวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ เคลือบด้วยวัสดุโฟโตแคตาลีสต์เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาลีติกด้วยเทคนิค HPLC และ TOC
- 3) ปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และความหนาของผนังชั้นงานตัวรองรับวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์ เพื่อศึกษาความสามารถในการล่อยเนื้อผิวหน้าของชั้นงานหลังฉีดด้วยโพลีเอทิลีนเทเลน รวมทั้งศึกษาปริมาณโพลีที่เหมาะสม
- 4) ศึกษาผลของการแลกเปลี่ยนประจุโซเดียมและแคลเซียมของซีโอไลต์ต่อลิกนิน
- 5) ศึกษาผลของขนาดของไฟไรต์ในการนำมาใช้ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายลิกนิน



## รายการอ้างอิง

1. สุรเดช ปัจฉิมกุล, et al. 2556. องค์ความรู้เรื่องปาล์มน้ำมัน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.oard8.go.th/information/kpi/kpi\\_palm.html](http://www.oard8.go.th/information/kpi/kpi_palm.html) [20 มกราคม 2559]
2. วิทยา เจริญเศรษฐกุล. 2558. การพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กในพื้นที่จังหวัดตราด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.
3. จุฑารัตน์ หนูสุข. 2546. การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. Soleimaninanadegani, M. and Manshad, S. 2014. Enhancement of biodegradation of palm oil mill effluents by local isolated microorganisms. International Scholarly Research Notices 2014:
5. Wang, J. and Wan, W. 2009. Factors influencing fermentative hydrogen production: a review. International Journal of Hydrogen Energy 34: 799-811.
6. Pogaku, R. and Sarbatly, R.H. (2013). Advances in Biofuels. Springer.
7. กรมควบคุมมลพิษ. 2558. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1) [10 มกราคม 2558]
8. เสถียร วีระวงศ์. 2539. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.diw.go.th/hawk/law/water/law6.asp> [8 มีนาคม 2561]
9. ปาริชาติ หมั่นสีทา. 2547. การกำจัดสีและซีไอดีจากน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการบำบัดบางส่วนโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. ญัฐวุฒิ บุญเยี่ยม, สมชาย ดารารัตน, ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, ทวีศักดิ์ หอมดอกไม้, และจิรวรรณ ออตะยะกุล. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน. ใน การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 1-6. 2549

11. Rakamthong, C. and Prasertsan, P. Decolorization and phenol removal of anaerobic palm oil mill effluent by phanerochaete chrysosporium ATCC 24725. in Thailand Institute of Chemical Engineering and Applied International Conference, 2011
12. Yaser, A., Cassey, T., Hairul, M., and Shazwan, A. 2014. Current review on the coagulation/flocculation of lignin containing wastewater. International Journal Waste Resources 4: 153-159.
13. Chooaksorn, W. 2012. Color removal technology in industrial wastewater. Burapha Science Journal 17: 181-191.
14. Segneanu, A.E., et al. Waste water treatment methods. (ed.), Water Treatment, Intech, 2013.
15. Myint, A.A., et al. 2016. One pot synthesis of environmentally friendly lignin nanoparticles with compressed liquid carbon dioxide as an antisolvent. Green Chemistry 18: 2129-2146.
16. Suhas, Carrott, P.J.M., and Ribeiro Carrott, M.M.L. 2007. Lignin – from natural adsorbent to activated carbon: A review. Bioresource Technology 98: 2301-2312.
17. Sundin, J. 2000. Precipitation of kraft lignin under alkaline conditions. Institutionen för pappers-och massateknologi.
18. Anjaneyulu, Y., Chary, N.S., and Raj, D.S.S. 2005. Decolourization of industrial effluents–available methods and emerging technologies–a review. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 4: 245-273.
19. Pawongrat, R. 2015. Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic-agricultural wastes. Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University 2: 143-157.
20. Howard, R., Abotsi, E., Van Rensburg, E.J., and Howard, S. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. African Journal of Biotechnology 2: 602-619.
21. Hatfield, R. and Vermerris, W. 2001. Lignin formation in plants. The dilemma of linkage specificity. Plant Physiology 126: 1351-1357.

22. Niu, M., Hou, Y., Wu, W., and Yang, R. 2017. Degradation of lignin in  $\text{NaVO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4$  aqueous solution with oxygen. Fuel Processing Technology 161: 295-303.
23. Nakano, J. and Meshitsuka, G. The detection of lignin. (ed.), Methods in lignin chemistry, 23-32. Springer, 1992.
24. Tanaka, K., Calanag, R.C.R., and Hisanaga, T. 1999. Photocatalyzed degradation of lignin on  $\text{TiO}_2$ . Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 138: 287-294.
25. Pecina, R., Burtcher, P., Bonn, G., and Bobleter, O. 1986. GC-MS and HPLC analyses of lignin degradation products in biomass hydrolyzates. Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie 325: 461-465.
26. Lupoi, J.S., Singh, S., Parthasarathi, R., Simmons, B.A., and Henry, R.J. 2015. Recent innovations in analytical methods for the qualitative and quantitative assessment of lignin. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49: 871-906.
27. Aadil, K.R., Barapatre, A., Sahu, S., Jha, H., and Tiwary, B.N. 2014. Free radical scavenging activity and reducing power of *Acacia nilotica* wood lignin. International Journal of Biological Macromolecules 67: 220-227.
28. Swinehart, D.F. 1962. The Beer-Lambert Law. Journal of Chemical Education 39: 333.
29. Kansal, S.K., Singh, M., and Sud, D. 2008. Studies on  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  photocatalysed degradation of lignin. Journal of Hazardous Materials 153: 412-417.
30. Chakradhar, B. and Shrivastava, S. 2004. Colour removal of pulp and paper effluents. Indian Journal of Chemical Technology 11: 617-621.
31. Kumar, S., Mohanty, A., Erickson, L., and Misra, M. 2009. Lignin and its applications with polymers. Journal of Biobased Materials and Bioenergy 3: 1-24.
32. รีกาณจน์ ฉัตรสกุลวิไล. 2556. ลิกนิน-แทนนิน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/ลิกนิน.pdf](http://www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/ลิกนิน.pdf) [3 ตุลาคม 2559]
33. Shao, D., Liang, J., Cui, X., Xu, H., and Yan, W. 2014. Electrochemical oxidation of lignin by two typical electrodes:  $\text{Ti/SbSnO}_2$  and  $\text{Ti/PbO}_2$ . Chemical Engineering Journal 244: 288-295.

34. Mohan, S.V. and Karthikeyan, J. 1997. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal. Environmental Pollution 97: 183-187.
35. Dalton, J.S., et al. 2002. Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>: a surface spectroscopic approach. Environmental Pollution 120: 415-422.
36. Fujishima, A., Zhang, X., and Tryk, D.A. 2008. TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. Surface Science Reports 63: 515-582.
37. Xu, C., Rangaiah, G., and Zhao, X. 2014. Photocatalytic degradation of methylene blue by titanium dioxide: experimental and modeling study. Industrial & Engineering Chemistry Research 53: 14641-14649.
38. Tang, W.Z. (2003). Physicochemical treatment of hazardous wastes. Florida: CRC Press.
39. Chong, M.N., Jin, B., Chow, C.W.K., and Saint, C. 2010. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. Water Research 44: 2997-3027.
40. นัตดา เวชชากุล. 2555. ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ. เทคโนโลยีวัสดุ 67: 25-30.
41. Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J., and Orgass, M. 2000. Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. Lacer 5: 157-168.
42. Goswami, D.Y., Kreith, F., and Kreider, J.F. (2000). Principles of solar engineering. Florida: CRC Press.
43. Mantzavinos, D. and Psillakis, E. 2004. Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 79: 431-454.
44. สรรค์ จิตรไคร์ครวญ. 2009. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.
45. Luttrell, T., et al. 2014. Why is anatase a better photocatalyst than rutile?- Model studies on epitaxial TiO<sub>2</sub> films. Scientific reports 4: 4043.



46. Kasanen, J., Salstela, J., Suvanto, M., and Pakkanen, T.T. 2011. Photocatalytic degradation of methylene blue in water solution by multilayer TiO<sub>2</sub> coating on HDPE. Applied Surface Science 258: 1738-1743.
47. Mikula, M., Brezova, V., Čěppan, M., Pach, L., and Karpinský, Ľ. 1995. Comparison of photocatalytic activity of sol-gel TiO<sub>2</sub> and P25 TiO<sub>2</sub> particles supported on commercial fibreglass fabric. Journal of materials science letters 14: 615-616.
48. Horikoshi, S., Watanabe, N., Onishi, H., Hidaka, H., and Serpone, N. 2002. Photodecomposition of a nonylphenol polyethoxylate surfactant in a cylindrical photoreactor with TiO<sub>2</sub> immobilized fiberglass cloth. Applied Catalysis B: Environmental 37: 117-129.
49. Kouamé, N.A., et al. 2011. Preliminary study of the use of β-SiC foam as a photocatalytic support for water treatment. Catalysis Today 161: 3-7.
50. Vargová, M., et al. 2011. TiO<sub>2</sub> thick films supported on reticulated macroporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foams and their photoactivity in phenol mineralization. Applied Surface Science 257: 4678-4684.
51. Ullah, S., et al. 2015. Enhanced photocatalytic properties of core@shell SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> nanoparticles. Applied Catalysis B: Environmental 179: 333-343.
52. Patnaik, P. (2003). Handbook of inorganic chemicals. New York: McGraw-Hill.
53. Izzard, J.E. and Clemency, C.V. 1967. X-ray study of the sedimentary pyrite of western New York. Journal of Sedimentary Research 37:
54. The Swarovski Group. What is Marcasite?[Online]. Available from: <https://www.swarovski-gemstones.com/brand/Marcasite.en.html> [12 March 2018]
55. Arem, J. 2013. Marcasite value, price, and jewelry information[Online]. Available from: <https://www.gemsociety.org/article/marcasite-jewelry-and-gemstone-information/> [3 March 2018]
56. Ennaoui, A., et al. 1993. Iron disulfide for solar energy conversion. Solar Energy Materials and Solar Cells 29: 289-370.
57. Tian, A., et al. 2015. Pyrite nanotube array films as an efficient photocatalyst for degradation of methylene blue and phenol. RSC Advances 5: 62724-62731.

58. Cohn, C.A., et al. 2006. Pyrite-induced hydroxyl radical formation and its effect on nucleic acids. Geochemical Transactions 7: 3.
59. Liu, S., Li, M., Li, S., Li, H., and Yan, L. 2013. Synthesis and adsorption/photocatalysis performance of pyrite FeS<sub>2</sub>. Applied Surface Science 268: 213-217.
60. Lee, G. and Kang, M. 2013. Physicochemical properties of core/shell structured pyrite FeS<sub>2</sub>/anatase TiO<sub>2</sub> composites and their photocatalytic hydrogen production performances. Current Applied Physics 13: 1482-1489.
61. Inagaki, M., Hirose, Y., Matsunaga, T., Tsumura, T., and Toyoda, M. 2003. Carbon coating of anatase-type TiO<sub>2</sub> through their precipitation in PVA aqueous solution. Carbon 41: 2619-2624.
62. Xu, Y., Zheng, W., and Liu, W. 1999. Enhanced photocatalytic activity of supported TiO<sub>2</sub>: dispersing effect of SiO<sub>2</sub>. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 122: 57-60.
63. อนุสรณ์ สิ้นสะอาด. 2017. การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี 10: 95-108.
64. Seelig, B., Bergsrud, F., and Derickson, R. 2010. Treatment systems for household water supplies: activated carbon filtration[Online]. Available from: <https://www.extension.umn.edu/environment/housing-technology/moisture-management/activated-carbon-filtration/index.html> [12 March 2018]
65. Ravichandran, L., Selvam, K., and Swaminathan, M. 2010. Highly efficient activated carbon loaded TiO<sub>2</sub> for photo defluoridation of pentafluorobenzoic acid. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 317: 89-96.
66. Tryba, B., Tsumura, T., Janus, M., Morawski, A.W., and Inagaki, M. 2004. Carbon-coated anatase: adsorption and decomposition of phenol in water. Applied Catalysis B: Environmental 50: 177-183.
67. Kim, T.-W., et al. 2008. Adsorption and photocatalytic decomposition of organic molecules on carbon-coated TiO<sub>2</sub>. Journal of Materials Science 43: 6486-6494.

68. Chen, M.L., Bae, J.S., and Oh, W.C. 2006. Preparation of carbon-coated TiO<sub>2</sub> at different heat treatment temperature and their photoactivity. Carbon Letters 7: 259-65.
69. Wang, X., et al. 2009. Degradation of methyl orange by composite photocatalysts nano-TiO<sub>2</sub> immobilized on activated carbons of different porosities. Journal of Hazardous Materials 169: 1061-1067.
70. Auerbach, S.M., Carrado, K.A., and Dutta, P.K. (2003). Handbook of zeolite science and technology. New York: CRC press.
71. Jha, B. and Singh, D.N. (2016). Fly ash zeolites. Singapore: Springer.
72. Franklin, K.R. and Townsend, R.P. 1985. Multicomponent ion exchange in zeolites. Part 1.—Equilibrium properties of the sodium/calcium/magnesium–zeolite A system. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases 81: 1071-1086.
73. Murad, S., Jia, W., and Krishnamurthy, M. 2004. Ion-exchange of monovalent and bivalent cations with NaA zeolite membranes: a molecular dynamics study. Molecular Physics 102: 2103-2112.
74. Hussein, M., Khader, K.M., and Musleh, S.M. 2014. Characterization of raw zeolite and surfactant-modified zeolite and their use in removal of selected organic pollutants from water. International Journal of Chemical Sciences 12: 815-844.
75. Hulbert, M.H. 1987. Sodium, calcium, and ammonium exchange on clinoptilolite from the Fort Laclede Deposit, Sweetwater County, Wyoming. Clays and Clay Minerals 35: 458-462.
76. Petkowicz, D.I., et al. 2009. Photodegradation of methylene blue by in situ generated titania supported on a NaA zeolite. Applied Catalysis A: General 357: 125-134.
77. Ksibi, M., et al. 2003. Photodegradation of lignin from black liquor using a UV/TiO<sub>2</sub> system. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 154: 211-218.

78. เขมกร โกมลศิริกุล. 2554. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ไททานเนียม สำหรับการบำบัดน้ำเสียอินทรีย์จากอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
79. ธนากร เทพามาตย์. 2559. การขึ้นรูปไส้กรองน้ำจากเซรามิกเชิงประกอบถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์/ซิงก์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
80. วิไลรัตน์ โกสุพรรณ. 2552. การขึ้นรูปและลักษณะสมบัติของเซรามิกวงฝังคอร์เตียไรต์ จากของเสียในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
81. Abraitis, P.K., Patrick, R.A.D., and Vaughan, D.J. 2004. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: a review. International Journal of Mineral Processing 74: 41-59.
82. Fornasiero, D., Eijt, V., and Ralston, J. 1992. An electrokinetic study of pyrite oxidation. Colloids and Surfaces 62: 63-73.
83. Fernandes, D.M., Hechenleitner, A.A.W., and Pineda, E.A.G. 2006. Kinetic study of the thermal decomposition of poly(vinyl alcohol)/kraft lignin derivative blends. Thermochimica Acta 441: 101-109.
84. Ali, H., Atta, A., and Senna, M. 2015. Physico-chemical properties of carboxymethyl cellulose (CMC)/nanosized titanium oxide (TiO<sub>2</sub>) gamma irradiated composite. Arab Journal of Nuclear Science And Applications 48: 44-52.
85. Gerasimov, A.V., Ziganshin, M.A., Gorbachuk, V.V., and Usmanova, L.S. 2013. Formation of solid dispersion of PEG-1000 with phenacetin according to differential scanning calorimetry. Pharm Chem 5: 149-55.
86. Sanyang, M., Sapuan, S., Jawaid, M., Ishak, M., and Sahari, J. Effect of glycerol and sorbitol plasticizers on physical and thermal properties of sugar palm starch based films. in Recent Advances in Environment, Ecosystems and Development. Proceedings of the 13th International Conference on Environment, Ecosystems and Development, 23-25. 2015

87. Jiang, D., Zeng, Y., Singh, M., and Heinrich, J. (2010). *Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
88. Karamanova, E., et al. Sintering study of new ceramic materials based on incinerator secondary raw material and refractory clay. in Proceeding of The International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management, 2010
89. Milheiro, F.A.C., Freire, M.N., Silva, A.G.P., and Holanda, J.N.F. 2005. Densification behaviour of a red firing Brazilian kaolinitic clay. Ceramics International 31: 757-763.
90. Salomão, R., Bôas, M.O.C.V., and Pandolfelli, V.C. 2011. Porous alumina-spinel ceramics for high temperature applications. Ceramics International 37: 1393-1399.
91. Ranti, O.S., Kayode, T.H., Emmanuel, O.O., Olayide, A.P., and Olufemi, A.F. 2015. Production and characterization of clay bonded carbon refractory from ifon clay and spent graphite electrode. International Journal of Metallurgical Engineering 4: 33-39.
92. Wang, X., Zhong, J., Wang, Y., and Yu, M. 2006. A study of the properties of carbon foam reinforced by clay. Carbon 44: 1560-1564.
93. Yates, M., Martín-Luengo, M.A., Argomaniz, L.V., and Velasco, S.N. 2012. Design of activated carbon-clay composites for effluent decontamination. Microporous and Mesoporous Materials 154: 87-92.
94. Kumar, R. and Bhargava, P. 2015. Fabrication of low specific resistance ceramic carbon composites by slip casting. Journal of Asian Ceramic Societies 3: 262-265.
95. Nawaukaratharnant, N., Wiratphinthu, B., Nilpairach, S., Mongkolkachit, C., and Wasanapiarnpong, T. 2014. Effect of alumina source and soaking time on properties of refractory mortar using as slumping mold. Key Engineering Materials 608: 301-306.

96. Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K., and Namasivayam, C. 2001. Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. Separation and Purification Technology 24: 497-505.
97. Yan, K., et al. 2017. Decomposition and phase transformation mechanism of kaolinite calcined with sodium carbonate. Applied Clay Science 147: 90-96.
98. Siddique, R. and Khan, M.I. (2011). Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media.
99. Gastuche, M., Toussaint, F., Fripiat, J., Touilleaux, R., and Van Meersche, M. 1963. Study of intermediate stages in the kaolin-metakaolin transformation. Clay Minerals Bulletin 5: 227-236.
100. Zālīte, I. and Letlena, A. 2012. Synthesis and characterization of nanosized titanium carbide by carbothermal reduction of precursor gels. Materials Science 18: 75-78.
101. Lee, V.-G. and Yeh, T.-H. 2008. Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. Materials Science and Engineering: A 485: 5-13.
102. Sutcu, M., Akkurt, S., Bayram, A., and Uluca, U. 2012. Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition. Ceramics International 38: 1033-1041.
103. Sun, H., Wu, D., Guo, X., and Navrotsky, A. 2015. Energetics and structural evolution of Na-Ca exchanged zeolite A during heating. Physical Chemistry Chemical Physics 17: 9241-9247.
104. Berger, A.S., Samsonova, T.I., and Yakovlev, L.K. 1971. Thermal decomposition of cation exchange forms of zeolite A. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Division of chemical science 20: 2015-2019.
105. Colyer, L.M., Greaves, G.N., Carr, S.W., and Fox, K.K. 1997. Collapse and recrystallization processes in zinc-exchanged zeolite-A: A combined X-ray diffraction, XAFS, and NMR study. The Journal of Physical Chemistry B 101: 10105-10114.

106. Gupta, S., Green, D.J., Messing, G.L., and Peterson, I.M. 2010. Thermomechanical behavior of ceramic green bodies during presintering. Journal of the American Ceramic Society 93: 2611-2616.
107. Colyer, L., Greaves, G., Carr, S., and Fox, K. 1997. Collapse and recrystallization processes in zinc-exchanged zeolite-A: A combined X-ray diffraction, XAFS, and NMR study. The Journal of Physical Chemistry B 101: 10105-10114.
108. Pajares, J. and Tascón, J.M. (1995). Coal Science. Elsevier.
109. Bonnissel-Gissinger, P., Alnot, M., Ehrhardt, J.-J., and Behra, P. 1998. Surface oxidation of pyrite as a function of pH. Environmental Science & Technology 32: 2839-2845.
110. Xu, Z., et al. 2013. Visible light-degradation of azo dye methyl orange using  $\text{TiO}_2/\beta\text{-FeOOH}$  as a heterogeneous photo-Fenton-like catalyst. Water Science and Technology 68: 2178-2185.
111. Klimchouk, A. 1996. The dissolution and conversion of gypsum and anhydrite. International Journal of Speleology 25: 2.
112. Ohtani, B. 2013. Titania photocatalysis beyond recombination: A critical review. Catalysts 3: 942.
113. Kamwilaisak, K. and Wright, P.C. 2012. Investigating laccase and titanium dioxide for lignin degradation. Energy & Fuels 26: 2400-2406.
114. Portjanskaja, E., Preis, S., and Kallas, J. 2006. Aqueous photocatalytic oxidation of lignin and humic acids with supported  $\text{TiO}_2$ . International Journal of Photoenergy 2006: 1-7.
115. An, G., et al. 2007. Preparation of titania/carbon nanotube composites using supercritical ethanol and their photocatalytic activity for phenol degradation under visible light irradiation. Carbon 45: 1795-1801.
116. Sen, U.K. and Mitra, S. 2014. Synthesis of molybdenum oxides and their electrochemical properties against Li. Energy Procedia 54: 740-747.
117. Orbeci, C., Nechifor, G., and Untea, I. Photocatalytic membrane system: Obtaining procedure and environmental application. in Semiconductor Conference (CAS), 2012 International, 317-320. IEEE, 2012

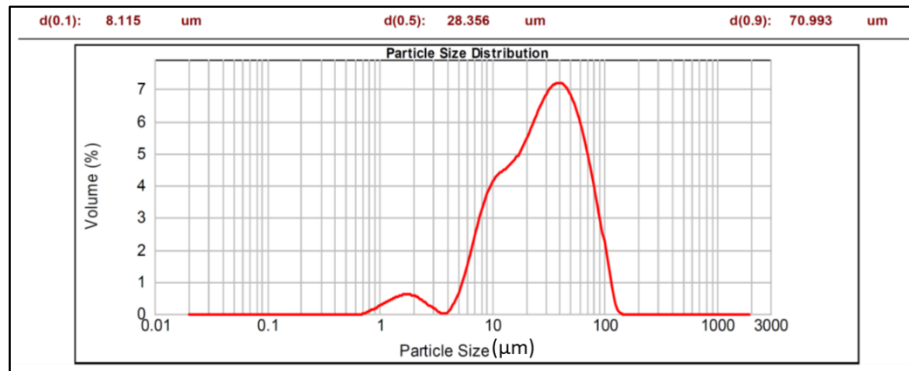


ภาคผนวก

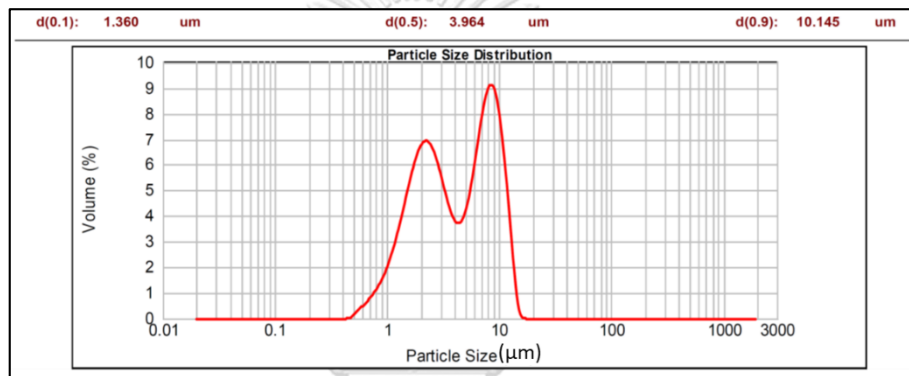
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



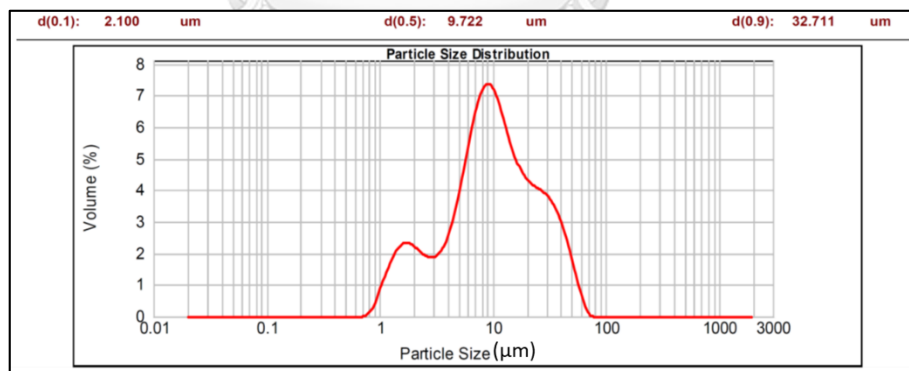
## ภาคผนวก ก



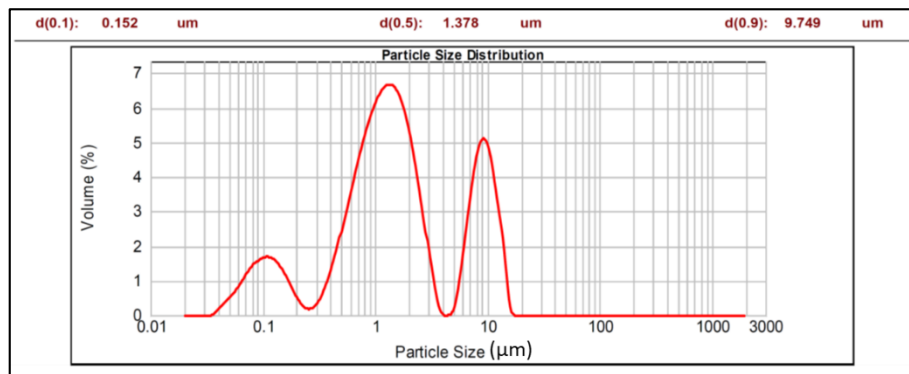
รูปที่ ก-1 การกระจายขนาดอนุภาคของถ่านกัมมันต์



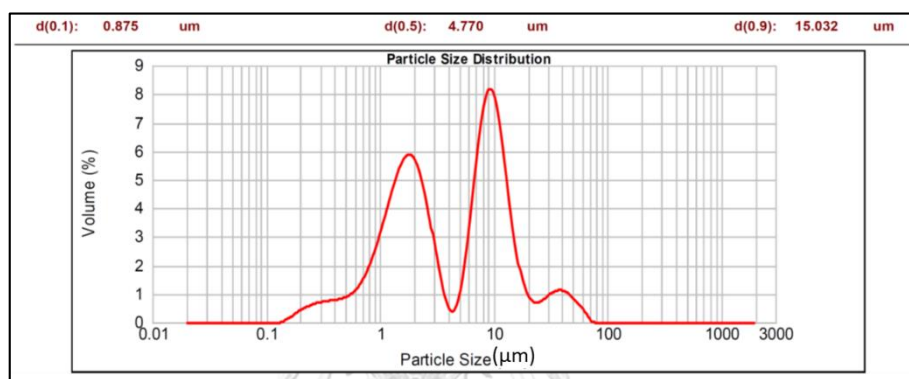
รูปที่ ก-2 การกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์โซเดียม เอ



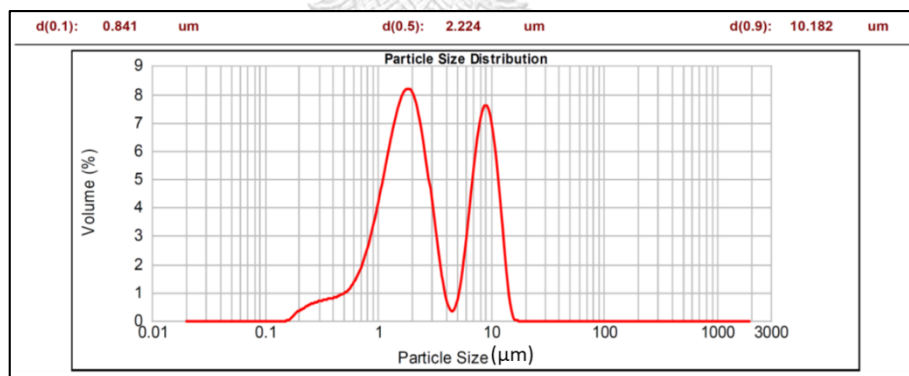
รูปที่ ก-3 การกระจายขนาดอนุภาคของดินดำสุราษฎร์ธานี



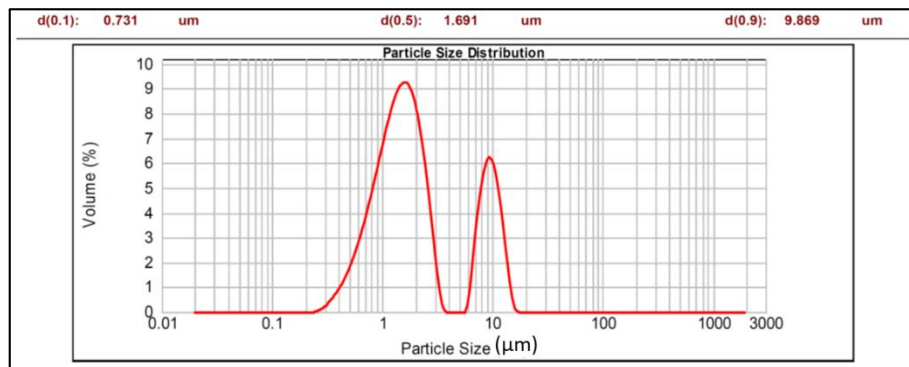
รูปที่ ก-4 การกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ P25



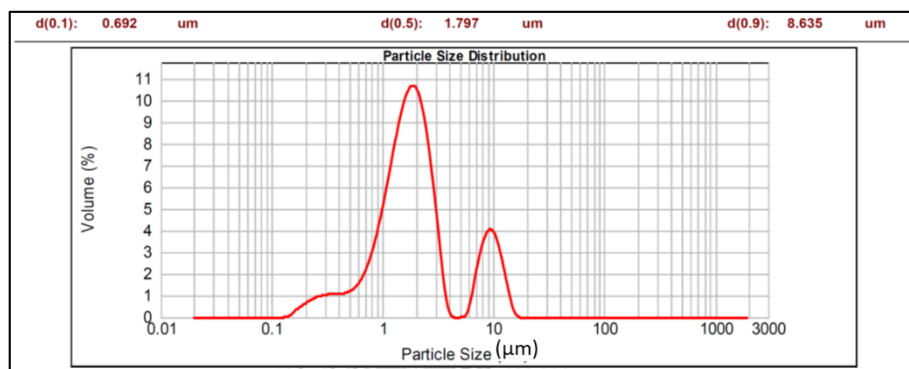
รูปที่ ก-5 การกระจายขนาดอนุภาคของไฟไรต์ก่อนบด



รูปที่ ก-6 การกระจายขนาดอนุภาคของไฟไรต์บด 6 ชั่วโมง



รูปที่ ก-7 การกระจายขนาดอนุภาคของไฟไรต์บด 12 ชั่วโมง



รูปที่ ก-8 การกระจายขนาดอนุภาคของไฟไรต์บด 24 ชั่วโมง

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของซีโอไลต์โซเดียม เอ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-089-8015

