

VH19 127075

การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียม  
ไดออกไซด์ในซิลิกาจากแกลบข้าว

นางอัญชลี มาคิน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา  
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม



ใบอนุมัติวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

เรื่อง : การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาจากแกลบข้าว

ผู้วิจัย : นางอัญชลี มาคิน

ได้รับอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีศึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานิตย์ อัญญาโพธิ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ตีเมืองชัย)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.นุกูล กุดแกลง)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อารีพร เป้าอุฬาล)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชราภรณ์ พิมพ์จันทร์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉนวนกรณ์ ทับทิมใส)

ชื่อเรื่อง : การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์  
ในซิลิกาจากแกลบข้าว

ผู้วิจัย : นางอัญชลี มาคิน

ปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีศึกษา)  
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉนวนกรณ์ ทับทิมใส

ปีการศึกษา : 2561

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบข้าวและศึกษาการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลู ด้วยวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบข้าว ทำการศึกษาคุณลักษณะองค์ประกอบของวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนโดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) เทคนิคฟูเรียสฟอร์มนอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) และ เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลู ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า  $\text{TiO}_2$  มีโครงสร้างลักษณะรูปร่างแบบอนาเทส การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้จากอัตราส่วน  $\text{TiO}_2$  5, 10 และ 15% โดยน้ำหนัก (5TS, 10TS and 15TS) พบว่าที่อัตราส่วน 10%  $\text{TiO}_2 @ \text{SiO}_2$  ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายไปทั่วรูพรุนของซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบข้าว เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไทเทเนียมเป็น 15% โดยน้ำหนัก ไทเทเนียมจะจับตัวเป็นก้อนเนื่องจากมีปริมาณมากเกินไป ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm 10%  $\text{TiO}_2 @ \text{SiO}_2$  พบว่ามีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงกว่า  $\text{TiO}_2$  แสดงว่า  $\text{SiO}_2$  สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งเชิงแสงของ  $\text{TiO}_2$  ได้ เนื่องจาก  $\text{SiO}_2$  เป็นวัสดุที่มีรูพรุนทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นโดยสมบูรณ์ที่ 10 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสม 10  $\text{TiO}_2 / \text{Fla} @ \text{SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ถึง 99.71 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 1 นาที

คำสำคัญ : วัสดุผสมอนุภาคระดับนาโน ไทเทเนียมไดออกไซด์ไดออกไซด์ ซิลิกา

**Title** : Nanocomposites of Titanium Dioxide into Silica Mesoporous  
from Rice Husk

**Author** : Mrs. Anchalee Makhin

**Degree** : Master Degree of Science (Chemistry Education)  
Rajabhat Maha Sarakham University

**Advisors:** Assistant Professor Dr.Patcharaporn Pimchan  
Assistant Professor Dr.Chanukon Tabtimsai

**Year** : 2018

#### ABSTRACT

The objectives of the research were to prepare the nanocomposites of Titanium Dioxide of mesoporous silica from rice husk and Titanium Dioxide banana extract in mesoporous silica from rice husk, to catalyze the reduction reaction of Methylene blue between the nanocomposites in Titanium Dioxide of mesoporous silica from rice husk and Titanium Dioxide banana extract from rice husk, to assess the qualities of the nanocomposites by X-ray diffraction (XRD), fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscope (SEM). The catalytic efficiency of photocatalytic reaction in catalyzing the reduction reaction of methylene blue was analyzed by UV-visible spectroscopy (UV-Vis). The research finding indicated that  $TiO_2$  analyzed by X-ray diffraction (XRD) was in anatase pattern. The nanocomposites with various ratio of  $TiO_2$  at 5, 10 and 15% by weight (5TS, 10TS and 15TS). The findings revealed that 10% $TiO_2@SiO_2$  nanocomposite was distributed widely in porous of mesoporous silica from rice husk at 15% of Titanium. Titanium was flocculated in case of over amount of nanocomposites. The efficiency in dissolving the concentration of Methylene blue solution was at 30 ppm 10% $TiO_2@SiO_2$ . The research findings indicated that the ability in digesting color of

Methylene blue extract was more than  $\text{TiO}_2$ . The findings indicated that  $\text{SiO}_2$  can increase the efficiency of light of  $\text{TiO}_2$  because  $\text{SiO}_2$  in porous substance the complete reaction in 10 minutes. Additionally, the efficiency of the composites of  $\text{TiO}_2@ \text{SiO}_2$  in dissolving methylene blue extract was 99.71% in 1 minute.

**Keywords:** Composite materials, Titanium dioxide, Silica

---

Major Advisor



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์ ประธานกรรมการ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉาณุกรณ์ ทับทิมใส กรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา ในด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบ ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.นุกูล กุดแกลง ผู้แทนจากบัณฑิต และ อาจารย์ ดร.อารีพร เบ้าอุพาล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่าง ยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมี และ สำนักงานเลขานุการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความ ช่วยเหลือและคำแนะนำด้านต่าง ๆ ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบให้ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และให้กำลังใจด้วยความรัก ความอบอุ่น ส่งเสริมด้าน การศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

นางอัญชลี มาคิน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ .....	ค
ABSTRACT .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) .....	7
2.2 วัสดุผสม (Composite Materials).....	8
2.3 วัสดุรูพรุน (Porous Materials).....	9
2.4 ซิลิกา (Silica : SiO <sub>2</sub> ).....	10
2.5 ซิลิกาที่สกัดได้จากแกลบและเถ้าแกลบ.....	12
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO <sub>2</sub> ).....	16
2.7 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic Process) .....	19
2.8 เมทิลีนบลู (Methylene Blue).....	25
2.9 สารฟลาโวนอยด์ (Phenolic Compounds).....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27

หัวเรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	32
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีใช้ในการวิจัย .....	32
3.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง .....	33
3.3 วิธีการวิจัย.....	33
3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารตัวอย่าง.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	36
4.1 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโน (TiO <sub>2</sub> ).....	36
4.2 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว (SiO <sub>2</sub> ).....	39
4.3 การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในซิลิกาจากแกลบ (TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> nanocomposite).....	41
4.4 ผลการเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบข้าว (TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> nanocomposite) .....	46
4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการเร่ง ปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลู.....	49
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม .....	63
ภาคผนวก .....	70
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและการคำนวณ .....	71
ภาคผนวก ข ภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	74
ภาคผนวก ค ภาพการดำเนินงานกิจกรรม .....	77
ผลงานวิจัย .....	86
ประวัติผู้วิจัย .....	87



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเกลบและถ้าเกลบ ..... 13
2.2	แสดงสมบัติทางกายภาพทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 17
4.1	ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของ $\text{SiO}_2$ และวัสดุนาโน $\text{TiO}_2 @\text{SiO}_2$ ..... 44
4.2	ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของ สารสกัดหยาบ และวัสดุนาโน $\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ..... 48
4.3	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ , $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ และ $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ภายใต้แสงจากธรรมชาติ ..... 49
4.4	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 ppm ด้วย $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ , $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ และ $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ภายใต้แสงจากธรรมชาติ ..... 51
4.5	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ , $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ และ $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ภายใต้แสงรังสียูวี ..... 57
4.6	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ , $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ และ $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ภายในที่มีด ..... 60