| Pattern : 01-089-8015  |  | Radiation = 1.540600              |     |    |    |    | Quality : Calculated |    |    |    |    |
|--|--|-----------------------------------|-----|----|----|----|----------------------|----|----|----|----|
| Na <sub>94.75</sub> (Al <sub>96</sub> Si <sub>96</sub> O <sub>384</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>39.17</sub> |  | 2th                               | i   | h  | k  | l  | 2th                  | i  | h  | k  | l  |
| Sodium Aluminum Silicate Hydrate<br>Zeolite LTA, syn   |  | 7.195                             | 999 | 2  | 0  | 0  | 66.324               | 1  | 12 | 12 | 4  |
|  |  | 10.182                            | 664 | 2  | 2  | 0  | 66.816               | 18 |    |    | 4  |
|  |  | 12.478                            | 194 | 2  | 2  | 2  | 67.306               | 1  | 14 | 10 | 4  |
|  |  | 14.418                            | 2   | 4  | 0  | 0  | 67.672               | 1  |    |    | 1  |
|  |  | 16.131                            | 279 | 4  | 2  | 0  | 68.281               | 1  |    |    | 0  |
|  |  | 17.682                            | 10  | 4  | 2  | 2  | 68.766               | 6  |    |    | 2  |
|  |  | 20.445                            | 17  | 4  | 4  | 0  | 69.249               | 23 |    |    | 0  |
|  |  | 21.393                            | 13  | 5  | 3  | 1  | 69.730               | 1  |    |    | 2  |
|  |  | 21.700                            | 111 | 4  | 4  | 2  | 70.210               | 2  |    |    | 4  |
|  |  | 22.889                            | 2   | 6  | 2  | 0  | 70.689               | 2  |    |    | 0  |
|  |  | 24.023                            | 178 | 6  | 2  | 2  | 71.167               | 10 | 14 | 12 | 2  |
|  |  | 25.108                            | 3   | 4  | 4  | 4  | 71.524               | 1  | 15 | 11 | 1  |
|  |  | 26.151                            | 10  | 6  | 4  | 0  | 72.117               | 1  | 12 | 12 | 8  |
|  |  | 27.157                            | 90  | 6  | 4  | 2  | 72.591               | 4  |    |    | 4  |
|  |  | 27.889                            | 2   | 7  | 3  | 1  | 73.063               | 12 | 14 | 10 | 8  |
|  |  | 29.072                            | 2   | 8  | 0  | 0  | 73.534               | 1  |    |    | 2  |
|  |  | 29.987                            | 125 | 8  | 2  | 0  | 74.355               | 1  |    |    | 1  |
|  |  | 30.878                            | 26  | 8  | 2  | 2  | 74.473               | 1  |    | 10 | 4  |
|  |  | 31.531                            | 1   | 7  | 5  | 1  | 74.941               | 1  |    |    | 4  |
|  |  | 31.746                            | 2   | 6  | 6  | 2  | 75.291               | 1  |    |    | 3  |
|  |  | 32.593                            | 18  | 8  | 4  | 0  | 75.873               | 4  |    |    | 8  |
|  |  | 33.216                            | 1   | 7  | 5  | 3  | 76.338               | 5  |    |    | 0  |
|  |  | 33.421                            | 13  | 8  | 4  | 2  | 76.802               | 2  |    |    | 2  |
|  |  | 34.232                            | 95  | 6  | 6  | 4  | 77.265               | 4  | 14 | 10 | 10 |
|  |  | 35.804                            | 9   | 8  | 4  | 4  | 77.727               | 5  |    |    | 0  |
|  |  | 36.569                            | 30  | 10 | 0  | 0  | 78.188               | 10 |    |    | 2  |
|  |  | 37.319                            | 1   | 8  | 6  | 2  | 78.649               | 2  |    |    | 2  |
|  |  | 38.057                            | 15  | 6  | 6  | 6  | 79.567               | 1  |    |    | 0  |
|  |  | 39.498                            | 7   | 8  | 6  | 4  | 79.911               | 1  |    |    | 3  |
|  |  | 40.202                            | 5   | 10 | 4  | 2  | 80.026               | 1  |    |    | 2  |
|  |  | 41.580                            | 15  | 8  | 8  | 0  | 80.483               | 2  |    |    | 10 |
|  |  | 42.088                            | 2   | 11 | 3  | 1  | 80.941               | 4  |    |    | 2  |
|  |  | 42.256                            | 18  | 10 | 4  | 4  | 81.853               | 1  |    |    | 12 |
|  |  | 42.922                            | 16  | 8  | 6  | 6  | 82.309               | 4  |    |    | 6  |
|  |  | 43.417                            | 3   | 9  | 7  | 3  | 82.650               | 2  |    |    | 9  |
|  |  | 43.581                            | 11  | 10 | 6  | 2  | 83.672               | 3  |    |    | 8  |
|  |  | 44.231                            | 26  | 12 | 0  | 0  | 84.126               | 2  | 14 | 14 | 8  |
|  |  | 44.714                            | 1   | 11 | 5  | 1  | 84.466               | 1  |    |    | 11 |
|  |  | 44.874                            | 2   | 12 | 2  | 0  | 84.580               | 2  |    |    | 10 |
|  |  | 45.510                            | 1   | 12 | 2  | 2  | 85.032               | 1  |    |    | 12 |
|  |  | 45.983                            | 1   | 9  | 7  | 5  | 85.486               | 1  |    |    | 14 |
|  |  | 46.762                            | 2   | 12 | 4  | 0  | 85.938               | 1  |    |    | 12 |
|  |  | 47.378                            | 19  | 12 | 4  | 2  | 86.277               | 1  |    |    | 5  |
|  |  | 47.988                            | 15  | 10 | 8  | 2  | 86.841               | 1  |    |    | 8  |
|  |  | 48.442                            | 1   | 11 | 7  | 1  | 87.293               | 4  |    |    | 0  |
|  |  | 48.593                            | 1   | 10 | 6  | 6  | 87.745               | 1  |    | 14 | 6  |
|  |  | 49.191                            | 1   | 12 | 4  | 4  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 49.637                            | 1   | 13 | 3  | 1  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 49.785                            | 5   | 12 | 6  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 50.373                            | 1   | 12 | 6  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 51.535                            | 1   | 8  | 8  | 8  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 51.966                            | 1   | 13 | 5  | 1  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 52.109                            | 2   | 14 | 0  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 52.678                            | 48  | 10 | 10 | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 53.103                            | 2   | 11 | 9  | 1  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 53.244                            | 7   | 14 | 2  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 53.805                            | 1   | 12 | 8  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 54.362                            | 15  | 12 | 8  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 54.915                            | 4   | 14 | 4  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 55.328                            | 1   | 13 | 7  | 1  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 56.010                            | 5   | 12 | 8  | 4  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 56.553                            | 11  | 14 | 4  | 4  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 57.092                            | 3   | 14 | 6  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 57.628                            | 18  | 14 | 6  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 58.690                            | 12  | 12 | 10 | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 59.216                            | 1   | 14 | 6  | 4  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 59.609                            | 1   | 15 | 5  | 1  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 60.281                            | 3   |    | 0  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 60.650                            | 2   | 15 | 5  | 3  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 60.779                            | 2   | 14 | 8  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 61.295                            | 4   |    | 2  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 61.808                            | 1   | 14 | 6  | 6  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 62.319                            | 2   |    | 4  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 62.827                            | 7   |    | 4  | 2  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 63.333                            | 4   | 12 | 10 | 6  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 63.711                            | 1   | 15 | 7  | 3  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 64.338                            | 5   |    | 4  | 4  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 64.838                            | 2   |    | 6  | 0  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 65.335                            | 10  | 14 | 8  | 6  |                      |    |    |    |    |
|  |  | 65.831                            | 9   | 10 | 10 | 10 |                      |    |    |    |    |
| <b>Radiation</b> : CuKα1   |  | <b>Filter</b> : Not specified     |     |    |    |    |                      |    |    |    |    |
| <b>Lambda</b> : 1.54060  |  | <b>d-sp</b> : Calculated spacings |     |    |    |    |                      |    |    |    |    |
| <b>SS/FOM</b> : F30=1000(0.0000,33)  |  |                                   |     |    |    |    |                      |    |    |    |    |

ตารางที่ ข-2 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไทเทเนียมไดออกไซด์ อะนาเทส จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-021-1272

| Pattern : 00-021-1272   |  | Radiation = 1.540598          |          | Quality : High |          |          |
|---|--|-------------------------------|----------|----------------|----------|----------|
| TiO <sub>2</sub>  |  | <b>2th</b>                    | <b>i</b> | <b>h</b>       | <b>k</b> | <b>l</b> |
| Titanium Oxide<br>Anatase, syn  |  | 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        |
|   |  | 93.220                        | 2        | 2              | 1        | 7        |
|   |  | 94.181                        | 4        | 3              | 0        | 5        |
|   |  | 95.143                        | 4        | 3              | 2        | 1        |
|   |  | 98.318                        | 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        |
|   |  | 112.840                       | 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        |
|   |  | 131.035                       | 2        | 4              | 2        | 0        |
|   |  | 135.998                       | 2        | 3              | 2        | 7        |
|   |  | 137.391                       | 4        | 4              | 1        | 5        |
|   |  | 143.887                       | 2        | 3              | 0        | 9        |
|   |  | 150.039                       | 4        | 4              | 2        | 4        |
|   |  | 152.633                       | 2        | 0              | 0        | 12       |
| <b>Lattice</b> : Body-centered tetragonal   |  | <b>Mol. weight</b> = 79.90    |          |                |          |          |
| <b>S.G.</b> : I41/amd (141)   |  | <b>Volume [CD]</b> = 136.31   |          |                |          |          |
| <b>a</b> = 3.78520  |  | <b>Dx</b> = 3.893             |          |                |          |          |
| <b>c</b> = 9.51390  |  | <b>I/cor</b> = 3.30           |          |                |          |          |
| <b>Z</b> = 4  |  |                               |          |                |          |          |
| <p><b>Color:</b> Colorless<br/> <b>Sample source or locality:</b> Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA.<br/> <b>General comments:</b> Anatase and another polymorph, brookite (orthorhombic), are converted to rutile (tetragonal) by heating above 700 C.<br/> <b>General comments:</b> Pattern reviewed by Holzer, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, North Dakota, USA, <i>ICDD Grant-in-Aid</i> (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns.<br/> <b>Additional pattern:</b> Validated by calculated pattern.<br/> <b>Temperature of data collection:</b> Pattern taken at 25 C.<br/> <b>Additional pattern:</b> See ICSD 9852 (PDF 71-1166).<br/> <b>Data collection flag:</b> Ambient.</p> |  |                               |          |                |          |          |
| Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 82 (1969)   |  |                               |          |                |          |          |
| <b>Radiation</b> :  |  | <b>Filter</b> : Not specified |          |                |          |          |
| <b>SS/FOM</b> : F30= 74(0.0116,35)  |  | <b>d-sp</b> : Not given       |          |                |          |          |

ตารางที่ ข-3 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไทเทเนียมไดออกไซด์ รูไทล์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-021-1276

| Pattern : 00-021-1276   |  | Radiation = 1.540600           |          | Quality : High |          |          |
|---|--|--------------------------------|----------|----------------|----------|----------|
| TiO <sub>2</sub>  |  | <b>2th</b>                     | <b>i</b> | <b>h</b>       | <b>k</b> | <b>l</b> |
|   |  | 27.447                         | 100      | 1              | 1        | 0        |
|   |  | 36.086                         | 50       | 1              | 0        | 1        |
|   |  | 39.188                         | 8        | 2              | 0        | 0        |
| Titanium Oxide  |  | 41.226                         | 25       | 1              | 1        | 1        |
| Rutile, syn   |  | 44.052                         | 10       | 2              | 1        | 0        |
| <i>Also called:</i> titania   |  | 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        |
| Lattice : Tetragonal  |  | 74.411                         | 1        | 3              | 2        | 0        |
| Mol. weight = 79.90   |  | 76.510                         | 4        | 2              | 0        | 2        |
| S.G. : P42/mmm (136)  |  | 79.822                         | 2        | 2              | 1        | 2        |
| Volume [CD] = 62.43   |  | 82.335                         | 6        | 3              | 2        | 1        |
| a = 4.59330   |  | 84.260                         | 4        | 4              | 0        | 0        |
| Dx = 4.250  |  | 87.464                         | 2        | 4              | 1        | 0        |
| Dm = 4.230  |  | 89.557                         | 8        | 2              | 2        | 2        |
| c = 2.95920   |  | 90.708                         | 4        | 3              | 3        | 0        |
| Z = 2   |  | 95.275                         | 6        | 4              | 1        | 1        |
| I/cor = 3.40  |  | 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        |
| <p><b>General comments:</b> No impurity over 0.001%.</p> <p><b>Sample source or locality:</b> Sample obtained from National Lead Co., South Amboy, New Jersey, USA.</p> <p><b>General comments:</b> Two other polymorphs, anatase (tetragonal) and brookite (orthorhombic), converted to rutile on heating above 700 C.</p> <p><b>Optical data:</b> A=2.9467, B=2.6505, Sign=+</p> <p><b>General comments:</b> Optical data on specimen from <i>Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.</i>, 1555.</p> <p><b>Reflectance:</b> Opaque mineral optical data on specimen from Sweden: R<sub>3R</sub>%=20.3, Disp.=Std.</p> <p><b>Vickers hardness number:</b> VHN<sub>100</sub>=1132-1187.</p> <p><b>General comments:</b> Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State Univ. Fargo, North Dakota, USA, <i>ICDD Grant-in-Aid</i> (1990). Agrees well with experimental and calculated patterns.</p> <p><b>General comments:</b> Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.</p> <p><b>Additional pattern:</b> Validated by calculated pattern.</p> <p><b>General comments:</b> Naturally occurring material may be reddish brown.</p> <p><b>Color:</b> White</p> <p><b>Temperature of data collection:</b> Pattern taken at 25 C.</p> <p><b>Data collection flag:</b> Ambient.</p> |  |                                |          |                |          |          |
| Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 7, page 83 (1969)   |  |                                |          |                |          |          |
| Radiation : CuKα1   |  | Filter : Monochromator crystal |          |                |          |          |
| Lambda : 1.54056  |  | d-sp : Not given               |          |                |          |          |
| SS/FOM : F30=107(0.0088,32)   |  | Internal standard : W          |          |                |          |          |

ตารางที่ ข-4 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไพไรต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-042-1340

| Pattern : 00-042-1340   |  | Radiation = 1.540600                  |          | Quality : High |          |          |
|---|--|---------------------------------------|----------|----------------|----------|----------|
| FeS <sub>2</sub>  |  | <b>2th</b>                            | <b>i</b> | <b>h</b>       | <b>k</b> | <b>l</b> |
| Iron Sulfide  |  | 28.513                                | 31       | 1              | 1        | 1        |
| Pyrite  |  | 33.084                                | 100      | 2              | 0        | 0        |
| <b>Also called:</b> fool's gold   |  | 37.107                                | 53       | 2              | 1        | 0        |
|   |  | 40.784                                | 40       | 2              | 1        | 1        |
|   |  | 47.411                                | 36       | 2              | 2        | 0        |
|   |  | 50.491                                | 1        | 2              | 2        | 1        |
|   |  | 56.279                                | 69       | 3              | 1        | 1        |
|   |  | 59.017                                | 11       | 2              | 2        | 2        |
|   |  | 61.694                                | 13       | 0              | 2        | 3        |
|   |  | 64.283                                | 16       | 3              | 2        | 1        |
|   |  | 71.773                                | 1        | 4              | 1        | 0        |
|   |  | 74.200                                | 1        | 4              | 1        | 1        |
|   |  | 76.597                                | 6        | 3              | 3        | 1        |
|   |  | 78.960                                | 7        | 4              | 2        | 0        |
|   |  | 81.317                                | 7        | 1              | 2        | 4        |
|   |  | 83.640                                | 3        | 3              | 3        | 2        |
|   |  | 88.292                                | 7        | 4              | 2        | 2        |
|   |  | 90.633                                | 1        | 4              | 3        | 0        |
|   |  | 92.932                                | 1        | 4              | 3        | 1        |
|   |  | 95.249                                | 20       | 3              | 3        | 3        |
|   |  | 99.918                                | 7        | 2              | 3        | 4        |
|   |  | 102.288                               | 4        | 1              | 2        | 5        |
|   |  | 107.090                               | 12       | 4              | 4        | 0        |
|   |  | 109.509                               | 1        | 4              | 4        | 1        |
|   |  | 114.516                               | 2        | 5              | 3        | 1        |
|   |  | 117.085                               | 6        | 4              | 4        | 2        |
|   |  | 119.721                               | 2        | 6              | 1        | 0        |
| <b>Lattice :</b> Cubic  |  | <b>Mol. weight =</b> 119.97           |          |                |          |          |
| <b>S.G. :</b> Pa-3 (205)  |  | <b>Volume [CD] =</b> 159.04           |          |                |          |          |
| <b>a =</b> 5.41790  |  | <b>Dx =</b> 5.010                     |          |                |          |          |
| <b>Z =</b> 4  |  | <b>I/cor =</b> 1.60                   |          |                |          |          |
| <p><b>Color:</b> Yellow metallic<br/> <b>Sample source or locality:</b> Specimen from Itaya mine, Yamagata Prefecture, Japan.<br/> <b>Analysis:</b> Microprobe analysis (wt.%): Fe 46.8, S 53.5: Fe S<sub>2</sub>.<br/> <b>General comments:</b> (*)Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, Alberta, Canada.<br/> <b>Additional pattern:</b> Validated by calculated pattern 24-76.<br/> <b>Additional pattern:</b> To replace 6-710.<br/> <b>Data collection flag:</b> Ambient.</p> |  |                                       |          |                |          |          |
| <p>Nodland, D., Syvinski, W., McCarthy, G., *Bayliss, P., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA., ICDD Grant-in-Aid (1989)<br/> CAS Number: 1309-36-0</p>  |  |                                       |          |                |          |          |
| <b>Radiation :</b> CuKα1  |  | <b>Filter :</b> Monochromator crystal |          |                |          |          |
| <b>Lambda :</b> 1.54060   |  | <b>d-sp :</b> Diffractometer          |          |                |          |          |
| <b>SS/FOM :</b> F27= 98(0.0095,29)  |  | <b>Internal standard :</b> Si         |          |                |          |          |

ตารางที่ ข-5 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของโซโมไลน์ไกต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-081-0019

| Pattern : 01-081-0019  |  | Radiation = 1.540600  |   |  |   |   | Quality : Calculated |    |    |   |   |
|--|--|---|---|--|---|---|----------------------|----|----|---|---|
| Fe(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O)   |  | 2th   | i   | h  | k | l | 2th                  | i  | h  | k | l |
| Iron Sulfate Hydrate<br>Szomolnokite, syn  |  | 18.237  | 424   | -1   | 1 | 1 | *74.554              | 19 | 1  | 3 | 4 |
|  |  | 18.483  | 398   | 1  | 1 | 0 | 74.829               | 20 | -3 | 5 | 2 |
|  |  | 23.551  | 90  | 0  | 2 | 0 | 75.132               | 20 | -3 | 5 | 1 |
|  |  | 25.827  | 999   | -1   | 1 | 2 | *75.132              | 20 | -4 | 4 | 1 |
|  |  | 26.356  | 242   | 1  | 1 | 1 | 75.284               | 29 | 2  | 0 | 4 |
|  |  | 26.976  | 340   | 0  | 2 | 1 | 75.503               | 20 | 0  | 6 | 0 |
|  |  | 28.069  | 7   | -2   | 0 | 2 | 75.875               | 6  | -5 | 1 | 5 |
|  |  | 28.722  | 498   | 2  | 0 | 0 | 76.450               | 1  | -4 | 0 | 6 |
|  |  | 34.727  | 168   | -2   | 2 | 1 | 76.639               | 6  | 3  | 1 | 3 |
|  |  | 35.444  | 405   | 0  | 2 | 2 | 77.007               | 2  | 0  | 6 | 1 |
|  |  | 36.957  | 30  | -1   | 1 | 3 | 77.471               | 1  | -5 | 3 | 3 |
|  |  | *36.957   | 30  | -2   | 2 | 2 | 77.600               | 1  | -3 | 5 | 3 |
|  |  | 37.563  | 48  | 1  | 1 | 2 | 77.866               | 3  | 5  | 1 | 0 |
|  |  | 38.572  | 108   | 1  | 3 | 0 | *77.866              | 3  | -5 | 3 | 2 |
|  |  | 40.406  | 182   | -3   | 1 | 2 | 78.313               | 7  | 3  | 5 | 0 |
|  |  | 40.763  | 9   | -3   | 1 | 1 | 78.592               | 18 | -2 | 2 | 6 |
|  |  | 42.818  | 70  | -1   | 3 | 2 | 78.965               | 10 | -1 | 1 | 6 |
|  |  | 43.159  | 35  | 1  | 3 | 1 | *78.965              | 10 | 4  | 0 | 2 |
|  |  | 43.508  | 101   | -2   | 2 | 3 | 79.936               | 7  | -2 | 4 | 5 |
|  |  | 44.402  | 15  | -3   | 1 | 3 | *79.936              | 7  | 4  | 4 | 0 |
|  |  | *44.402   | 15  | 2  | 2 | 1 | 80.055               | 13 | -5 | 3 | 4 |
|  |  | 45.384  | 118   | 3  | 1 | 0 | 80.169               | 10 | 2  | 2 | 4 |
|  |  | 46.594  | 19  | 0  | 2 | 3 | 81.054               | 1  | -2 | 6 | 1 |
|  |  | 46.862  | 52  | -2   | 0 | 4 | 81.315               | 14 | -4 | 2 | 6 |
|  |  | 48.179  | 29  | 2  | 0 | 2 | 81.489               | 9  | -1 | 5 | 4 |
|  |  | *48.179   | 29  | 0  | 4 | 0 | 82.038               | 2  | 1  | 5 | 3 |
|  |  | 49.625  | 63  | -1   | 1 | 4 | 82.577               | 13 | -6 | 0 | 4 |
|  |  | 50.335  | 7   | 1  | 1 | 3 | 82.687               | 16 | 2  | 6 | 0 |
|  |  | 50.739  | 5   | -1   | 3 | 3 | 83.293               | 3  | -3 | 5 | 4 |
|  |  | 51.238  | 10  | 1  | 3 | 2 | 83.514               | 2  | -6 | 0 | 2 |
|  |  | 51.632  | 21  | -4   | 0 | 2 | 83.818               | 6  | 4  | 2 | 2 |
|  |  | 51.934  | 7   | -3   | 1 | 4 | 84.201               | 2  | -3 | 3 | 6 |
|  |  | 53.097  | 46  | -2   | 2 | 4 | 84.388               | 12 | -5 | 1 | 6 |
|  |  | 53.397  | 10  | 3  | 1 | 1 | 85.305               | 1  | 0  | 0 | 6 |
|  |  | 53.496  | 16  | -3   | 3 | 2 | 85.558               | 1  | -5 | 3 | 5 |
|  |  | 53.706  | 21  | 0  | 0 | 4 | 85.744               | 1  | -4 | 4 | 5 |
|  |  | 54.252  | 133   | 2  | 2 | 2 | 86.371               | 2  | 3  | 3 | 3 |
|  |  | 55.111  | 6   | -2   | 4 | 1 | *86.371              | 2  | -6 | 2 | 3 |
|  |  | 55.612  | 69  | 0  | 4 | 2 | 86.623               | 1  | -2 | 6 | 3 |
|  |  | 56.689  | 88  | -2   | 4 | 2 | 87.245               | 6  | 2  | 6 | 1 |
|  |  | 57.059  | 8   | 2  | 4 | 0 | 87.500               | 13 | 5  | 3 | 0 |
|  |  | 57.493  | 44  | -4   | 2 | 2 | 88.301               | 11 | -6 | 2 | 2 |
|  |  | 57.605  | 92  | 3  | 3 | 0 | *88.301              | 11 | 0  | 4 | 5 |
|  |  | 58.027  | 66  | -4   | 0 | 4 | 88.578               | 6  | -1 | 3 | 6 |
|  |  | 58.848  | 19  | -4   | 2 | 3 | 88.809               | 3  | 0  | 6 | 3 |
|  |  | 59.479  | 26  | 0  | 2 | 4 | 89.046               | 3  | -3 | 1 | 7 |
|  |  | *59.479   | 26  | 4  | 0 | 0 | 89.432               | 2  | 1  | 3 | 5 |
|  |  | 59.570  | 21  | -4   | 2 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 61.237  | 59  | -1   | 3 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 61.616  | 5   | -2   | 4 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 61.855  | 3   | 1  | 3 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 62.121  | 3   | -3   | 1 | 5 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 62.318  | 11  | 2  | 4 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 63.258  | 28  | -1   | 5 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | *63.258   | 28  | -3   | 3 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 63.344  | 26  | 1  | 5 | 0 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 63.499  | 31  | -4   | 2 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 63.948  | 31  | 3  | 1 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 64.070  | 22  | 0  | 4 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 64.347  | 11  | 1  | 1 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 64.553  | 7   | 3  | 3 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 64.877  | 20  | -2   | 2 | 5 |                      |    |    |   |   |
|  |  | *64.877   | 20  | 4  | 2 | 0 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 66.235  | 9   | 2  | 2 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 66.401  | 24  | -1   | 5 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 66.655  | 11  | 1  | 5 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 67.447  | 1   | -5   | 1 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 67.866  | 9   | -5   | 1 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 69.478  | 1   | -2   | 4 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 70.166  | 8   | -5   | 1 | 4 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 70.469  | 23  | 2  | 4 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 71.088  | 9   | -4   | 2 | 5 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 72.562  | 5   | -1   | 5 | 3 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 73.045  | 12  | 4  | 2 | 1 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 73.291  | 49  | -4   | 4 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 73.674  | 4   | -2   | 0 | 6 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 73.794  | 8   | 0  | 2 | 5 |                      |    |    |   |   |
|  |  | *73.794   | 8   | -1   | 3 | 5 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 74.182  | 6   | 3  | 3 | 2 |                      |    |    |   |   |
|  |  | 74.554  | 19  | -4   | 4 | 3 |                      |    |    |   |   |
| <b>Lattice</b> : Base-centered monoclinic<br><b>S.G.</b> : C2/c (15)<br><b>a</b> = 7.07800<br><b>b</b> = 7.54900 <b>beta</b> = 118.65<br><b>c</b> = 7.77300<br><b>a/b</b> = 0.93761 <b>Z</b> = 4<br><b>c/b</b> = 1.02967 |  | <b>Mol. weight</b> = 169.92<br><b>Volume [CD]</b> = 364.48<br><b>Dx</b> = 3.097<br><b>Dm</b> = 3.100<br><b>I/lor</b> = 1.89 | <b>Radiation</b> : CuKα1<br><b>Lambda</b> : 1.54060<br><b>SS/FOM</b> : F30=268(0.0030,37) | <b>Filter</b> : Not specified<br><b>d-sp</b> : Calculated spacings |   |   |                      |    |    |   |   |



ตารางที่ ข-6 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-089-9069

| Pattern : 01-089-9069   |  | Radiation = 1.540598              |          | Quality : Calculated |          |          |
|---|--|-----------------------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| ZrO <sub>2</sub>  |  | <b>2th</b>                        | <b>i</b> | <b>h</b>             | <b>k</b> | <b>l</b> |
| Zirconium Oxide<br>Zirconia (Y-doped), syn  |  | 30.119                            | 999      | 1                    | 1        | 1        |
|   |  | 34.917                            | 200      | 2                    | 0        | 0        |
|   |  | 50.211                            | 495      | 2                    | 2        | 0        |
|   |  | 59.673                            | 315      | 3                    | 1        | 1        |
|   |  | 62.617                            | 48       | 2                    | 2        | 2        |
|   |  | 73.745                            | 55       | 4                    | 0        | 0        |
|   |  | 81.669                            | 102      | 3                    | 3        | 1        |
|   |  | 84.268                            | 57       | 4                    | 2        | 0        |
| <b>Lattice</b> : Face-centered cubic  |  | <b>Mol. weight</b> = 123.22       |          |                      |          |          |
| <b>S.G.</b> : Fm-3m (225)   |  | <b>Volume [CD]</b> = 135.40       |          |                      |          |          |
| <b>a</b> = 5.13500  |  | <b>Dx</b> = 6.045                 |          |                      |          |          |
| <b>Z</b> = 4  |  | <b>I/cor</b> = 9.99               |          |                      |          |          |
| <p><b>ICSD collection code:</b> 089429<br/> <b>Remarks from ICSD/CSD:</b> REM RVP.<br/> <b>Temperature factor:</b> ITF<br/> <b>Data collection flag:</b> Ambient.</p>           |  |                                   |          |                      |          |          |
| <p>Wang, D.-N., Guo, Y.-Q., Liang, K.-M., Tao, K., Sci. China, Ser. A: Math., Phys., Astron., volume 42, page 80 (1999)<br/>           Calculated from ICSD using POWD-12++</p> |  |                                   |          |                      |          |          |
| <b>Radiation</b> : CuKα1  |  | <b>Filter</b> : Not specified     |          |                      |          |          |
| <b>Lambda</b> : 1.54060   |  | <b>d-sp</b> : Calculated spacings |          |                      |          |          |
| <b>SS/FOM</b> : F8=1000(0.0000,8)   |  |                                   |          |                      |          |          |

ตารางที่ ข-7 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของยิปซั่ม จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-070-0983

| Pattern : 01-070-0983                               |  | Radiation = 1.540600       |     |    |    |   | Quality : Alternate |    |    |    |   |
|---|--|----------------------------|-----|----|----|---|---------------------|----|----|----|---|
| Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> |  | 2th                        | i   | h  | k  | l | 2th                 | i  | h  | k  | l |
| Calcium Sulfate Hydrate<br>Gypsum                   |  | 11.634                     | 889 | 0  | 2  | 0 | 72.943              | 2  | -4 | 0  | 4 |
|   |  | 16.505                     | 1   | 0  | 1  | 1 | 73.591              | 1  | -1 | 7  | 4 |
|   |  | 18.741                     | 19  | 1  | 1  | 0 | 74.110              | 16 | -3 | 6  | 3 |
|   |  | 20.725                     | 999 | -1 | 2  | 1 | *74.110             | 16 | -4 | 2  | 4 |
|   |  | 23.389                     | 126 | 0  | 4  | 0 | 74.574              | 2  | -1 | 11 | 2 |
|   |  | *23.389                    | 126 | 0  | 3  | 1 | 74.903              | 5  | 0  | 12 | 0 |
|   |  | 25.056                     | 1   | 1  | 3  | 0 | *74.903             | 5  | 0  | 9  | 3 |
|   |  | 28.082                     | 39  | -1 | 1  | 2 | 75.033              | 3  | -2 | 3  | 5 |
|   |  | 29.113                     | 638 | -1 | 4  | 1 | *75.033             | 3  | -4 | 5  | 3 |
|   |  | 31.182                     | 447 | 0  | 0  | 2 | 75.903              | 9  | -3 | 2  | 5 |
|   |  | *31.182                    | 447 | 1  | 2  | 1 | 76.116              | 7  | 2  | 1  | 3 |
|   |  | 32.132                     | 85  | -2 | 1  | 1 | 76.232              | 14 | 0  | 6  | 4 |
|   |  | 32.734                     | 10  | -1 | 3  | 2 | 76.510              | 24 | 4  | 0  | 0 |
|   |  | 33.366                     | 305 | 0  | 5  | 1 | *76.510             | 24 | -1 | 10 | 3 |
|   |  | *33.366                    | 305 | 0  | 2  | 2 | 76.776              | 29 | -1 | 2  | 5 |
|   |  | 34.541                     | 46  | 1  | 5  | 0 | *76.776             | 29 | 3  | 6  | 1 |
|   |  | *34.541                    | 46  | -2 | 0  | 2 | 77.117              | 10 | -4 | 6  | 2 |
|   |  | 35.402                     | 8   | 0  | 6  | 0 | 77.235              | 12 | -2 | 8  | 4 |
|   |  | 36.055                     | 92  | 2  | 0  | 0 | 77.509              | 8  | -3 | 7  | 4 |
|   |  | 36.318                     | 14  | -2 | 3  | 1 | *77.509             | 8  | -1 | 12 | 1 |
|   |  | 36.603                     | 60  | -2 | 2  | 2 | 77.886              | 14 | 4  | 2  | 0 |
|   |  | 37.431                     | 37  | 1  | 4  | 1 | 78.529              | 1  | 2  | 3  | 3 |
|   |  | 38.009                     | 3   | 2  | 2  | 0 | 79.518              | 14 | -3 | 4  | 5 |
|   |  | 39.327                     | 3   | 0  | 4  | 2 | *79.518             | 14 | 3  | 1  | 2 |
|   |  | 40.622                     | 106 | -1 | 5  | 2 | 79.664              | 18 | 1  | 8  | 3 |
|   |  | 42.170                     | 16  | -2 | 4  | 2 | 79.844              | 21 | 2  | 8  | 2 |
|   |  | 43.424                     | 163 | -1 | 2  | 3 | *79.844             | 21 | -2 | 5  | 5 |
|   |  | *43.424                    | 163 | 2  | 4  | 0 | 80.235              | 3  | 1  | 3  | 4 |
|   |  | 43.650                     | 89  | -2 | 5  | 1 | 80.379              | 8  | -1 | 4  | 5 |
|   |  | *43.650                    | 89  | 1  | 1  | 2 | 81.278              | 1  | 4  | 4  | 0 |
|   |  | 44.158                     | 41  | -2 | 1  | 3 | 82.025              | 8  | 3  | 3  | 2 |
|   |  | 44.579                     | 8   | 0  | 7  | 1 | *82.025             | 8  | -3 | 10 | 1 |
|   |  | 45.536                     | 23  | 1  | 7  | 0 | 82.241              | 4  | -4 | 7  | 3 |
|   |  | 46.262                     | 4   | 1  | 6  | 1 | 82.952              | 1  | -4 | 1  | 5 |
|   |  | 46.554                     | 22  | 2  | 1  | 1 | 83.329              | 10 | 2  | 5  | 3 |
|   |  | 46.997                     | 2   | 1  | 3  | 2 | *83.329             | 10 | 0  | 12 | 2 |
|   |  | 47.442                     | 7   | -2 | 3  | 3 | 83.775              | 15 | -4 | 6  | 4 |
|   |  | 47.869                     | 117 | 0  | 6  | 2 | 83.958              | 8  | -4 | 7  | 1 |
|   |  | *47.869                    | 117 | 0  | 1  | 3 | 84.596              | 7  | 0  | 8  | 4 |
|   |  | 48.343                     | 101 | -1 | 4  | 3 | *84.596             | 7  | 0  | 1  | 5 |
|   |  | 48.827                     | 23  | -2 | 1  | 2 | 84.899              | 30 | -3 | 10 | 3 |
|   |  | 49.715                     | 3   | -2 | 3  | 1 | 85.194              | 24 | 1  | 13 | 0 |
|   |  | 50.324                     | 96  | -2 | 6  | 2 | *85.194             | 24 | -2 | 12 | 2 |
|   |  | 50.524                     | 53  | -1 | 7  | 2 | 85.459              | 13 | -3 | 6  | 5 |
|   |  | 50.819                     | 49  | -3 | 2  | 1 | *85.459             | 13 | -4 | 8  | 2 |
|   |  | 51.013                     | 30  | 0  | 3  | 3 | 85.907              | 2  | 2  | 11 | 0 |
|   |  | 51.160                     | 25  | -1 | 8  | 1 | 86.049              | 5  | 2  | 12 | 0 |
|   |  | 51.423                     | 82  | 2  | 6  | 0 | 86.307              | 3  | -1 | 6  | 5 |
|   |  | 51.884                     | 3   | -3 | 3  | 2 | 86.696              | 1  | 3  | 2  | 5 |
|   |  | 53.140                     | 1   | -2 | 7  | 1 | *86.696             | 1  | -3 | 5  | 2 |
|   |  | *53.140                    | 1   | 1  | 5  | 2 | 86.875              | 5  | -3 | 9  | 4 |
|   |  | 53.547                     | 8   | -2 | 5  | 3 | 87.195              | 9  | 4  | 6  | 0 |
|   |  | 54.412                     | 18  | -3 | 2  | 3 | 87.933              | 1  | -2 | 10 | 4 |
|   |  | 55.239                     | 49  | -3 | 4  | 1 | 88.984              | 1  | -1 | 13 | 2 |
|   |  | 55.809                     | 26  | -1 | 6  | 2 | 89.413              | 2  | -5 | 3  | 2 |
|   |  | 56.658                     | 43  | -2 | 0  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 56.800                     | 56  | 1  | 8  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *56.800                    | 56  | 0  | 5  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 57.580                     | 4   | 1  | 9  | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 58.055                     | 13  | -2 | 2  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *58.055                    | 13  | -1 | 1  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 58.195                     | 20  | 0  | 8  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 58.480                     | 9   | 3  | 3  | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 58.646                     | 11  | -3 | 4  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 58.688                     | 6   | 2  | 0  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 60.354                     | 16  | -2 | 8  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 60.798                     | 12  | -1 | 3  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *60.798                    | 12  | 1  | 2  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 61.022                     | 8   | 2  | 2  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 61.330                     | 10  | 2  | 8  | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 61.536                     | 8   | 1  | 7  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 61.874                     | 2   | -1 | 9  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *61.874                    | 2   | -2 | 7  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 62.132                     | 7   | -2 | 4  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *62.132                    | 7   | -3 | 6  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 62.339                     | 9   | -3 | 1  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 63.752                     | 7   | -1 | 10 | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 63.823                     | 7   | 2  | 7  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *63.823                    | 7   | 3  | 5  | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 64.153                     | 1   | -2 | 9  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 64.790                     | 29  | 1  | 4  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 64.984                     | 32  | 0  | 0  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *64.984                    | 32  | 2  | 4  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 65.281                     | 10  | -1 | 8  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *65.281                    | 10  | -3 | 6  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 65.680                     | 2   | -3 | 7  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 65.930                     | 22  | -4 | 0  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 66.062                     | 12  | -1 | 5  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 66.276                     | 3   | 0  | 2  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 66.856                     | 16  | 3  | 2  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 67.213                     | 5   | -4 | 2  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 67.572                     | 6   | -4 | 1  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 68.607                     | 11  | -2 | 6  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 68.735                     | 36  | 1  | 10 | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 68.404                     | 2   | -4 | 1  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 70.081                     | 9   | 0  | 4  | 4 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *70.081                    | 9   | -4 | 3  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 70.646                     | 18  | 3  | 4  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *70.646                    | 18  | 1  | 11 | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 70.993                     | 5   | -4 | 4  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.117                     | 15  | -3 | 6  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | *71.117                    | 15  | 1  | 6  | 3 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.329                     | 27  | 2  | 6  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.496                     | 11  | 3  | 7  | 0 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.805                     | 2   | 1  | 9  | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.899                     | 1   | -4 | 3  | 1 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 71.956                     | 1   | -2 | 10 | 2 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 72.576                     | 1   | -2 | 1  | 5 |                     |    |    |    |   |
|   |  | 72.850                     | 1   | 2  | 10 | 0 |                     |    |    |    |   |
| Radiation : CuKα1                                   |  | Filter : Not specified     |     |    |    |   |                     |    |    |    |   |
| Lambda : 1.54060                                    |  | d-sp : Calculated spacings |     |    |    |   |                     |    |    |    |   |
| SS/FOM : F30=199(0.0038,40)                         |  |                            |     |    |    |   |                     |    |    |    |   |