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปพรุนรูปแบบต่าง ๆ (a) แบบทรงกระบอก (b) แบบทรงกลม (c) แบบที่เป็นแผ่น และ (d) แบบที่บิดเป็นเกลียว .....	10
2.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) .....	15
2.3 ลักษณะโครงสร้างของรูปพรุนซิลิกา รูปพรุนซิลิกาชนิดแบบเปิด (ก) รูปพรุนซิลิกาชนิดแบบปิด (b) .....	15
2.4 ลักษณะทางกายภาพของผงของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.5 ภาพแสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์: รูไทล์ (a) อนาเทส (b) บรูคไคท์ (c) .....	17
2.6 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง ....	19
2.7 กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	22
2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเมทิลีนบลู .....	24
2.9 สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู .....	25
2.10 สูตรโครงสร้างหลักสารกลุ่ม Flavan .....	26
2.11 สูตรโครงสร้างของสาร Flavonoid .....	27
4.1 XRD patterns ของ อนุภาคนาโนไทเทเนียม ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ ) .....	37
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนไทเทเนียม ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ ) .....	38
4.3 XRD patterns ของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ ) .....	39
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ ) .....	40
4.5 แสดงภาพ SEM ของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ ) .....	41
4.6 XRD patterns ของ $\text{SiO}_2$ (a), $\text{TiO}_2$ (b) 5% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (c), 10% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ และ (d) 15% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (e) .....	42
4.7 FT-IR spectra ของ $\text{SiO}_2$ (a), 5% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (b), 10% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (c) และ 15% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (d) .....	44
4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของ $\text{SiO}_2$ (a), 5% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (b), 10% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (c) และ 15% $\text{TiO}_2@$ $\text{SiO}_2$ (d) .....	45

ภาพที่	หน้า
4.9 XRD patterns ของ 5%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (a), 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b) และ 15%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (c) .....	46
4.10 FT-IR spectra ของ SiO <sub>2</sub> (a), 5%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b), 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (c) และ 15%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (d) .....	48
4.11 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO <sub>2</sub> (a), TiO <sub>2</sub> (b) ,10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (c) และ 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ .....	50
4.12 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO <sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (a) SiO <sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (b) TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (c) TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (d) TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (e) และ TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (f) .....	51
4.13 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (a) และ 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ ....	52
4.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> .....	53
4.15 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วยวัสดุนาโน 5%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (a), 10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (b) และ 15%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ .....	54
4.16 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วยวัสดุนาโน 5%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (a), 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b) และ 15%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ .....	55
4.17 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO <sub>2</sub> (a), TiO <sub>2</sub> (b), 10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (c) และ 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงจากรังสียูวี .....	56
4.18 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO <sub>2</sub> (a) TiO <sub>2</sub> (b) 10%TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> (c) และ TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงจากรังสียูวี .....	58
4.19 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (a), และ 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b) ภายใต้แสงจากรังสียูวี .....	59
4.20 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 5%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (a),	

	10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (b) และ 15%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงรังสียูวี .....	60
4.21	การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 5%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (a), 10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (b) และ 15%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงรังสียูวี .....	61

ภาพที่	หน้า	
ข.1	เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี .....	75
ข.2	เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	75
ข.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	76
ข.4	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) .....	76
ค.1	แกลบหลังทำความสะอาด .....	78
ค.2	กระบวนการรีฟลักซ์แกลบ .....	78
ค.3	แกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์ .....	79
ค.4	นำแกลบข้าวใส่ในครุชีเบล เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง .....	79
ค.5	ซิลิกาจากแกลบข้าวมีลักษณะเป็นผงสีขาว .....	80
ค.6	ซิลิกาจากแกลบข้าว .....	80
ค.7	ซิลิกานำมาให้ความร้อนกับไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	81
ค.8	กวนวัสดุผสม TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> เป็นเวลา 19 ชั่วโมง .....	81
ค.9	วัสดุผสม TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง .....	82
ค.10	ซิลิกานำมาให้ความร้อนกับไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม .....	82
ค.11	กวนวัสดุผสม TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> เป็นเวลา 19 ชั่วโมง .....	83
ค.12	วัสดุผสม TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง .....	83
ค.13	ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย SiO <sub>2</sub> .....	84
ค.14	ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย TiO <sub>2</sub> .....	84
ค.15	ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub> .....	85
ค.16	ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub> .....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

#### 1.1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเข้าถึงข้อมูลข่าวสารและความรู้สามารถทำได้ง่ายขึ้นถือเป็นยุคแห่งข้อมูลข่าวสารที่กว้างไกล และการพัฒนานวัตกรรมต่าง ๆ จึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งในปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ให้ความสำคัญกับการพัฒนาในระดับโมเลกุลหรือระดับนาโนมากขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยในการเพิ่มผลผลิตให้ได้อย่างรวดเร็ว มีความคงทนและประหยัด (Zou, H et.al, 2016) ทำให้นาโนเทคโนโลยีได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยนาโนเทคโนโลยี อธิบายถึงการใช้วัสดุและโครงสร้างในระดับนาโนคือมีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร (Ullah, S et.al, 2015) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน เช่น ด้านพลังงาน (Light Emitting Diode : LED และ Quantum Caged Atoms : QCS) ที่ใช้นาโนเทคโนโลยีจะช่วยลดการใช้พลังงานเพื่อแสงสว่าง ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจในการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และกำลังมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพลังงานจากน้ำมันกำลังจะหมดไป ทุกประเทศจึงตระหนักถึงการพัฒนาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น และการประยุกต์การใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ใช้สารตัวนำแบบผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon) ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้มาก แต่ราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีราคาสูง เนื่องจากผลึกซิลิกอนประเภทนี้ก็เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วย จึงได้มีการค้นคว้าศึกษาวิจัยที่พยายามพัฒนาเพื่อลดราคาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ ซิลิกอนแบบไม่เป็นผลึก หรือ Amorphous Silicon แต่เนื่องจากซิลิกอนแบบไม่เป็นผลึก นั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่า และจะเสื่อมสภาพอายุการใช้งานเร็วกว่าซิลิกอนแบบผลึก จึงได้มีการพัฒนาสารประกอบตัวอื่น ๆ รวมถึงวิธีการต่าง ๆ ที่จะสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาต่ำ ซึ่งนาโนเทคโนโลยีก็มีส่วนร่วมในการพัฒนาเซลล์สุริยะดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ยังได้มีการใช้นาโนเทคโนโลยีในเซลล์เชื้อเพลิงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อช่วยลดปัญหาด้านการขาดแคลนเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ ด้านความปลอดภัยและความ

มั่นคง เทคโนโลยีสารสนเทศ ในด้านการเกษตร สำหรับนาโนเทคโนโลยี มีส่วนที่จะเข้ามาเกี่ยวข้องได้ในหลายขั้นตอน ตั้งแต่ในกระบวนการผลิตในแปลง ไปจนถึงการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปหรือเพิ่มมูลค่า ยกตัวอย่าง เช่น การพัฒนาปุ๋ยอินทรีย์เคมีนาโนอัดเม็ดแบบละลายช้า โดยจะค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารที่พืชต้องการออกมาอย่างช้า ๆ แต่ต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการเติบโตของพืช เพราะจะได้รับธาตุอาหารอย่างต่อเนื่องในปริมาณพอเหมาะและมีประสิทธิภาพสูงโดยมีการสูญเสียย่อยลง และที่สำคัญคือปุ๋ยในลักษณะคล้ายกันนี้ที่ไม่ได้ใช้เทคโนโลยีนาโน ก็มีขายอยู่ในตลาด แต่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ การที่เมืองไทยสามารถผลิตได้โดยใช้เทคโนโลยีของตนเองเช่นนี้ ทำให้ช่วยลดต้นทุน และน่าจะทำให้เกษตรกรสามารถหาซื้อมาใช้ได้กว้างขวางขึ้น ผลงานชิ้นนี้เป็นงานของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งทำได้สำเร็จแล้ว และกำลังอยู่ในระหว่างการขยายผลให้กว้างขวางขึ้น ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดหลายรายการที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยีหรือใช้วัสดุนาโนเป็นส่วนประกอบ เช่น กันเปื้อน กันกลิ่น ผ้าเคลือบสารกันน้ำ (เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของเทฟลอน) กันเชื้อแบคทีเรีย (ด้วยอนุภาคเงินนาโน) ผ้าฝ้ายที่ปรับผิวของเส้นใยเพื่อกันยับ (ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์นาโน) และผ้าผสมอนุภาคตัวนำไฟฟ้า เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์นาโนซิงค์-ออกไซด์นาโน ทำให้ไม่เก็บประจุไฟฟ้าสถิตด้านความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ริเริ่มพัฒนาแนวทางการดำเนินงานด้านความปลอดภัยและอาชีวอนามัยที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี โดยชูประเด็นหัวข้อใหม่ที่มีความสำคัญลำดับต้น ๆ วิกฤติที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยที่จะนำไปสู่การสร้างองค์ความรู้ ยุทธศาสตร์ และข้อเสนอแนะเพื่อการ ดำเนินงานความปลอดภัยและอาชีวอนามัยที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีด้านสุขภาพ การประยุกต์นาโนเทคโนโลยีที่สำคัญคือนาโนเทคโนโลยีด้านการแพทย์ (Nanomedicine) ซึ่งหมายถึง การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้เกี่ยวกับสุขภาพไม่ว่าจะเป็นการป้องกัน การคัดกรอง การเตือนล่วงหน้าและการรักษาโรคต่าง ๆ การวิจัยด้านการแพทย์นาโนนั้นมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก ตั้งแต่การใช้อนุภาค (Mandzy, N et.al, 2005) และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาและการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเคมีระดับโมเลกุล เป็นงานวิจัยด้านหนึ่งที่มีบทบาทและเป็นประโยชน์อย่างมาก ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเคมี และ ปิโตรเคมี ซึ่งจากการศึกษาโดยอาศัยความรู้ด้านนาโนเทคโนโลยีของวัสดุนาโนที่มีรูพรุน พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตรแสดงสมบัติพิเศษแตกต่างไป เช่น มีความว่องไวสูงและมีคุณสมบัติที่ดีในการเลือกเกิดปฏิกิริยาที่จำเพาะกับขนาดและรูปร่างของโมเลกุล ดังนั้นการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจโครงสร้างระดับนาโนเมตร อิทธิพลของโครงสร้างต่อสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพและกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีในระดับโมเลกุล (Bakardjieva, S et.al, 2004)

สารที่ได้รับความสนใจและศึกษาอย่างแพร่หลายชนิดหนึ่ง คือไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) มีความสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) สำหรับช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลภาวะทั้งในน้ำและในอากาศ มีสารพหุสัณฐานที่จำเพาะและมีพื้นผิวที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยผลึกนาโนของไทเทเนียมมีคุณสมบัติโฟโตคะตะไลต์ดี มีงานวิจัยศึกษา (อารีพร อ่อนตาม, 2557) การเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลต์ในการสลายสีย้อมได้มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) และรวมตัวในโมเลกุลของสีย้อมและทำให้สีของสีย้อมหายไป ไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกกระตุ้นด้วยโฟตอน (Photogenerated Electron) ทำให้วาเลนซ์แบนด์เกิดเป็นหลุมประจุบวกหรือวาเลนซ์โฮล ( $\text{h}^+_{\text{VB}}$ ) ในขณะเดียวกันน้ำจะให้อิเล็กตรอนแก่วาเลนซ์โฮล ซึ่งได้ก๊าซออกซิเจนและโปรตอน ( $\text{H}^+$ ) จากนั้นโปรตอนที่เกิดขึ้นจะไปรับคอนดักชันอิเล็กตรอน กลายเป็นไฮโดรเจนโมเลกุล (ศรัณู ชัยวิเชียร, 2555) โดยสมบัติการเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นกับรูปผลึก พื้นผิว รวมถึงขนาดอนุภาค ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ นอกจากนี้การใช้สารที่สามารถช่วยขนส่งอิเล็กตรอนเพิ่มในระบบก็เป็นอีกแนวทางในการช่วยเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้

การศึกษาการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ได้ขนาดอนุภาค พื้นผิว และรูปผลึกตามต้องการจึงสามารถต่อยอดนำไปสู่การใช้ประโยชน์ได้แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการควบคุมขนาดอนุภาค โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดในระดับนาโนที่ทำได้ยาก และต้องใช้อุปกรณ์และเทคนิคที่มีราคาแพง เช่น สารไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) เป็นสารที่มีราคาแพงซึ่งซื้อได้ยาก (ชลดา อธิการุณวงศ์, 2555, น. 45) พยายามเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโน โดยวิธีกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) กระบวนการพลาสมา (Cold Plasma) กระบวนการทำให้แห้งแบบละออง (Spray drying) กระบวนการ โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นต้น (Wantala, K et.al, 2010) ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องควบคุมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีข้อด้อย เนื่องจากมีอัตราการกลับไปรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole Recombination) สูง อีกทั้งยังมีช่องว่างระหว่างแถบสูง ทำให้เป็นข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโซล-เจล มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ซึ่งในการเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ต้องควบคุมค่า pH ให้ได้ และต้องใช้สารไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) เป็นสารที่มีราคาแพงซึ่งซื้อได้ยาก งานวิจัยนี้จึงพยายามที่จะเตรียม  $\text{TiO}_2$  ในระดับนาโน โดยวิธีที่ง่ายและประหยัด ซึ่งวิธีการควบคุมขนาดอนุภาคและพื้นผิวอย่างหนึ่งคือ การเตรียมวัสดุผสม (Hybrid) ระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในรูปของซิลิกา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าซิลิกาพบมากในเกลบข้าว (วีระพล ทับทิมดี, รัชฎ์ สุทธิ และธีรวัฒน์ เหล่านากุล, 2559,

น.144) และสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น เนื่องจากประเทศไทยรับประทานข้าวเป็นอาหารหลัก ทั้ง แกลบข้าวยังมีการใช้ประโยชน์น้อย

แกลบเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่มีในโรงสีข้าวและเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในปริมาณที่มากกว่าของ เสียจากการเกษตร ซึ่งเป็นวัสดุอุดมด้วยคุณค่าทางธรรมชาติสูง เช่น ซิลิคอน (Si), ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ซิลิคอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) และแกรไฟิน (G) นอกจากนี้สารประกอบเคมีที่อยู่ในแกลบมีทั้งสารประกอบ อินทรีย์ (74%) และสารประกอบอนินทรีย์ (26%) โดยสารอินทรีย์ประกอบไปด้วย Cellulose, Hemi cellulose, Lignin, L-arabinose, Methylglucuronic acid, D-galactose, วิตามิน และ โปรตีนบางชนิด ซึ่งสามารถกำจัดจากแกลบได้ในขั้นตอนการเผา สารอนินทรีย์หลักเป็น SiO<sub>2</sub> (80 %) สารอื่นเช่น Alumina (3.93 %), Sulfur Trioxide (0.78%), Iron oxide (0.41%), Calcium oxide (3.84 %), Magnesium Oxide (0.25 %), Sodium Oxide (0.67 %), Potassium Oxide (1.45 %) และน้ำ (8.56 %) (สุดาพร ตั้งควนิช, 2549) โดยซิลิกาเป็นสารประกอบหลักของสารประกอบอนินทรีย์ในแกลบซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากการแช่ด้วยกรดและผ่านการเผา จะได้ซิลิกาที่มีพื้นผิวรูพรุนสูงซึ่งได้

ได้รับความสนใจในการนำโลหะบรรจุในรูพรุนของซิลิกาและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเดชัน, ปฏิกิริยาเอซิเลชัน และปฏิกิริยาเบนซิลเลชัน (ธนาชัย จงสุวรรณไพศาล, 2009) จากลักษณะความเป็นรูพรุนของซิลิกาจากแกลบ จึงน่าจะสามารถใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับและควบคุมขนาดอนุภาคของสารที่ดูดซับได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ใช้สารที่ช่วยขนส่งอิเล็กตรอนได้ คือ ฟลาโวนอยด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากโครงสร้างอะโรมาติกเบนซีนฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenolic Compounds) เป็นกลุ่มของสารประกอบที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นฟีนิลเบนโซไพโรน (Phenylbenzopyrones) (วิภพ สุทรณะ, 2556)

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเตรียมวัสดุไทเทเนียมในระดับนาโนโดยใช้รูพรุนซิลิกาในการควบคุมขนาดและพื้นผิวและใช้ฟลาโวนอยด์เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาโดยเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นและสารสกัดจากฟลาโวนอยด์ที่ได้จากเปลือกกล้วยหอมที่มีการศึกษาว่ามีฟลาโวนอยด์ปริมาณมาก (พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์, ลัดดาวัลย์ จำเริญพัฒน์, 2547) โดยมุ่งหวังว่าสารสกัดฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมร่วมกับซิลิกาจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการกำจัดสีของเมทิลีนบลูได้

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาจากแกลบและไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบ



1.2.2 เพื่อศึกษาการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลู ด้วยวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาจากแกลบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 กระบวนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ ) สามารถเตรียมได้ดังต่อไปนี้

1.3.1.1 นำไทเทเนียมไดออกไซด์ (Carlo Erba' reagent ) 2 กรัม ไปอบไล่ความชื้นที่  $110\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.1.2 เผาที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.3.1.3 นำไปวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะผลึกด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR

1.3.2 การเตรียมสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม

1.3.2.1 นำพืชตัวอย่างมาทำความสะอาด แล้วผึ่งให้แห้ง จากนั้นหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปอบที่อุณหภูมิ  $80\text{ }^\circ\text{C}$  ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.3.2.2 ชั่งตัวอย่างพืชให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในทิมเบล ทิมเบลละ 30 กรัม นำไปสกัดด้วยชุดสกัดต่อเนื่อง (Soxhlet) โดยมีเมทานอลเป็นสารสกัด 4 ครั้ง

1.3.2.3 ทำการสกัดประมาณ 4 ชั่วโมง

1.3.2.4 นำสารสกัดที่ได้ไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบลดความดัน (Rotary Evaporator) จะได้สารสกัดหยาบซึ่งมี สารพลาไวโนอยด์

1.3.3 การเตรียมซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาจากแกลบข้าว (Rohani Abu Bakara, Rosiyah Yahya, Seng Neon Gan, 2015) สามารถเตรียมได้ดังต่อไปนี้

1.3.3.1 ล้างแกลบให้สะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.3.3.2 รีฟรักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริก เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

1.3.3.3 นำมาล้างน้ำจนหมดความเป็นกรดโดยตรวจสอบให้ มีค่า pH = 7 และอบแห้งที่  $100\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.3.3.4 นำแกลบมาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่แห้งที่มีฝาปิดสนิท นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, SEM และ FT-IR

1.3.4 การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในซิลิกา ( $\text{TiO}_2@SiO_2$  Nanocomposite)

1.3.4.1 อบผงซิลิกาที่ได้จากแคลบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.3.4.2 นำผงซิลิกา 0.2 กรัม ละลายใน ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร นำไปกวนต่อเนื่อง (Magnetic Stirring) 30 นาที และนำไป Sonication 1 ชั่วโมง

1.3.4.3 เติม ไอโซ-โพรพานอล 50 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที

1.3.4.4 เติมไททาเนียม ไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ ) อนุภาคนาโนในปริมาณ 0.01, 0.02 และ 0.03 กรัม

1.3.4.5 กวนสารผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 19 ชั่วโมง กรอง และล้างด้วย ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง

1.3.4.6 นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C 36 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ของสารจากอัตรา

ส่วนของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 5, 10 และ 15% เรียกว่า  $5\text{TiO}_2@SiO_2$ ,  $10\text{TiO}_2@SiO_2$  และ  $15\text{TiO}_2@SiO_2$

1.3.5 การเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารฟลาโวนอยด์ในซิลิกา ( $\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  Nanocomposite)

1.3.5.1 อบผงซิลิกาที่ได้จากแคลบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำผงซิลิกา 0.2 กรัม ละลายใน ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร กวนต่อเนื่อง (Magnetic Stirring) 30 นาที และ Sonication 1 ชั่วโมง

1.3.5.2 เติม ไอโซ-โพรพานอล 50 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที

1.3.5.3 เติมไททาเนียม ไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ ) อนุภาคนาโน 0.01, 0.02 และ 0.03 กรัม และสารสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยหอม ในปริมาณ 0.02 กรัม

1.3.5.4 นำสารผสมที่ได้ไปกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 19 ชั่วโมง นำสารผสมที่ได้ไปกรอง และล้างด้วย ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง นำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C 36 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ของสารจากอัตราส่วนของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 5, 10 และ 15% และสารสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยหอมเรียกว่า  $5\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$ ,  $10\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  และ  $15\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$

1.3.6 ศึกษาวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกา ( $\text{TiO}_2@SiO_2$  Nanocomposite) และวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารฟลาโวนอยด์ในซิลิกา ( $\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  Nanocomposite) ในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของ

เมทิลีนบลู ศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2@SiO_2$  และ  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  โดยศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลู ดังนี้

1.3.6.1 ชั่งวัสดุผสม  $\text{TiO}_2@SiO_2$  0.1 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 30 ppm 5 มิลลิลิตร

1.3.6.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

1.3.6.3 เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที ใน 30 นาทีแรกและทุก 30 นาที ใน 180 นาทีต่อมา

1.3.6.4 นำสารละลายตัวอย่างมาแยก โดยการปั่นเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

1.3.6.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวอย่างที่ 664 นาโนเมตร และคำนวณความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน

1.3.6.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  ทดสอบปฏิกิริยากับสารละลายเมทิลีนบลูในสถานะเดิม

1.3.6.7 วัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ ของเมทิลีนบลู ในสถานะเดียวกับการทดลอง

1.3.7 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งหมด ไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยเทคนิค XRD, FT-IR และ SEM

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถสังเคราะห์และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาจากแกลบ

1.4.2 สามารถสังเคราะห์และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี ในการสังเคราะห์และมีการใช้งานตามคุณสมบัติต่าง ๆ มากขึ้น โดยวัสดุนาโนเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญในการใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มผลิตภัณฑ์ เครื่องสำอางและตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น การวิจัยเรื่อง วัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทยเหนียมไดออกไซด์ ในวัสดุรูปทรงแท่งซิลิกาจากแกลบข้าว มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนของไทยเหนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยและซิลิกาจากแกลบ โดยมีการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้

#### 2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีหรือการประยุกต์ใช้ของอนุภาคหรือสิ่งที่มีขนาดเล็ก ในระดับ นาโนเมตร โดยประมาณในช่วง 1-100 นาโนเมตร โดยสิ่งนั้นมีคุณสมบัติที่เฉพาะก่อให้เกิดนวัตกรรมใหม่ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อพิจารณาจาก ขนาดที่เล็กมากถึง 1 ในพันล้านส่วน จะทำให้พื้นที่ผิว (Surface Area) ของสิ่งนั้นมีเพิ่มขึ้นด้วยและสามารถแทรกซึมไปในพื้นผิวได้ดี คุณสมบัติพิเศษของสารในระดับนาโนอาจแตกต่างกันไปตามชนิดของสารนั้น ๆ (วรางคณา วารีน้อยเจริญ, 2553) เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการหลากหลายสาขา ตั้งแต่เคมีสังเคราะห์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ จึงทำให้ยากต่อการระบุคำนิยามที่ครอบคลุมทั้งหมด ในปัจจุบันองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (The International Organization for Standardization: ISO) ได้ให้คำนิยาม “นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)” ว่าหมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เพื่อสังเคราะห์และควบคุมสสารในระดับนาโน เพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติและปรากฏการณ์เชิงโครงสร้างที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมาก ทำให้มีความแตกต่างไปจากคุณสมบัติของสสารในระดับอะตอมหรือโมเลกุลหรือวัสดุใหญ่ ส่วน National Nanotechnology Initiative (NNI) ประเทศสหรัฐอเมริกาให้ คำนิยาม “นาโนเทคโนโลยี” ว่าเป็นความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในการเข้าใจและควบคุมสสารที่มีมิติในระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งคุณสมบัติพิเศษของอนุภาคระดับนาโนทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ใหม่ ๆ ได้

สำหรับ “วัสดุนาโน (Nanomaterial)” หมายถึง วัสดุที่มีขนาดอย่างน้อยหนึ่งมิติเป็นขนาดนาโน หรือมีโครงสร้างของพื้นผิวหรือของโพรงภายในอยู่ในระดับนาโน กล่าวโดยย่อ วัสดุนาโนหมายถึงเนื้อวัสดุของวัสดุนาโน หรือเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโครงสร้างนาโน ทั้งนี้ วัสดุนาโนมีทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น อนุภาคของแร่ต่าง ๆ หรือที่เกิดขึ้นโดยบังเอิญ เช่น อนุภาคในควันไฟหรือในไอเสียจากเครื่องยนต์ และวัสดุนาโนที่ผลิตขึ้น (Engineered/Manufactured Nanomaterial) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการออกแบบและผลิตขึ้นอย่างเจาะจง ให้มีสมบัติเฉพาะและมีขนาดใกล้เคียงกัน ข้อห่วงกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยของวัสดุนาโนส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่ความปลอดภัยของวัสดุนาโนที่มนุษย์ผลิตขึ้น (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553, น. 2) วัสดุนาโน (Nanomaterials) หรืออนุภาคนาโน (Nanoparticles) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หรือวินิจฉัย และใช้ในการห่อหุ้มสาร (Encapsulation) เพื่อนำส่งในร่างกาย เป็นต้น ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้นาโนเทคโนโลยีได้แก่ ผลิตภัณฑ์ด้านสุขภาพต่าง ๆ เครื่องสำอาง ยา เวชภัณฑ์ เครื่อง นุ่งห่ม สินค้าประเภทอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มอีกด้วย การใช้นาโนเทคโนโลยีมาใช้ให้เกิดประโยชน์จำต้องมีความรู้ด้านวิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุนาโนหรืออนุภาคนาโนที่นำมาใช้ (วารสาร วารีน้อยเจริญ, 2553)

## 2.2 วัสดุผสม (Composite Materials)

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นหลัก (Matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจายแทรกตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลัก เป็นเหตุให้เนื้อวัสดุสุดท้ายมักมีส่วนที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน หรือที่เรียกกันว่ามีเฟสตั้งแต่ 2 เฟส ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาผสมกัน (ผกา มาศชูสิทธิ์ และกิตติพงษ์ สุวีโร, 2558)

### 2.2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุผสม (Classification of Hybrid Materials)

วัสดุผสมสามารถที่ถูกจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้โดยใช้อ็องค์ประกอบเป็นเกณฑ์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภท หลัก ๆ ดังนี้

2.2.1.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composite) เป็นวัสดุผสมที่มีใช้แพร่หลายที่สุด ประกอบด้วยสองเฟสหลักคือเฟสเนื้อพื้นและเฟสที่กระจายซึ่งเป็นเฟสเสริมแรงโดยที่เฟสที่กระจายสามารถเป็นเม็ดผง เส้นใยสั้น หรือ เส้นใยยาวก็ได้และสมบัติของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างสมบัติของวัสดุเนื้อพื้นและเฟสที่กระจาย

2.2.1.2 แซนด์วิช (Sandwich) เป็นวัสดุผสมที่วัสดุชนิดหนึ่งเป็นผิวด้านนอกและมีแกน

ด้านในซึ่งปกติเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและทำให้วัสดุแกนดียวมีสมบัติทางกลที่ดีโดยเฉพาะมีความสามารถในการต้านทานการบิดงอที่ดีและดีกว่าวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาประกอบเป็นผิวและแกนกลาง

2.2.1.3 โครงร่างแลตทิซ (Lattice) เป็นโครงสร้างที่ผสมกันระหว่างวัสดุและช่องว่าง โครงร่างแลตทิซแบ่งได้เป็นสองชนิดหลักๆ คือโครงสร้างที่รับแรงแบบบิดงอ (Bending Dominated Structure) และโครงสร้างที่รับแรงดึง (Stretch Dominated Structure)

2.2.1.4 โครงสร้างแบบชิ้น (Segment) แบ่งได้เป็นแบบ 1D 2D และ 3D และเพราะว่ามีโครงสร้างประกอบเป็นชิ้นๆ แยกกันอยู่และนำมาต่อกันทำให้วัสดุผสมแบบนี้มีความต้านทานความเสียหายที่ดีวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) สามารถถูกจำแนกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้โดยใช้เฟสที่กระจายเป็นเกณฑ์ในการจำแนกและโดยใช้เฟสเนื้อพื้นเป็นเกณฑ์ในการจำแนก