ตารางที่ ข-8 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของเคโอลินไนต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-081-1835

| Pattern : 01-089-6538  |  | Radiation = 1.540600       |     |    |    |   | Quality : Calculated |    |    |    |   |
|--|--|----------------------------|-----|----|----|---|----------------------|----|----|----|---|
| Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> |  | 2th                        | i   | h  | k  | l | 2th                  | i  | h  | k  | l |
| Aluminum Silicate Hydroxide<br>Kaolinite                           |  | 12.355                     | 999 | 0  | 0  | 1 | *64.185              | 24 | 3  | 3  | 0 |
|  |  | 19.851                     | 177 | 0  | 2  | 0 | 64.333               | 32 | 2  | 0  | 3 |
|  |  | 20.336                     | 510 | -1 | 1  | 0 | 65.099               | 11 | 0  | 0  | 5 |
|  |  | 21.265                     | 481 | -1 | -1 | 1 | 65.833               | 12 | 0  | -4 | 4 |
|  |  | 21.537                     | 220 | -1 | 1  | 1 | 65.953               | 7  | -1 | 5  | 3 |
|  |  | 23.129                     | 329 | 0  | -2 | 1 | 66.355               | 8  | -2 | 4  | 2 |
|  |  | 23.763                     | 154 | 0  | 2  | 1 | 66.553               | 11 | -2 | 0  | 5 |
|  |  | 24.856                     | 564 | 0  | 0  | 2 | 66.740               | 10 | 1  | -3 | 4 |
|  |  | 25.994                     | 19  | 1  | -1 | 1 | 67.036               | 3  | -3 | -1 | 4 |
|  |  | 26.341                     | 184 | 1  | 1  | 1 | 67.220               | 14 | -3 | -3 | 3 |
|  |  | 28.321                     | 39  | -1 | 1  | 2 | 67.307               | 13 | 0  | -6 | 2 |
|  |  | 28.791                     | 49  | -1 | 1  | 2 | 67.495               | 12 | -3 | 1  | 4 |
|  |  | 31.532                     | 6   | 0  | -2 | 2 | 68.025               | 19 | 0  | 4  | 4 |
|  |  | 32.483                     | 65  | 0  | 2  | 2 | 68.183               | 16 | 0  | -2 | 5 |
|  |  | 34.985                     | 115 | -2 | 0  | 1 | *68.183              | 16 | -3 | 3  | 3 |
|  |  | 34.985                     | 115 | -1 | 3  | 0 | 68.354               | 13 | 3  | -3 | 1 |
|  |  | 35.128                     | 77  | 1  | 3  | 0 | 68.465               | 10 | 1  | 3  | 4 |
|  |  | 35.433                     | 91  | -1 | -3 | 1 | 68.567               | 8  | 3  | -1 | 2 |
|  |  | 35.541                     | 87  | 1  | -1 | 2 | 68.937               | 9  | 0  | 3  | 1 |
|  |  | 35.986                     | 155 | 2  | 0  | 0 | *68.937              | 9  | 0  | 6  | 2 |
|  |  | 35.986                     | 155 | 1  | 2  | 2 | 69.022               | 7  | 3  | 3  | 1 |
|  |  | 37.867                     | 55  | 0  | 0  | 3 | 69.462               | 4  | -2 | -4 | 4 |
|  |  | 38.408                     | 215 | -2 | 0  | 2 | *69.462              | 4  | 0  | 2  | 5 |
|  |  | 38.494                     | 301 | 1  | -3 | 1 | 69.602               | 15 | -2 | 5  | 5 |
|  |  | 38.494                     | 301 | -1 | -1 | 3 | 70.196               | 49 | 1  | -5 | 3 |
|  |  | 39.081                     | 33  | -1 | 1  | 3 | *70.196              | 49 | -1 | -3 | 5 |
|  |  | 39.226                     | 228 | 1  | 3  | 1 | 70.826               | 1  | -2 | 2  | 5 |
|  |  | 40.058                     | 25  | -1 | -3 | 2 | 71.373               | 2  | -2 | 4  | 4 |
|  |  | 40.330                     | 4   | 0  | 4  | 0 | 71.373               | 2  | -2 | 4  | 4 |
|  |  | 40.415                     | 3   | -2 | -2 | 1 | 72.079               | 44 | -1 | -3 | 5 |
|  |  | 40.636                     | 8   | -2 | 2  | 1 | 72.274               | 63 | 1  | 5  | 3 |
|  |  | 41.096                     | 24  | -1 | 3  | 2 | *72.274              | 63 | 2  | 0  | 4 |
|  |  | 41.196                     | 33  | 2  | 0  | 1 | 73.230               | 17 | -2 | -6 | 1 |
|  |  | 41.350                     | 15  | -2 | 2  | 0 | 73.707               | 32 | -4 | 0  | 1 |
|  |  | 41.514                     | 7   | 2  | 2  | 0 | *73.707              | 32 | 1  | -1 | 5 |
|  |  | 41.964                     | 3   | 0  | -4 | 1 | 73.906               | 30 | -4 | 0  | 2 |
|  |  | 42.374                     | 17  | 0  | -2 | 3 | *73.906              | 30 | -2 | 6  | 0 |
|  |  | 42.713                     | 7   | 0  | 4  | 1 | 74.244               | 8  | 2  | 6  | 0 |
|  |  | 43.311                     | 3   | -2 | -2 | 2 | 74.401               | 4  | 1  | 1  | 5 |
|  |  | 43.485                     | 4   | 0  | 2  | 3 | 74.578               | 17 | -2 | -6 | 4 |
|  |  | 43.885                     | 10  | -2 | 2  | 2 | 75.135               | 14 | -3 | 3  | 4 |
|  |  | 45.464                     | 66  | -2 | 0  | 3 | *75.135              | 14 | 2  | -2 | 4 |
|  |  | 45.594                     | 93  | 1  | -3 | 2 | 75.381               | 9  | 3  | -3 | 2 |
|  |  | 45.878                     | 7   | 2  | -2 | 1 | 75.680               | 3  | 2  | 4  | 3 |
|  |  | 46.379                     | 25  | 2  | 2  | 1 | 76.204               | 24 | -2 | 6  | 3 |
|  |  | 46.756                     | 44  | 1  | 3  | 2 | 76.313               | 27 | 0  | 6  | 3 |
|  |  | 47.274                     | 25  | 0  | -4 | 2 | *76.313              | 27 | 4  | 0  | 0 |
|  |  | 47.533                     | 7   | 1  | 1  | 3 | 76.413               | 20 | 2  | 2  | 4 |
|  |  | 47.958                     | 22  | -3 | 3  | 3 | *76.413              | 20 | 3  | 0  | 3 |
|  |  | 48.632                     | 21  | 0  | 4  | 2 | 76.518               | 16 | -3 | -1 | 2 |
|  |  | 49.361                     | 21  | -1 | 3  | 3 | 76.736               | 13 | -4 | 0  | 3 |
|  |  | 49.500                     | 30  | 2  | 0  | 2 | *76.736              | 13 | -3 | -5 | 1 |
|  |  | 49.640                     | 41  | -2 | -2 | 3 | 76.872               | 17 | -2 | -6 | 1 |
|  |  | 50.346                     | 8   | -1 | -4 | 4 | *76.872              | 17 | -1 | 7  | 0 |
|  |  | 50.485                     | 12  | -2 | 2  | 3 | 77.052               | 23 | -1 | -7 | 1 |
|  |  | 50.989                     | 27  | -1 | 1  | 4 | *77.052              | 23 | 1  | 7  | 0 |
|  |  | 50.989                     | 27  | 0  | 0  | 4 | 77.207               | 21 | -4 | -2 | 2 |
|  |  | 53.461                     | 26  | 2  | -2 | 2 | *77.207              | 21 | -4 | -2 | 1 |
|  |  | 54.242                     | 16  | 2  | -2 | 2 | 77.513               | 11 | 4  | 2  | 2 |
|  |  | 54.242                     | 16  | -2 | -4 | 1 | 77.603               | 13 | -3 | -5 | 2 |
|  |  | 54.373                     | 18  | -3 | 1  | 1 | 77.762               | 11 | -1 | 7  | 1 |
|  |  | 54.373                     | 18  | -1 | 5  | 0 | 77.835               | 11 | -1 | -1 | 6 |
|  |  | 54.568                     | 28  | 1  | 5  | 0 | 77.980               | 12 | 2  | 6  | 5 |
|  |  | 54.568                     | 28  | -1 | -5 | 1 | 78.149               | 8  | 0  | -4 | 5 |
|  |  | 55.055                     | 85  | -2 | 4  | 0 | 78.301               | 6  | -3 | 5  | 0 |
|  |  | 55.055                     | 85  | -2 | 0  | 4 | 78.477               | 13 | 3  | -1 | 3 |
|  |  | 55.217                     | 112 | 2  | -2 | 3 | *78.477              | 13 | -3 | 5  | 2 |
|  |  | 55.217                     | 112 | 2  | 4  | 0 | 78.715               | 9  | 3  | 5  | 0 |
|  |  | 55.452                     | 46  | 0  | -4 | 3 | 78.824               | 6  | 1  | -7 | 1 |
|  |  | 55.582                     | 24  | -3 | -1 | 2 | *78.824              | 6  | 3  | 1  | 3 |
|  |  | 55.789                     | 32  | -3 | 1  | 2 | 79.423               | 5  | -2 | -6 | 3 |
|  |  | 55.789                     | 32  | 0  | 2  | 4 | 79.683               | 14 | -4 | -2 | 0 |
|  |  | 56.189                     | 12  | -3 | 1  | 0 | *79.683              | 14 | -1 | -7 | 2 |
|  |  | 56.287                     | 10  | 3  | 1  | 0 | 79.822               | 11 | -2 | 0  | 6 |
|  |  | 56.438                     | 12  | -2 | -4 | 2 | 79.937               | 14 | 1  | 7  | 1 |
|  |  | 56.694                     | 66  | 1  | 3  | 3 | *79.937              | 14 | -4 | -2 | 3 |
|  |  | 56.792                     | 48  | 1  | -5 | 1 | 80.037               | 11 | 1  | -3 | 5 |
|  |  | 57.269                     | 8   | 0  | 4  | 3 | 80.427               | 10 | 0  | 0  | 6 |
|  |  | 57.383                     | 11  | -2 | 4  | 2 | *80.427              | 10 | -4 | 2  | 3 |
|  |  | 57.703                     | 3   | 1  | 5  | 1 | 80.714               | 6  | 0  | 4  | 5 |
|  |  | 57.863                     | 7   | -1 | -5 | 2 | 81.101               | 1  | -3 | -5 | 3 |
|  |  | 58.154                     | 34  | -1 | -3 | 4 | 81.282               | 3  | -1 | 7  | 2 |
|  |  | 58.596                     | 6   | -2 | -2 | 4 | 81.395               | 3  | -2 | 6  | 3 |
|  |  | 58.596                     | 6   | 2  | -4 | 1 | 81.583               | 4  | 4  | 0  | 1 |
|  |  | 59.202                     | 3   | -1 | 5  | 2 | 81.945               | 7  | -2 | 4  | 5 |
|  |  | 59.437                     | 9   | 2  | 4  | 1 | 82.034               | 6  | 1  | 3  | 5 |
|  |  | 59.635                     | 30  | -2 | 2  | 4 | *82.034              | 6  | 3  | -5 | 1 |
|  |  | 59.635                     | 30  | 1  | -1 | 4 | *82.252              | 7  | -4 | 0  | 4 |
|  |  | 59.824                     | 36  | -1 | 3  | 4 | 82.501               | 6  | -3 | 5  | 3 |
|  |  | 59.962                     | 43  | -3 | -1 | 3 | *82.501              | 6  | -2 | -2 | 6 |
|  |  | 59.962                     | 43  | 2  | 0  | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 60.318                     | 7   | -3 | 1  | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 60.318                     | 7   | 1  | 1  | 4 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 61.048                     | 6   | 3  | -1 | 1 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 61.284                     | 4   | 3  | 1  | 1 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 61.642                     | 5   | -2 | -4 | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 62.275                     | 114 | -3 | -3 | 1 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 62.275                     | 114 | 0  | 6  | 0 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 62.427                     | 109 | -3 | 3  | 1 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.104                     | 6   | 2  | 4  | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.369                     | 18  | 0  | -6 | 1 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.369                     | 18  | 2  | -2 | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.733                     | 13  | 1  | 5  | 2 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.869                     | 18  | -3 | 2  | 2 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 63.869                     | 18  | -3 | 3  | 0 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 64.016                     | 14  | -1 | -5 | 3 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 64.016                     | 14  | -1 | 1  | 5 |                      |    |    |    |   |
|  |  | 64.185                     | 24  | 0  | 6  | 1 |                      |    |    |    |   |
| Radiation : CuKα1  |  | Filter : Not specified     |     |    |    |   |                      |    |    |    |   |
| Lambda : 1.54060   |  | d-sp : Calculated spacings |     |    |    |   |                      |    |    |    |   |
| SS/FOM : F30=180(0.0048,35)  |  |                            |     |    |    |   |                      |    |    |    |   |





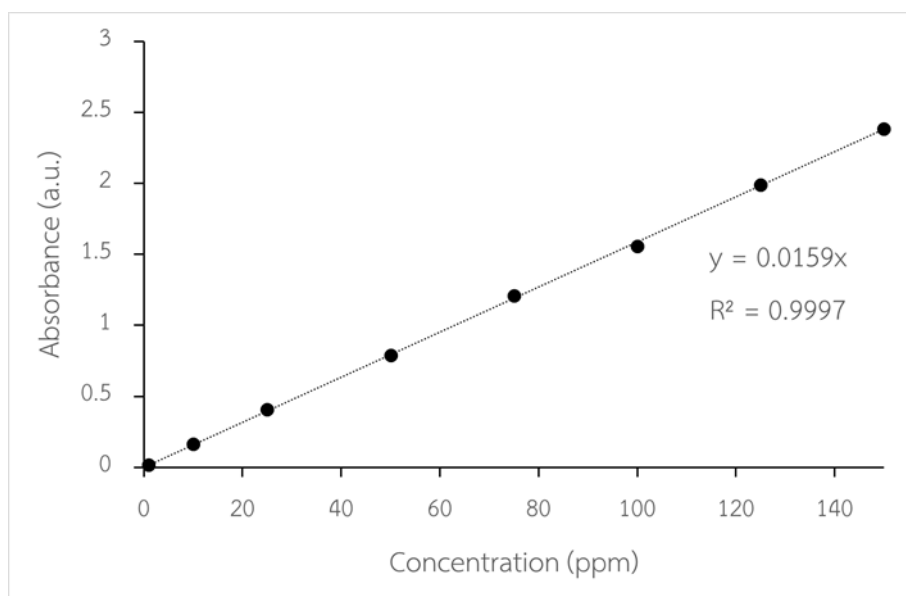
ตารางที่ ข-11 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแอนไฮเดรต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-072-0916

| Pattern : 01-072-0916  |  | Radiation = 1.540598 |     | Quality : Calculated |   |   |  |
|--|--|----------------------|-----|----------------------|---|---|--|
| Ca(SO <sub>4</sub> )   |  | 2th                  | i   | h                    | k | l |  |
|  |  | 19.032               | 1   | 0                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 22.904               | 52  | 1                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 25.406               | 999 | 2                    | 0 | 0 |  |
| Calcium Sulfate  |  | *25.406              | 999 | 0                    | 2 | 0 |  |
| Anhydrite  |  | 28.564               | 22  | 0                    | 0 | 2 |  |
|  |  | 31.339               | 326 | 1                    | 0 | 2 |  |
|  |  | 31.937               | 32  | 2                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 36.258               | 77  | 2                    | 2 | 0 |  |
|  |  | 38.615               | 177 | 2                    | 0 | 2 |  |
|  |  | *38.615              | 177 | 0                    | 2 | 2 |  |
|  |  | 40.784               | 197 | 1                    | 2 | 2 |  |
|  |  | 41.282               | 60  | 0                    | 3 | 1 |  |
|  |  | 43.302               | 61  | 3                    | 1 | 1 |  |
|  |  | *43.302              | 61  | 1                    | 3 | 1 |  |
|  |  | 45.420               | 44  | 0                    | 1 | 3 |  |
|  |  | 46.792               | 31  | 2                    | 2 | 2 |  |
|  |  | 47.333               | 4   | 1                    | 1 | 3 |  |
|  |  | 48.647               | 137 | 3                    | 0 | 2 |  |
|  |  | 49.098               | 30  | 2                    | 3 | 1 |  |
|  |  | 52.181               | 62  | 4                    | 0 | 0 |  |
|  |  | 52.246               | 64  | 0                    | 4 | 0 |  |
|  |  | 52.757               | 3   | 2                    | 1 | 3 |  |
|  |  | 55.684               | 129 | 3                    | 2 | 2 |  |
|  |  | 56.048               | 5   | 4                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 57.732               | 21  | 3                    | 3 | 1 |  |
|  |  | 58.964               | 29  | 4                    | 2 | 0 |  |
|  |  | *58.964              | 29  | 2                    | 4 | 0 |  |
|  |  | 59.127               | 17  | 0                    | 0 | 4 |  |
|  |  | 60.622               | 25  | 4                    | 0 | 2 |  |
|  |  | *60.622              | 25  | 0                    | 4 | 2 |  |
|  |  | 60.728               | 15  | 1                    | 0 | 4 |  |
|  |  | 61.062               | 9   | 3                    | 1 | 3 |  |
|  |  | *61.062              | 9   | 1                    | 3 | 3 |  |
|  |  | 62.200               | 45  | 1                    | 4 | 2 |  |
|  |  | 65.404               | 26  | 2                    | 0 | 4 |  |
|  |  | *65.404              | 26  | 0                    | 2 | 4 |  |
|  |  | 65.711               | 9   | 2                    | 3 | 3 |  |
|  |  | 66.764               | 14  | 4                    | 2 | 2 |  |
|  |  | *66.764              | 14  | 2                    | 4 | 2 |  |
|  |  | 66.919               | 23  | 1                    | 2 | 4 |  |
|  |  | 68.615               | 6   | 4                    | 3 | 1 |  |
|  |  | *68.615              | 6   | 0                    | 5 | 1 |  |
|  |  | 70.068               | 1   | 5                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 70.149               | 1   | 1                    | 5 | 1 |  |
|  |  | 71.367               | 41  | 2                    | 2 | 4 |  |
|  |  | 71.635               | 22  | 4                    | 1 | 3 |  |
|  |  | 72.810               | 15  | 3                    | 0 | 4 |  |
|  |  | 74.159               | 49  | 5                    | 0 | 2 |  |
|  |  | *74.159              | 49  | 3                    | 4 | 2 |  |
|  |  | 76.971               | 8   | 4                    | 4 | 0 |  |
|  |  | 77.582               | 1   | 0                    | 1 | 5 |  |
|  |  | 78.544               | 33  | 3                    | 2 | 4 |  |
|  |  | 78.996               | 2   | 1                    | 1 | 5 |  |
|  |  | 79.810               | 19  | 5                    | 2 | 2 |  |
|  |  | 81.596               | 3   | 5                    | 3 | 1 |  |
|  |  | *81.596              | 3   | 3                    | 5 | 1 |  |
|  |  | 82.552               | 19  | 6                    | 0 | 0 |  |
|  |  | 82.668               | 19  | 0                    | 6 | 0 |  |
|  |  | 82.795               | 20  | 4                    | 0 | 4 |  |
|  |  | *82.795              | 20  | 0                    | 4 | 4 |  |
|  |  | 83.038               | 10  | 4                    | 3 | 3 |  |
|  |  | *83.038              | 10  | 0                    | 5 | 3 |  |
|  |  | 83.203               | 5   | 2                    | 1 | 5 |  |
|  |  | 84.046               | 4   | 4                    | 4 | 2 |  |
|  |  | 84.189               | 8   | 1                    | 4 | 4 |  |
|  |  | 84.406               | 5   | 5                    | 1 | 3 |  |
|  |  | *84.406              | 5   | 1                    | 5 | 3 |  |
|  |  | 85.702               | 1   | 6                    | 1 | 1 |  |
|  |  | 88.127               | 18  | 6                    | 2 | 0 |  |
|  |  | 88.317               | 38  | 4                    | 2 | 4 |  |
|  |  | *88.317              | 38  | 2                    | 4 | 4 |  |
|  |  | 88.647               | 19  | 2                    | 5 | 3 |  |
|  |  | 88.786               | 5   | 0                    | 3 | 5 |  |
|  |  | 89.547               | 2   | 6                    | 0 | 2 |  |
|  |  | 89.661               | 1   | 0                    | 6 | 2 |  |
| <b>Lattice</b> : Base-centered orthorhombic <b>Mol. weight</b> = 136.14<br><b>S.G.</b> : Amma (63) <b>Volume [CD]</b> = 306.18<br><b>a</b> = 7.00600 <b>Dx</b> = 2.953<br><b>b</b> = 6.99800<br><b>c</b> = 6.24500<br><b>a/b</b> = 1.00114 <b>Z</b> = 4 <b>I/cor</b> = 1.77<br><b>c/b</b> = 0.89240  |  |                      |     |                      |   |   |  |
| <b>ICSD collection code:</b> 016382<br><b>Temperature factor:</b> ATF<br><b>Remarks from ICSD/CSD:</b> REM COA.<br><b>Remarks from ICSD/CSD:</b> REM M z(O2) was misprinted as .19735.<br><b>Remarks from ICSD/CSD:</b> REM M PDF 37-1496 (other cell setting).<br><b>Test from ICSD:</b> Published coordinates have been corrected.<br><b>Sample source or locality:</b> Specimen from Stassfurt, West Germany.<br><b>Additional pattern:</b> See PDF 37-1496, PDF 72-503, PDF 74-2421 and PDF 862270.<br><b>Data collection flag:</b> Ambient. |  |                      |     |                      |   |   |  |
| Kirfel, A., Will, G., Acta Crystallogr., Sec. B, volume 36, page 2881 (1980)<br>Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)  |  |                      |     |                      |   |   |  |
| <b>Radiation</b> : CuKα1 <b>Filter</b> : Not specified<br><b>Lambda</b> : 1.54060 <b>d-sp</b> : Calculated spacings<br><b>SS/FOM</b> : F30=124(0.0064,38)  |  |                      |     |                      |   |   |  |

ตารางที่ ข-12 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไอรอนซัลเฟต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-073-1057

| Pattern : 01-073-1057   |  | Radiation = 1.540598  |          | Quality : Calculated  |          |  |  |
|---|--|---|----------|---|----------|--|--|
| $\alpha$ -FeSO <sub>4</sub>   |  | <b>2th</b>  | <b>i</b> | <b>h</b>  | <b>k</b> | <b>l</b>   |  |
| Iron Sulfate  |  | 20.227  | 218      | 1   | 1        | 0  |  |
|   |  | 22.268  | 178      | 0   | 2        | 0  |  |
|   |  | 24.355  | 772      | 1   | 1        | 1  |  |
|   |  | 26.091  | 406      | 0   | 2        | 1  |  |
|   |  | 27.039  | 10       | 0   | 0        | 2  |  |
|   |  | 34.001  | 999      | 1   | 1        | 2  |  |
|   |  | 34.116  | 784      | 2   | 0        | 0  |  |
|   |  | 35.302  | 21       | 0   | 2        | 2  |  |
|   |  | 37.892  | 311      | 1   | 3        | 0  |  |
|   |  | 40.373  | 1        | 1   | 3        | 1  |  |
|   |  | 41.120  | 7        | 2   | 2        | 0  |  |
|   |  | 43.448  | 17       | 2   | 2        | 1  |  |
|   |  | 44.061  | 141      | 2   | 0        | 2  |  |
|   |  | 45.438  | 69       | 0   | 4        | 0  |  |
|   |  | 46.180  | 1        | 1   | 1        | 3  |  |
|   |  | 47.197  | 81       | 1   | 3        | 2  |  |
|   |  | *47.197   | 81       | 0   | 2        | 3  |  |
|   |  | 47.596  | 3        | 0   | 4        | 1  |  |
|   |  | 49.907  | 161      | 2   | 2        | 2  |  |
|   |  | 53.548  | 56       | 3   | 1        | 0  |  |
|   |  | 53.674  | 131      | 0   | 4        | 2  |  |
|   |  | 55.471  | 26       | 3   | 1        | 1  |  |
|   |  | 55.752  | 79       | 0   | 0        | 4  |  |
|   |  | 57.096  | 37       | 1   | 3        | 3  |  |
|   |  | 58.022  | 24       | 2   | 4        | 0  |  |
|   |  | 59.509  | 7        | 2   | 2        | 3  |  |
|   |  | 59.850  | 34       | 2   | 4        | 1  |  |
|   |  | 60.603  | 27       | 1   | 5        | 0  |  |
|   |  | 60.777  | 54       | 0   | 2        | 4  |  |
|   |  | 60.998  | 58       | 3   | 1        | 2  |  |
|   |  | 62.385  | 3        | 1   | 5        | 1  |  |
|   |  | 62.887  | 1        | 0   | 4        | 3  |  |
|   |  | 63.577  | 69       | 3   | 3        | 0  |  |
|   |  | 65.147  | 148      | 2   | 4        | 2  |  |
|   |  | 65.313  | 82       | 3   | 3        | 1  |  |
|   |  | 67.003  | 24       | 2   | 0        | 4  |  |
|   |  | 67.570  | 38       | 1   | 5        | 2  |  |
|   |  | 69.393  | 65       | 1   | 3        | 4  |  |
|   |  | 69.622  | 35       | 3   | 1        | 3  |  |
|   |  | 70.386  | 2        | 3   | 3        | 2  |  |
|   |  | 70.805  | 7        | 0   | 6        | 0  |  |
|   |  | 71.572  | 7        | 2   | 2        | 4  |  |
|   |  | 71.842  | 34       | 4   | 0        | 0  |  |
|   |  | 72.455  | 1        | 0   | 6        | 1  |  |
|   |  | 73.522  | 14       | 2   | 4        | 3  |  |
|   |  | 74.665  | 5        | 0   | 4        | 4  |  |
|   |  | 75.216  | 20       | 1   | 1        | 5  |  |
|   |  | 75.823  | 18       | 1   | 5        | 3  |  |
|   |  | 75.979  | 12       | 0   | 2        | 5  |  |
|   |  | 77.322  | 1        | 0   | 6        | 2  |  |
|   |  | 77.894  | 9        | 4   | 2        | 1  |  |
|   |  | 78.327  | 3        | 4   | 0        | 2  |  |
|   |  | 78.518  | 3        | 3   | 3        | 3  |  |
|   |  | 80.971  | 25       | 3   | 1        | 4  |  |
|   |  | *80.971   | 25       | 2   | 6        | 0  |  |
|   |  | 81.566  | 8        | 3   | 5        | 0  |  |
|   |  | 82.567  | 9        | 2   | 6        | 1  |  |
|   |  | 82.660  | 10       | 4   | 2        | 2  |  |
|   |  | 83.145  | 10       | 3   | 5        | 1  |  |
|   |  | 83.914  | 1        | 1   | 3        | 5  |  |
|   |  | 84.700  | 2        | 2   | 4        | 4  |  |
|   |  | 85.247  | 1        | 0   | 6        | 3  |  |
|   |  | 85.976  | 2        | 2   | 2        | 5  |  |
|   |  | 86.926  | 11       | 1   | 5        | 4  |  |
|   |  | 87.514  | 2        | 1   | 7        | 0  |  |
|   |  | 87.858  | 12       | 3   | 5        | 2  |  |
|   |  | 89.069  | 2        | 0   | 0        | 6  |  |
|   |  | *89.069   | 2        | 1   | 7        | 1  |  |
|   |  | 89.237  | 6        | 4   | 4        | 0  |  |
|   |  | 89.554  | 38       | 3   | 3        | 4  |  |
| <b>Lattice</b> : Base-centered orthorhombic <b>Mol. weight</b> = 151.90<br><b>S.G.</b> : Cmc <sub>2</sub> (63) <b>Volume [CD]</b> = 276.12<br><b>a</b> = 5.25200 <b>Dx</b> = 3.654<br><b>b</b> = 7.97800<br><b>c</b> = 6.59000<br><b>a/b</b> = 0.65831 <b>Z</b> = 4 <b>I/cor</b> = 2.45<br><b>c/b</b> = 0.82602 |  | <b>ICSD collection code:</b> 023507<br><b>Test from ICSD:</b> At least one TF missing.<br><b>Data collection flag:</b> Ambient. |          | Samaras, D., Coing-Boyat, J., Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr., volume 93, page 190 (1970)<br>Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) |          | <b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1 <b>Filter</b> : Not specified<br><b>Lambda</b> : 1.54060 <b>d-sp</b> : Calculated spacings<br><b>SS/FOM</b> : F30=938(0.0010,32) |  |

## ภาคผนวก ค



รูปที่ ค-1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและสารละลายลิทมิ้นที่ความเข้มข้นต่างๆ





## ภาคผนวก ง

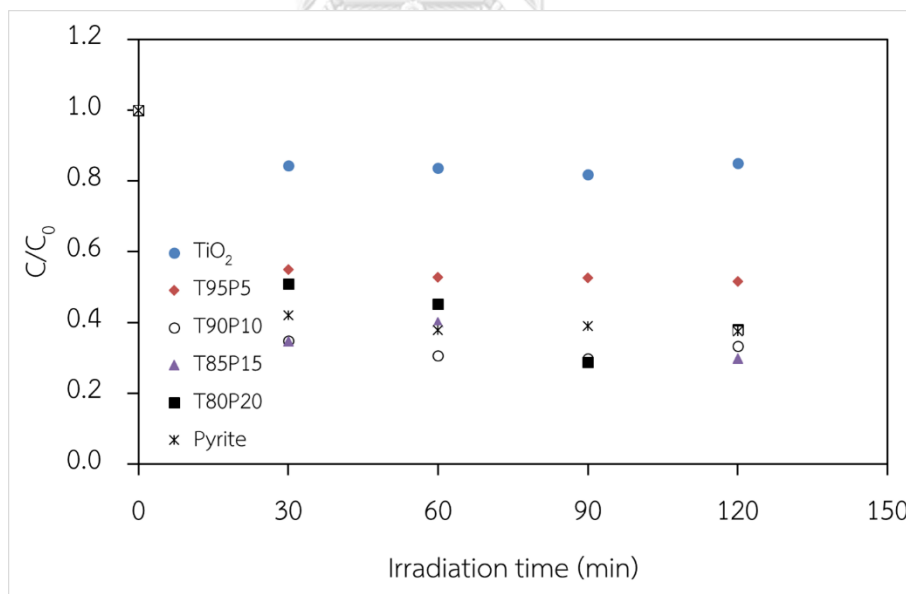
วิธีการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพูนให้อิ่มตัวด้วยลิกนินในที่มืดก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินในน้ำภายใต้แสงจากหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

- นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพูนหลังฉีดยุโรปอลิยูรีเทน 1 ชิ้น มาแช่ในสารละลายลิกนิน ความเข้มข้น 10000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

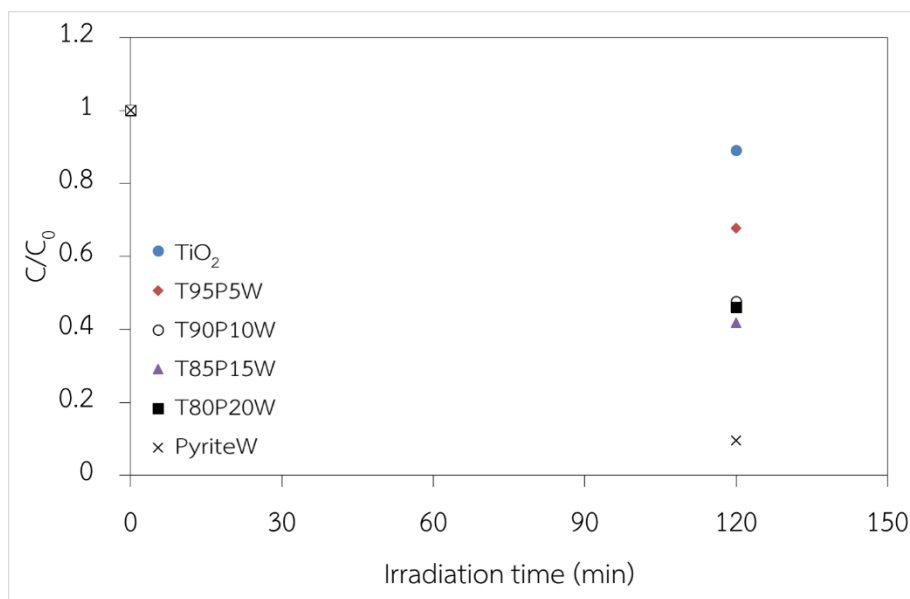
- ย้ายชิ้นงานมาแช่ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

- ย้ายชิ้นงานมาแช่ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และย้ายชิ้นงานมาแช่ในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร อีกครั้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าความสามารถในการดูดลิกนินของชิ้นงานเข้าสู่ความสมดุลแล้ว

ผลของการแช่ผงวัสดุเชิงโพลีแคตาลิสต์ในที่มืดก่อนการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายลิกนินภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