หากใช้เฟสที่กระจายเป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภท วัสดุเชิงประกอบสามารถที่ถูกจำแนกได้เป็นวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงโดยเม็ดผง (Particle-reinforced Composites) ประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวต่อเนื่องกันและมีการเสริมแรงและเพิ่มสมบัติให้กับเนื้อพื้นด้วยการเติมสารเสริมแรงแบบเม็ดผง อย่างเช่น เหล็กกล้าสเฟียรอยไคต์ ซึ่งมีเนื้อพื้นเป็นพอร์ไรต์ที่เป็นเหล็กมีความเหนียวสูงแต่ความแข็งและความแข็งแรงต่ำแต่ถ้ามีเม็ดผงของซีเมนไคต์ที่มีความแข็งสูงแต่เพราะมาเสริมแรงทำให้เหล็กกล้าสเฟียรอยไคต์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอร์ไรต์

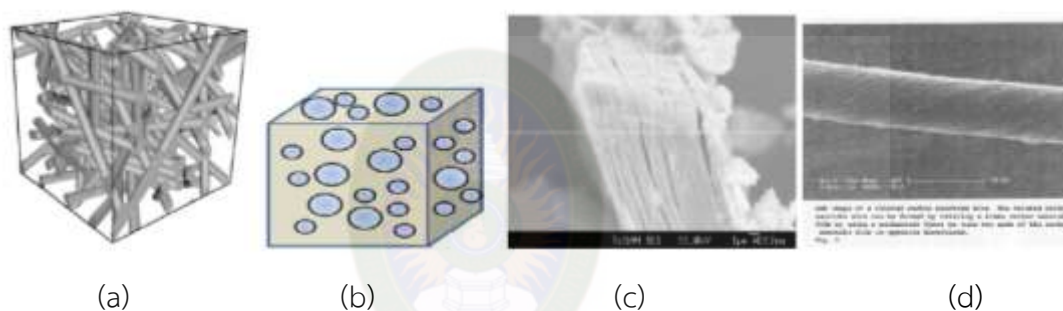
ในบางกรณีสมบัติที่ต้องการนำมาใช้เป็นสมบัติของตัวเสริมแรงโดยเฟสเนื้อพื้นมีหน้าที่ยึดติดเฟสที่กระจายไว้ด้วยกันเช่นวัสดุเชิงประกอบของทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงซึ่งเหมาะสำหรับทำเครื่องมือสำหรับตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งแล้วแต่ทั้งสแตนคาร์ไบด์มีความเพราะสูงและแตกหักง่ายแต่มีมีนำมาผสมกับโคบอลต์ในอัตราส่วนปริมาตรของโคบอลต์ประมาณ 10 – 15% ทำให้ได้วัสดุที่ยังมีความแข็งสูงแต่มีความต้านทานการแตกหักที่ดีขึ้นเพราะมีเนื้อพื้นโคบอลต์ที่มีความเหนียวและคอยดูดซับพลังงาน (คณวุฒิ ประมวลวุฒิธรณ และ จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, 2555, น. 1305-1312)

## 2.3 วัสดุรูพรุน (Porous Materials)

วัสดุรูพรุน (Porous Materials) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวคัดแยกโมเลกุล (Molecular Sieve) ได้มีการนำวัสดุรูพรุนมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน โดยนอกเหนือจากการใช้เพื่อเป็นตัวคัดแยกโมเลกุลแล้ววัสดุรูพรุนยังสามารถนำไปใช้ในวัตถุประสงค์แตกต่างจากการเป็นตัวคัดขนาดของโมเลกุลเช่น เป็นตัวคะตะลิสต์ สารดูดซับ เซ็นเซอร์ หรืออาจนำไปใช้ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาตรของที่ว่างในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุโดยทั่วไปวัสดุรูพรุน

จะ มีความพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.95 วัสดุรูพรุนมีโครงสร้างและสัณฐาน แบ่งได้หลายแบบ เช่น รูพรุนแบบ ทรงกระบอกแบบทรงกลม และแบบที่เป็นแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรูพรุนแบบที่เป็นทรงที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม ในรูพรุนอาจเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นรูพรุนแบบที่ปิดเป็นเกลียว (ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554, น. 60-69)

วัสดุรูพรุนมีโครงสร้างและสัณฐาน แบ่งได้หลายแบบ เช่น รูพรุนแบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบที่เป็นแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรูพรุนแบบที่เป็นทรงที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม ในรูพรุนอาจเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นรูพรุนแบบที่ปิดเป็นเกลียว ดังแสดงในภาพที่ 2.1



**ภาพที่ 2.1** รูพรุนรูปแบบต่าง ๆ (a) แบบทรงกระบอก (b) แบบทรงกลม (c) แบบที่เป็นแผ่น และ (d) แบบที่ปิดเป็นเกลียว. *ปรับปรุงจาก วัสดุรูพรุนคืออะไร* โดยภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

การนำวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กในระดับไมโครมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงาน และปัญหามลพิษทางอากาศ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุรูพรุนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับ เป็นตัวคัดขนาดโดยทั่วไปวัสดุรูพรุนสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามขนาดของรูพรุน ได้แก่ รูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Micropore) เมโซพอร์ (Mesopore) และมาโครพอร์ (Macropore) วัสดุไมโครพอร์ เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุน (อรอนงค์ จุลพันธ์, ธงไทย วิฑูรย์ และเมตตา เจริญพานิช, 2554, น. 103-120)

## 2.4 ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>)

ซิลิกามีสูตรทั่วไปคือ  $\text{SiO}_2$  เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวกันระหว่างอะตอมซิลิกอน และอะตอมออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสี หรือผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่นไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว 1170 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับรูปผลึกของซิลิกา ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกอนและซิลิเกต จะมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซิลิกามีโครงสร้างเป็นผลึกร่างตาข่าย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent Bond) ดังภาพที่ 2.2 อะตอมของซิลิกอนจัดเรียงตัวเหมือนกับคาร์บอนในผลึกเพชร แต่มีออกซิเจนคั่นอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนแต่ละคู่ (ณัฐยา ประมวลทรัพย์, 2557) ซิลิกาเป็นสารที่เฉื่อยไม่มีพิษใช้เป็นตัวดูดความชื้น ตัวดูดซับ และใช้เป็นวัสดุในการบรรจุคอลัมน์ในโครมาโตกราฟี ถ้าซิลิกามีความเป็นผลึกสูง เช่น ควอตซ์ จะมีโครงสร้างเหมือนรูปร่างสี่เหลี่ยมซึ่งซิลิกาจะจับกับออกซิเจน 4 อะตอม แต่ถ้าตกผลึกเร็วจะทำให้การจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นลักษณะของอสัณฐานซิลิกา มีหลายรูปแบบ เช่น 1) ซิลิกาเจลหรือซิลิกาพูนซึ่งผิวหน้าจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและอาจมีน้ำที่ดูดซับแบบกายภาพอยู่ 2) ซิลิกาที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ 3) คีเซลเลอร์จากเปลือกของไดอะตอมซึ่งเป็นพืชน้ำจืด สมัยโบราณสายพันธุ์ใกล้เคียงกับพวกสาหร่ายประกอบด้วยซิลิกาประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ถ้าต้องการนำซิลิกาจากไดอะตอมมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ก่อน 4) พูนซิลิกาเป็นซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงไม่พูนซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ  $\text{SiCl}_4$  ในเปลวไฟของออกซิเจนและไฮโดรเจน เมื่อเทียบระหว่างซิลิกากับอะลูมินา พบว่าอะลูมินาสามารถละลายได้ในกรด ในขณะที่ซิลิกาจะมีความเสถียรและเฉื่อยในระหว่างการทำปฏิกิริยาแบบแคลไซน์ ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาแบบมีพอร์ส MCM, MCF ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีพื้นที่ผิวสูง มีรูพูนขนาดใหญ่และมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการเร่งปฏิกิริยา Ki-Won, J. et.al. ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดของกระบวนการขจัดน้ำออกจากเมทานอลในปี 2002 โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา Gamma Aluminium Oxide ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) เกรดการค้า ซิลิกา-อะลูมินาโดยเปลี่ยนปริมาณการโหลดซิลิกาของอะลูมินาและทำการพัฒนา  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  จากวิธีที่ Ki-Won, J. et.al. ได้ทำการทดลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพบว่าซิลิกาของอะลูมินาเกรดการค้าที่โหลดปริมาณซิลิกา 1% ให้ค่าการแปลงผันสูงมากกว่าตัวอื่น ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมินาที่เตรียมได้นั้นมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย (Ki-Won et.al., 2002) จากนั้นได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยา Magnesium oxide-Zeolite Socony Mobil-5 ( $\text{MgO-ZSM-5}$ ) ได้มีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Sodium-Zeolite Socony Mobil-5 ( $\text{Na-ZSM-5}$ ) ที่อัตราส่วนของ Si/Al ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Na-ZSM-5 และ Hydrogen-Zeolite Socony Mobil-5 ( $\text{H-ZSM-5}$ ) ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ทุก