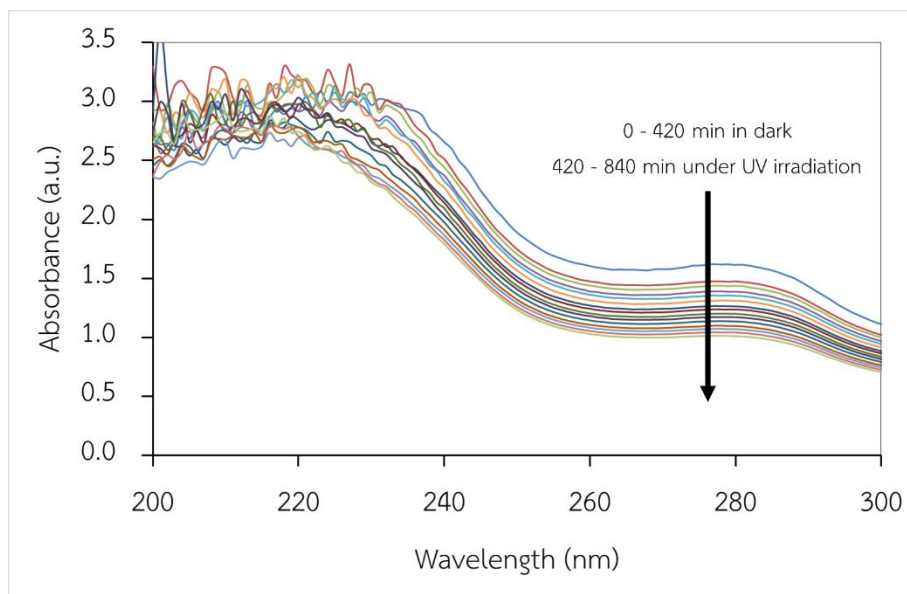
รูปที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารละลายลิกนินด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไพไรต์ไม่ล้าง ที่เวลาต่างๆ ในที่มืด



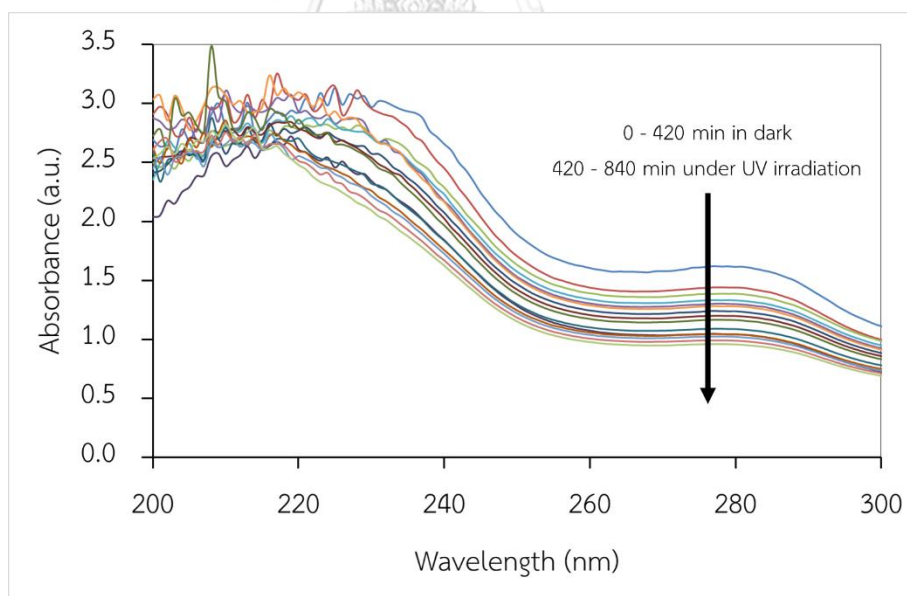
รูปที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารละลายลิแกนด์ด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/ไพไรต์ล่าง ที่เวลาต่างๆ ในที่มีด



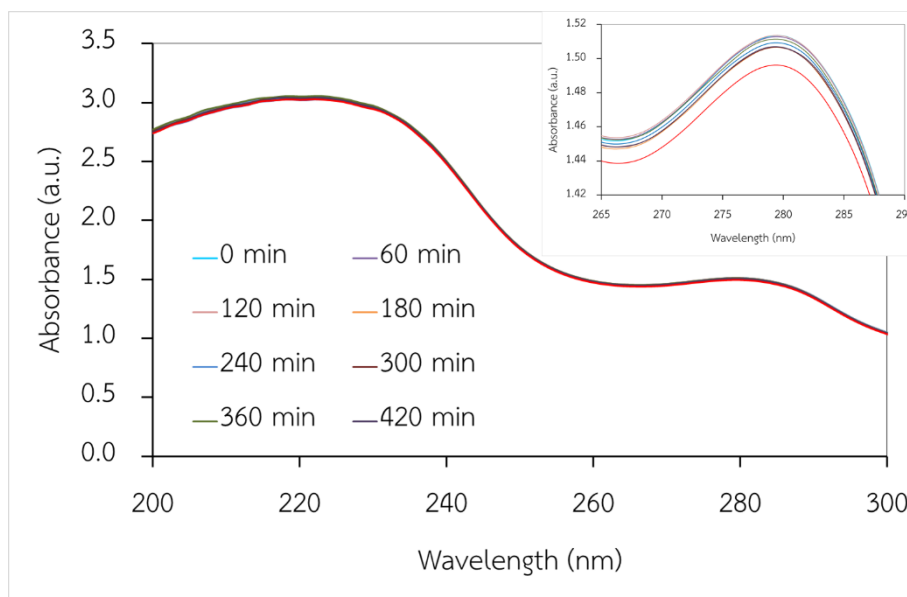
## ภาคผนวก จ



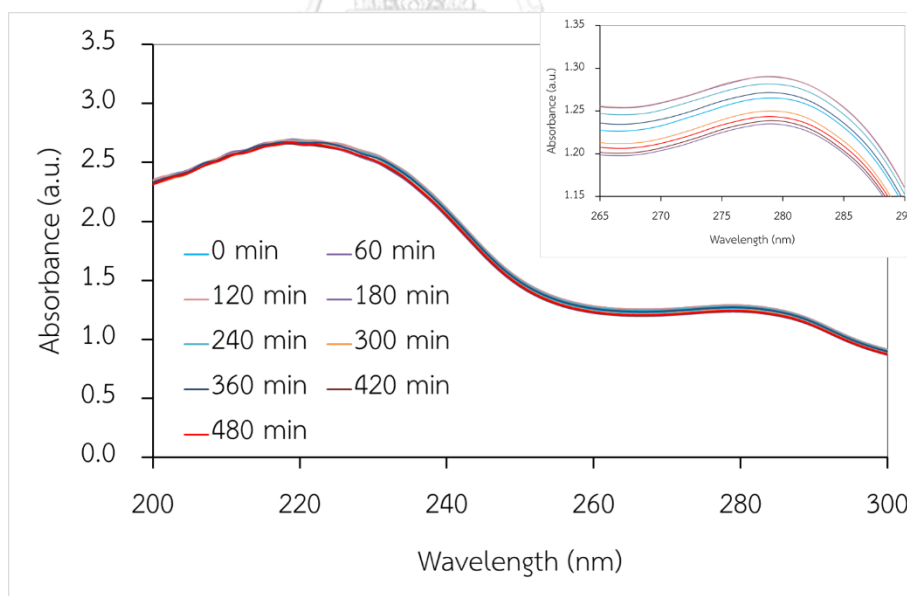
รูปที่ จ-1 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ สูตร BC50 เเผที่ 600 องศาเซลเซียส ไม่เคลือบ



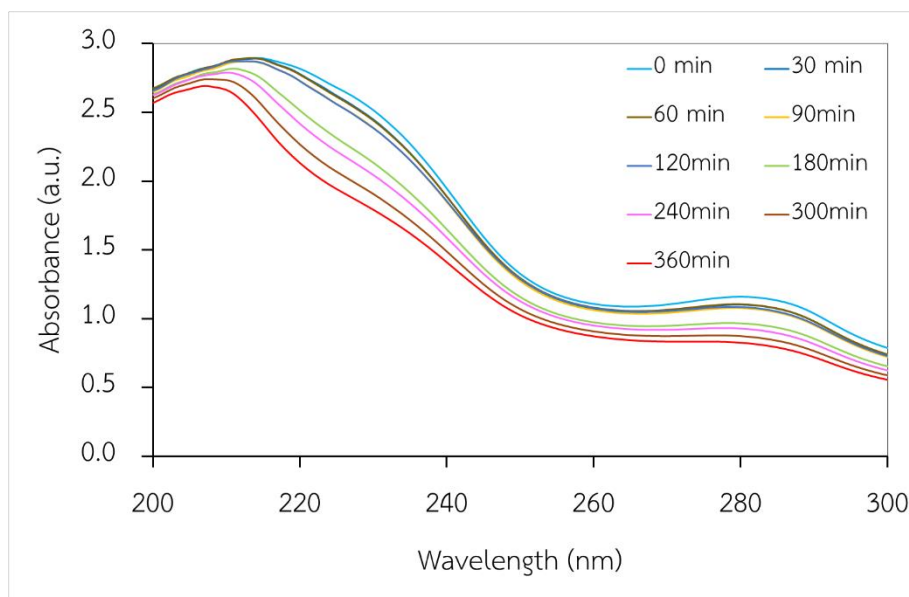
รูปที่ จ-2 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ สูตร BC50 เเผที่ 650 องศาเซลเซียส เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์



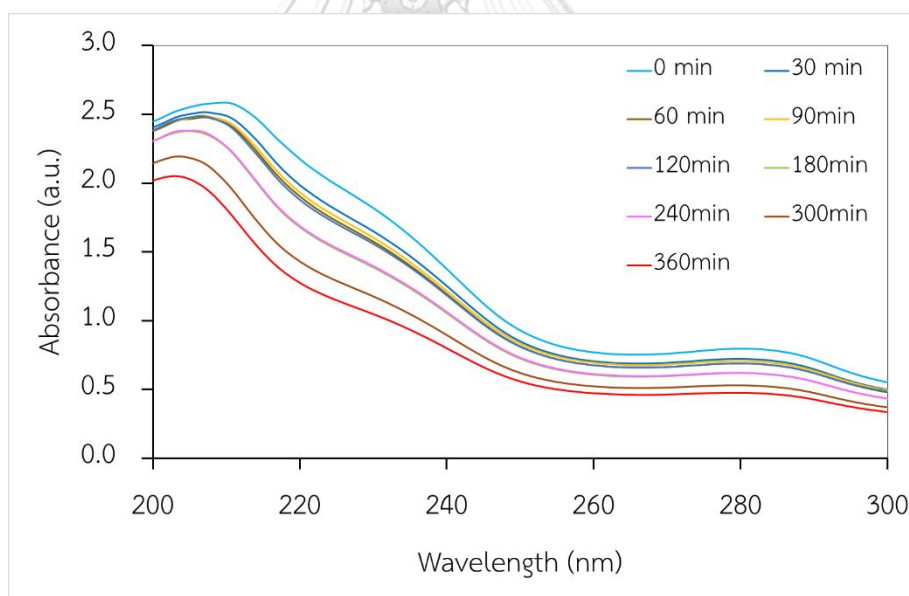
**รูปที่ จ-3** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ สูตร FBC01 เเผที่ 650 องศาเซลเซียส เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังอิมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



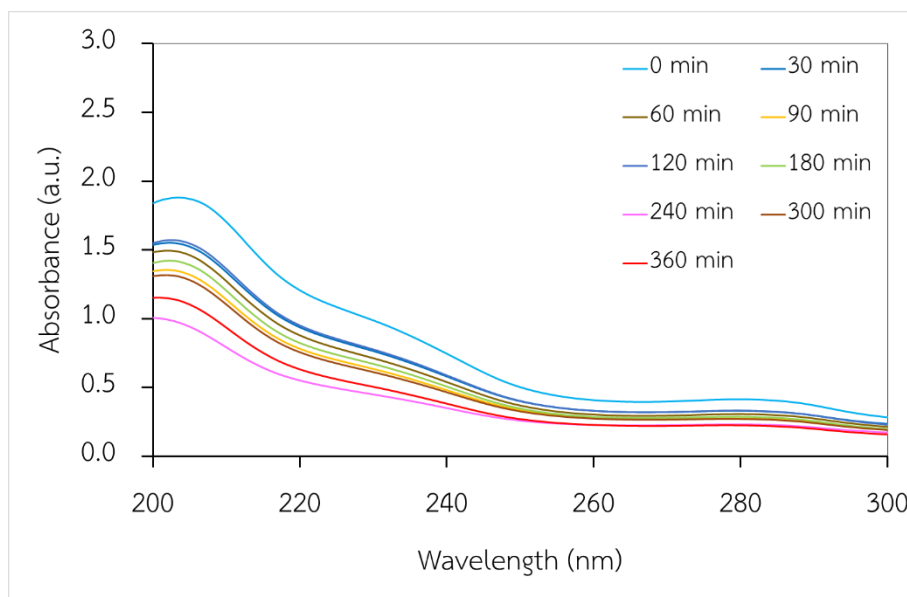
**รูปที่ จ-4** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบทรงกระบอกพรุณถ่านกัมมันต์/ซีโอไลต์โซเดียม เอ สูตร FBC02 เเผที่ 650 องศาเซลเซียส เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังอิมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



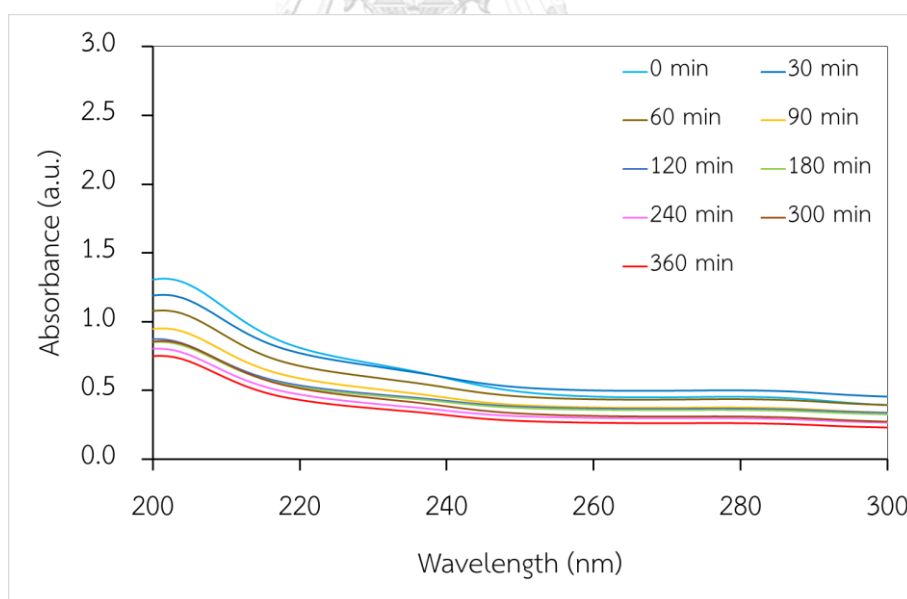
**รูปที่ จ-5** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟิล์มที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วย  $\text{TiO}_2$  P25 หลังอิมพัลส์ ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาลोजен



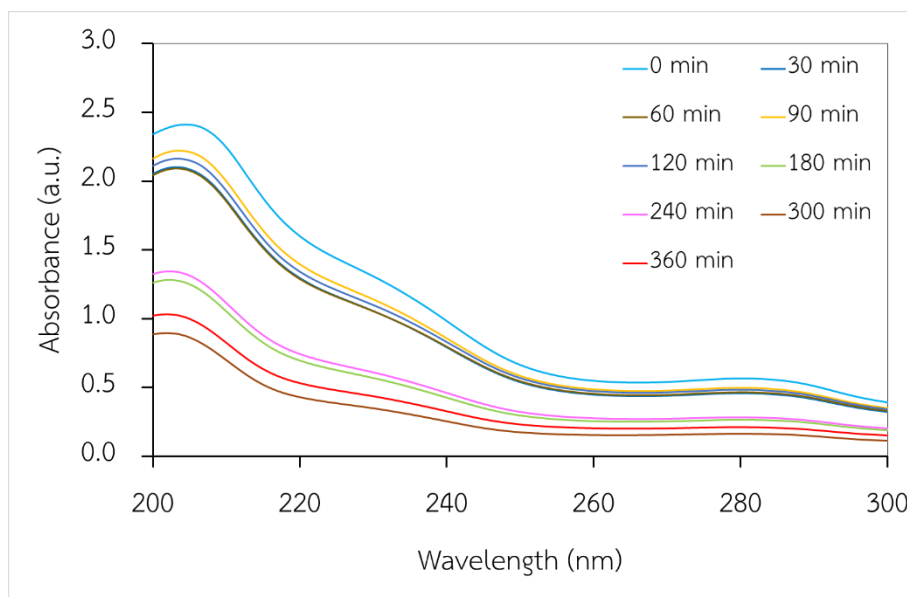
**รูปที่ จ-6** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของฟิล์มที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ไม่ล้าง T95P5 เพาที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมพัลส์ ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาลोजен



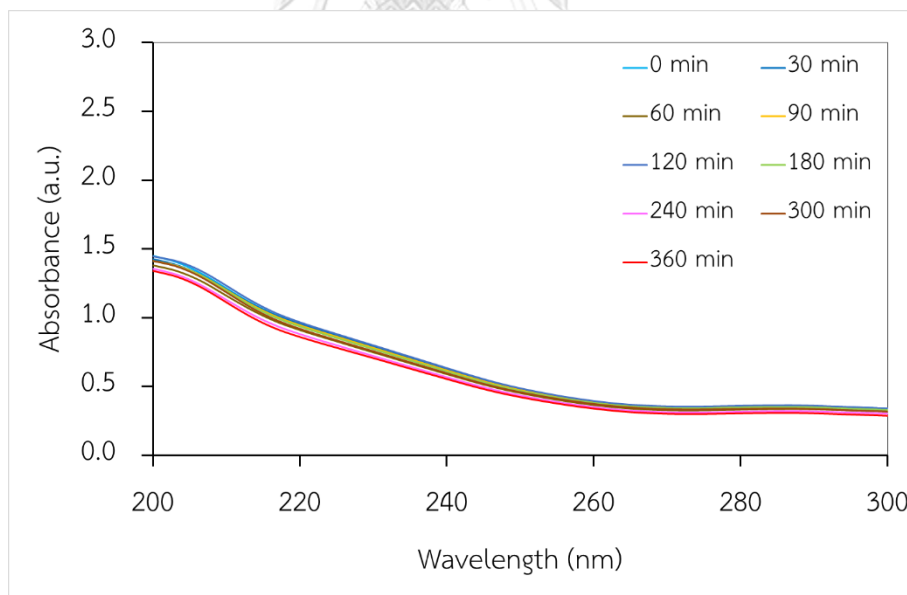
**รูปที่ จ-7** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง T90P10 เเผที่ 300 องศาเซลเซียส ในสถานะปิด หลังอ้อมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



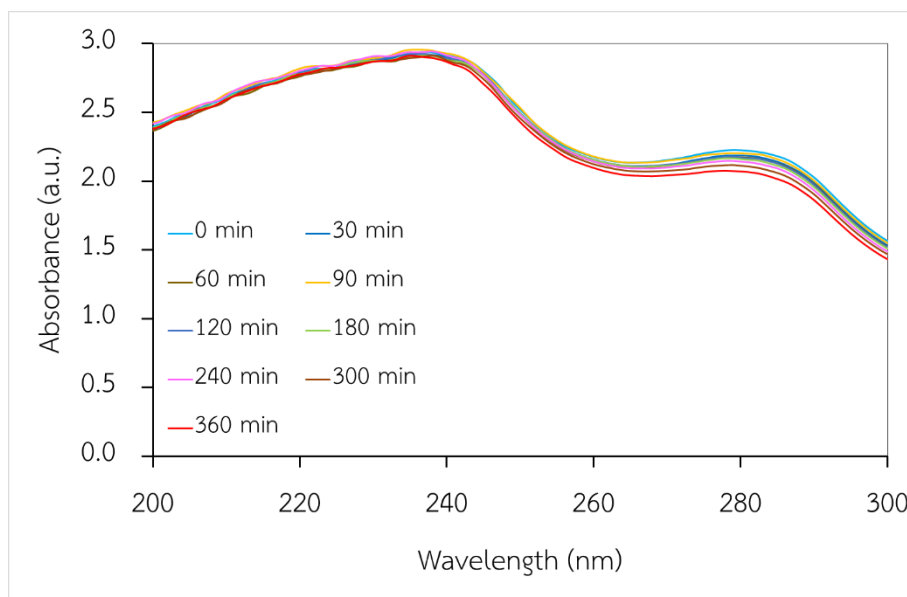
**รูปที่ จ-8** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง T85P15 เเผที่ 300 องศาเซลเซียส ในสถานะปิด หลังอ้อมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



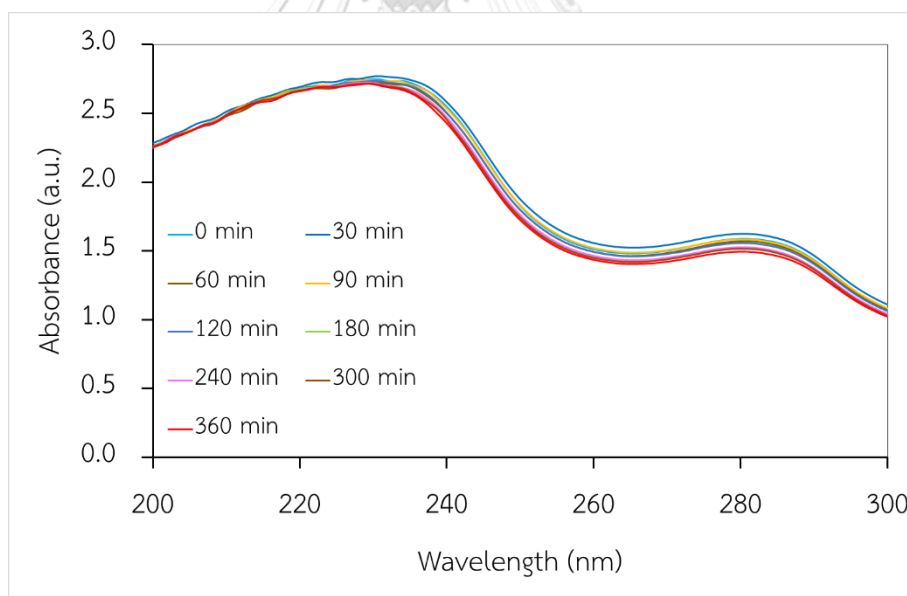
**รูปที่ จ-9** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ไม่ล้าง T80P20 เพาที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



**รูปที่ จ-7** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วย Pyrite เพาที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัว ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

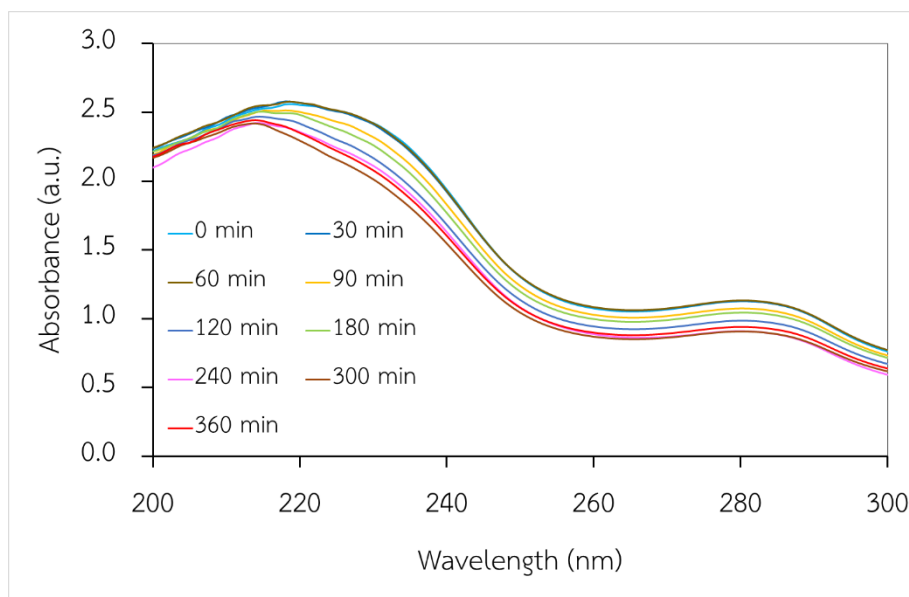


**รูปที่ จ-8** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วย  $\text{TiO}_2$  P25 หลังอิมัลชัน ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

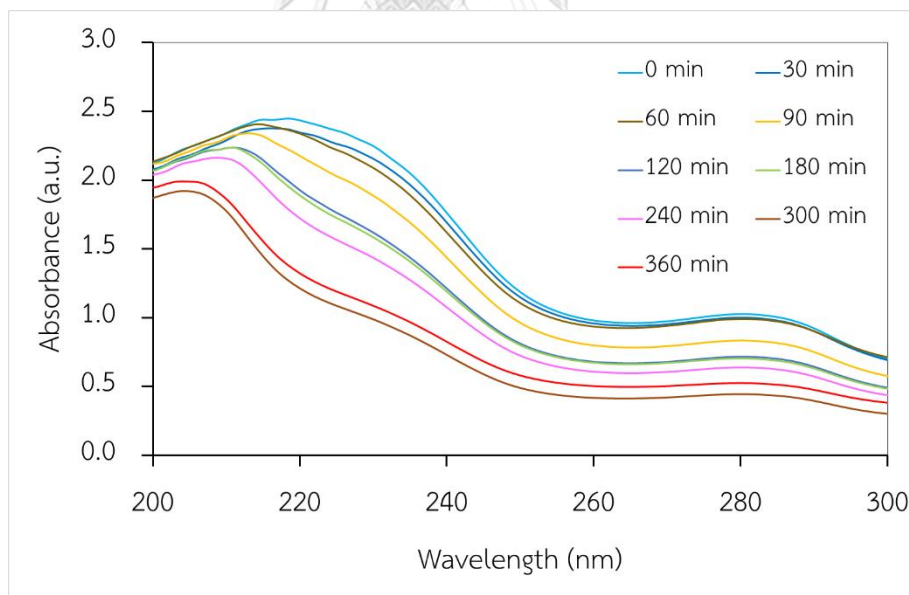


**รูปที่ จ-9** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟโรต์ไม่ล้าง T95P5W เพาที่ 300 องศาเซลเซียส ในสถานะปิด หลังอิมัลชันภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน

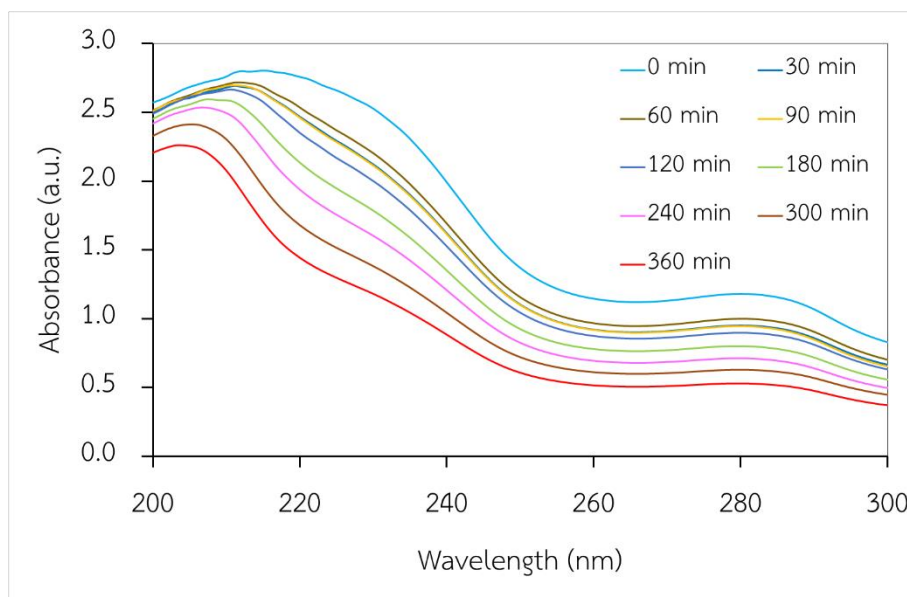




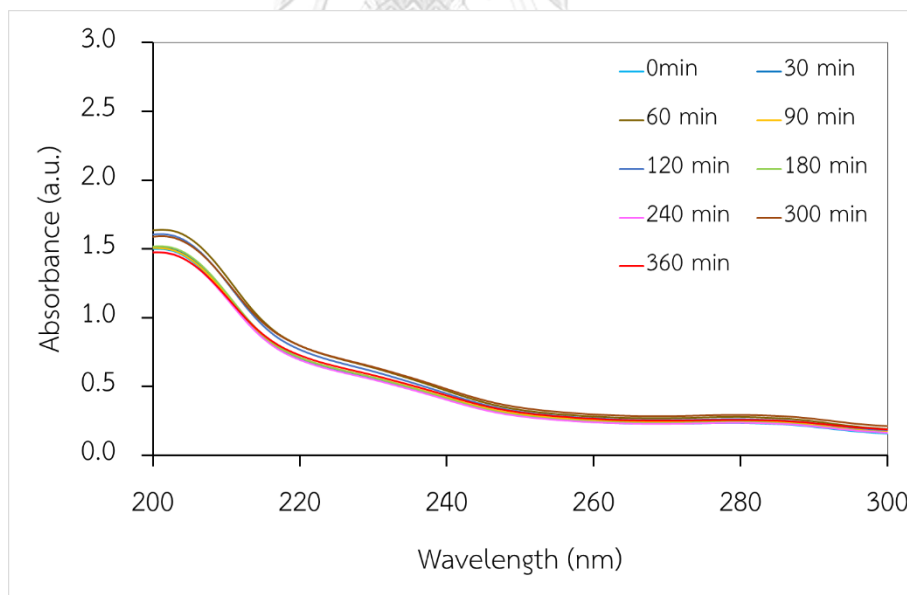
**รูปที่ จ-10** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง T90P10W เผาที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัวภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



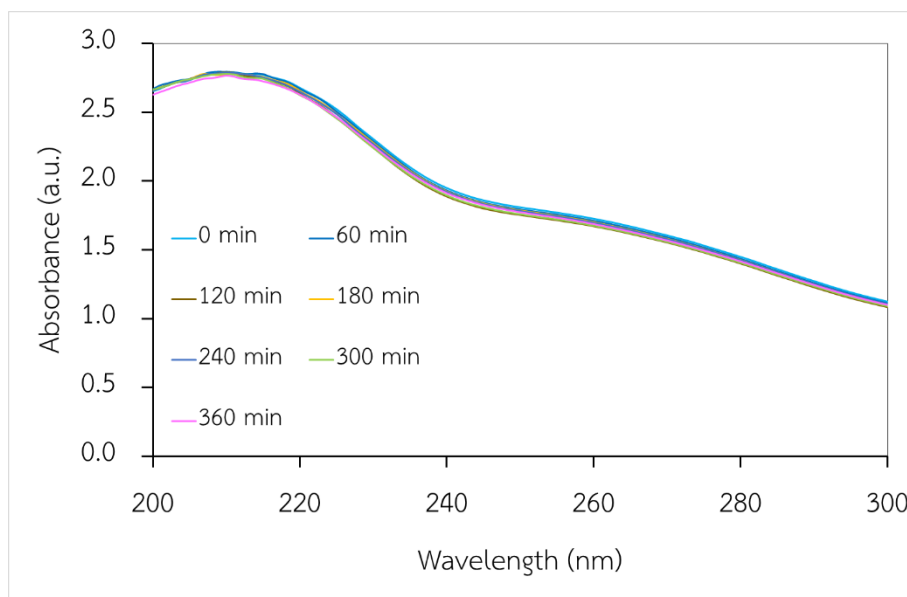
**รูปที่ จ-10** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง T85P15W เผาที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัวภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



**รูปที่ จ-11** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ไฟไรต์ไม่ล้าง T80P20W เเผที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัวภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



**รูปที่ จ-12** แถบการดูดกลืนแสงยูวีของลิกนินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกกำจัดด้วย PyriteW เเผที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัวภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน



รูปที่ จ-13 แถบการดูดกลืนแสงยูวีของน้ำทิ้งที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย T80P20W เหนือที่ 300 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิด หลังอิมตัวภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน โดยเจือจางความเข้มข้นของน้ำทิ้งเหลือร้อยละ 25 ก่อนนำมาวัดแถบการดูดกลืนแสงยูวี

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิธิวัชร นวอัครฐานันท์ เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2556 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในเดือนตุลาคม พ.ศ.2556 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2560

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Fabrication of Porous Hollow Cylinder Activated Carbon-Zeolite Substrate" และได้รับรางวัล Best Poster Award ในการประชุมทางวิชาการ 8th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-8) ระหว่างวันที่ 15-16 ธันวาคม พ.ศ. 2557 ณ โรงแรมสวิส Swissotel Le Concorde กรุงเทพมหานคร และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Book Series ของ Key Engineering Materials

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง "Preparation of Porous Hollow Cylindrical Composite Containing Activated Carbon and Zeolite for Titanium Dioxide Coating" ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2015 (ICTA2015) ระหว่างวันที่ 9 - 11 กันยายน พ.ศ. 2558 ณ ศูนย์ไบเทคบางนา

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Effect of Firing Conditions on Properties of Porous Hollow Cylindrical Zeolite NaA-Clay Substrates for Titanium Dioxide Coating and Their Photodegradation of Lignin" และได้รับรางวัล Best Poster Award ในการประชุมทางวิชาการ 9th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-9) ระหว่างวันที่ 14-15 ธันวาคม พ.ศ. 2559 ณ โรงแรมสวิส Swissotel Le Concorde กรุงเทพมหานคร

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง "Preparation of Porous Zeolite/Clay Composites Cylindrical Tubes as Substrates for Titanium Dioxide Coating" ในการประชุมทางวิชาการ 5th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering (ACMME 2017) ระหว่างวันที่ 9 - 11 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ณ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Preparation of Porous Cylindrical Tubes Substrates from Zeolite and Clay for Titanium Dioxide Photocatalyst Coating" และได้รับรางวัล Best Poster Award - Runner-up ในการประชุมทางวิชาการ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2017 (ICTA2017) ระหว่างวันที่ 31 สิงหาคม -1 กันยายน พ.ศ. 2560 ณ ศูนย์ไบเทคบางนา กรุงเทพมหานคร และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Journal ของ Key Engineering Materials