ๆ อัตราส่วน Si/Al นั้นมีโครงสร้างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Zeolite Socony Mobil-5 (ZSM-5) โดยที่อัตราส่วน Si/Al = 40 มีความเป็นผลึกต่ำสุดและพบว่ามีโดเมทิลอีเทอร์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนต่ำ ๆ และที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การเลือกเกิดเป็นโดเมทิลอีเทอร์มีค่าสูงสุดสำหรับทุก ๆ อัตราส่วนแต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแต่ละอัตราส่วนเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 80 ให้ค่าการเลือกเกิดสูงที่สุดแสดงว่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกากับอะลูมินามีผลต่อค่าการแปลงผันของการเกิดปฏิกิริยา (ศราวุธ ศรานันทรวงศ์, สุพจน์ พัฒนะศรี และปิยะสาร ประเสริฐธรรม) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา Silicon Aluminophosphat (SAPOs) เป็นวัสดุกลุ่มคล้ายซีโอไลต์มีลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบคล้ายกับ  $AlPO_4s$  ต่างกันตรงที่ SAPOs เป็นโครงสร้างผลึกที่มีทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกาเป็นองค์ประกอบรวมด้วยบางส่วนโดย Si จะเข้ามาแทนที่ P และจำนวนอะตอมของ Si และ P รวมกันยังคงเท่ากับ Al เนื่องจากโครงสร้าง Tetrahedral ของซิลิกาไม่มีประจุการที่ Si มาแทนที่ P ใน  $AlPO_4s$  จึงทำให้  $(AlO_4)$  ที่ติดกับ  $(SiO_4)$  ไม่ถูกดุลประจุจึงมีประจุลบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างขึ้นกับปริมาณ Si ที่มีอยู่ในโครงผลึกของ SAPOs จึงมีประจุลบ จากการที่มีประจุลบในโครงสร้าง SAPOs จึงต้องการไอออนบวกเพื่อดุลประจุภาพในโครงสร้างเช่นเดียวกับซีโอไลต์ทั่วไปทำให้ SAPOs มีความเป็นขั้วมากกว่า  $AlPO_4s$  และมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน SAPOs ที่มีโครงสร้างผลึกมากสามารถแลกเปลี่ยนไอออนเป็น  $H^+$  ซึ่งทำให้ได้กรดบรอนสเตทในโครงสร้างและสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอย่างอ่อนได้ซึ่งต่อมามีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดเมทิลอีเทอร์ จากก๊าซสังเคราะห์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $CuO-ZnO-Al_2O_3/SAPO-11$ ,  $CuO-ZnO-ZrO_2/SAPO-11$  และ  $CuO-ZnOMnO/SAPO-11$  ซึ่งในตอนแรกนั้นได้ทำการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา  $CuO-ZnO-Al_2O_3$ ,  $CuO-ZnO-ZrO_2$  และ  $CuO-ZnOMnO$  พบว่าเมื่อนำ 3 ตัวนี้มาทดสอบปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของปฏิกิริยาและเมื่อนำ SAPO-11 และ  $\gamma-Al_2O_3$  มาทดสอบปฏิกิริยาพบว่า SAPO-11 ให้ค่าร้อยละผลได้ของปฏิกิริยาสูงกว่า  $\gamma-Al_2O_3$  ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงโดยนำ SAPO-11 มาเป็นตัวสนับสนุนให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัวดังกล่าวซึ่งพบว่า  $CuO-ZnO-ZrO_2/SAPO-11$  และ  $CuO-ZnOMnO/SAPO-11$  ให้ค่าร้อยละผลได้สูงใกล้เคียงกันและยังมากกว่า  $CuO-ZnO-Al_2O_3/SAPO-11$  อีกด้วยซึ่งนั่นก็กล่าวได้ว่า SAPO-11 เป็นตัวสนับสนุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี (ณัฐพร ขบา, 2556)

สำหรับในกระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบนั้นในการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์นั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรจะมีพื้นที่ผิวที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและควรจะมีค่าความเป็นกรดที่พอเหมาะเนื่องมาจากลดปัญหาการเกิดโค้กของตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจในที่จะนำมาศึกษาการสังเคราะห์การเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสมระหว่างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกา

## 2.5 ซิลิกาที่สกัดได้จากแกลบและเถ้าแกลบ

### 2.5.1 แกลบและเถ้าแกลบ

แม้ปัจจุบันข้าวจะไม่ใช้สินค้าที่ทำรายได้หลักเข้าประเทศเหมือนเช่นในอดีตแต่ประเทศไทยก็ยังเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลกซึ่งชี้ให้เห็นว่าประเทศไทยมีผลผลิตข้าวมากเพียงใดข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสีจะได้เมล็ดข้าวกับเปลือกข้าวหรือแกลบ โดยแกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 22.5-25.2% ของข้าวเปลือกและการใช้ประโยชน์จากแกลบวิธีหนึ่งคือการใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3880 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ขณะที่ค่าความร้อนเฉลี่ยของไม้พืชมีค่า 4475 กิโลแคลอรี/กิโลกรัมไม่แตกต่างกันมากนัก นักวิทยาศาสตร์พบว่าในเถ้าแกลบมีซิลิกา (Silica, SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบประมาณ 70-90% และเถ้าแกลบมีความพรุน (Porosity) มากน้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก มีสมบัติดูดซับ (Absorbent) ดี อีกทั้งมีสมบัติเป็นฉนวนด้วยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีสินค้าจากภาคการเกษตรหลายชนิดติดอันดับต้นๆ ในตลาดโลกและหนึ่งในนั้นก็คือ “ข้าว” ซึ่งข้าวจากประเทศไทยเป็นที่ยอมรับและนิยมกันมากด้วยคุณภาพและมาตรฐานที่ขึ้นชื่อทำให้แต่ละปีประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวเป็นจำนวนมากจึงไม่ใช่เรื่องแปลกที่อุตสาหกรรมการผลิตข้าวจะเป็นอุตสาหกรรมใหญ่่อีกประเภทหนึ่งที่มีวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตข้าวในแต่ละขั้นตอนโดยเฉพาะในขั้นตอนของการสีข้าวเปลือกจะมีแกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณค่อนข้างมากเฉลี่ยในแต่ละปีจะมีปริมาณแกลบเหลือทิ้งถึงปีละกว่า 7 ล้านตัน แกลบที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวเปลือกนั้นได้มีความพยายามที่จะนำแกลบไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่นเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนหม้อต้มไอน้ำเพื่อนำไอน้ำไปใช้ในโรงสกัดน้ำมันรำเครื่องอบข้าวเปลือกและผลิตไฟฟ้าอาหารสัตว์วัสดุปรับปรุงดินวัสดุเพาะกล้าไม้แต่ยังมีแกลบอีกจำนวนมากต้องนำไปกำจัดซึ่งปัจจุบันใช้วิธีฝังกลบทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำและทางอากาศ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงต้องมีการศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของแกลบพบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่คือเส้นใยหยาบและแร่ธาตุหลักคือซิลิกาซึ่งมีราคาและมูลค่าสูงเพราะเป็นสารที่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายแขนงเช่นใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงตึงผิวและการกระจายตัวของยาชนิดที่เป็นของเหลวใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมน้ำมันและปิโตรเคมีใช้เป็นฉนวนกันความร้อนใช้เป็นสารดูดซับความชื้นซึ่งจะช่วยในการเก็บรักษาอาหารแห้งหรือฝุ่นละอองขนาดเล็กเป็นต้น ส่วนสารเพอพิวโรลซึ่งสกัดได้จากเส้นใยหยาบจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟลูออไรด์สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตไนลอนและเป็นวัตถุดิบในการผลิตฟีนอลิกเรซินแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 30

และสามารถสกัดออกมาเพื่อนำไปใช้ทดแทนซิลิกาทางการค้าได้โดยองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1

องค์ประกอบทางเคมีของแกลบและเถ้าแกลบ

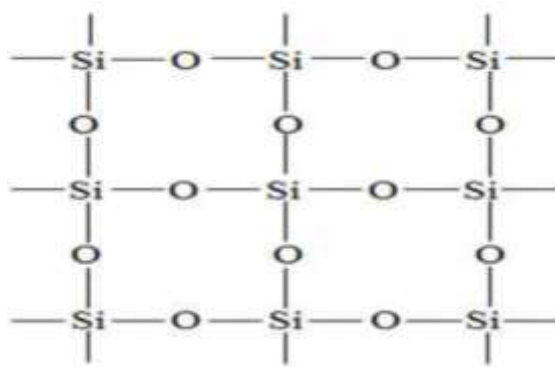
องค์ประกอบทางเคมี	แกลบและเถ้าแกลบ
ความชื้น (%)	7.6-10.2
ไขมัน (%)	1.4-3.7
เส้นใยหยาบ (%)	0.1-0.8
คาร์โบไฮเดรตที่ใช้ประโยชน์ได้ (%)	35.0-46.0
เถ้า (%)	13.2-21.0
ซิลิกา (%)	18.8-22.3
แคลเซียม (%)	0.6-1.3
ฟอสฟอรัส (%)	0.3-0.7
เส้นใยอาหาร (สกัดโดยฟอกเป็นกลาง) (%)	66-74
เส้นใยอาหาร (สกัดโดยฟอกเป็นกรด) (%)	58-62
ลิกนิน (%)	9-20
เซลลูโลส (%)	28-36
เพนโทเซน (%)	21-22
เฮมิเซลลูโลส (%)	12
สารอาหารที่ย่อยได้ทั้งหมด (%)	9.4

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก การสังเคราะห์ไคเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซิลิกา จากแกลบเป็นองค์ประกอบ, โดย ญัฐพร ขบา, 2556, ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นักวิทยาศาสตร์ได้นำซิลิกาจากแกลบมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกา เช่น ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างซิลิกาให้มีการจัดเรียงโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการซึ่งวัสดุใหม่ที่เราเรียกว่าวัสดุนาโนนั้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวและมีโครงสร้างที่แตกต่างกันมีรูพรุนขนาดนาโนเมตรตามที่ต้องการนอกจากเทคนิคการควบคุมโครงสร้างแล้วก็ยังมีเทคนิคการปรับผิวสัมผัสของวัสดุนาโนให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การเพิ่ม-ลด การมีขั้วการฝังตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวเป็นต้นซึ่งในปัจจุบันวัสดุนาโนที่ผ่านการปรับสภาพผิวมีการนำไปใช้งานอย่าง

แพร่หลายโดยใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมวัสดุแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งงานด้านการวิเคราะห์และบำบัดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อมนิยมใช้วัสดุดูดซับทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ รวมมูลค่าหลายร้อยล้านบาทต่อปีตั้งนั้นการผลิตวัสดุดูดซับจากซิลิกาแคลบจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการนำเข้าและประหยัดเงินตราของประเทศได้ซึ่งได้มีผู้วิจัยและพัฒนาวัสดุนาโนจากแคลบที่เหลือใช้จากภาคการเกษตรโดยวัสดุนาโนชนิดใหม่นี้มีโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์มีขนาดรูพรุน 3 นาโนเมตร จัดเรียงตัวลักษณะคล้ายรังผึ้งมีพื้นที่ผิวสูงทนความร้อนได้ดีเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับซึ่งโครงการวิจัยดังกล่าวได้พัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารระเหยซึ่งเป็นมลพิษในอากาศโดยวิธีปรับปรุงผิวลดการมีขั้วของวัสดุนอกจากนี้ยังมีการทำการวิจัยนำซิลิกาจากแคลบมาผลิตพอลิเมอร์ โดยได้พัฒนานาโนซีโอไลต์โดยการผลิตขึ้นจากซิลิกาที่ได้จากการเผาแคลบและผสมอะลูมิเนียมแล้วใช้ซีโอไลต์ ดังกล่าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยน “โพรเพน” (Propane) ให้เป็น “โพรพีน”(Propene) สารที่ใช้ผลิตเป็นพอลิเมอร์ งานวิจัยนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับซื้อซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แคลบที่เป็นวัสดุราคาถูกในการผลิตแทนซึ่งประเทศไทยได้มีการนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาถึงปีละ 800 ล้านบาทการวิจัยและพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรโดยการนำเทคโนโลยีเข้ามาปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพหรือสังเคราะห์วัสดุใหม่ ๆ ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้นนอกจากจะเป็นการลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดการนำเข้าของสินค้าบางประเภทแล้วในอนาคตเทคโนโลยีต่าง ๆ เหล่านี้ก็จะถูกนำมาดัดแปลงและใช้กับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หรือสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากยิ่งขึ้น

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแคลบและแก้วแคลบพบว่าในแคลบและแก้วแคลบนั้นมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบและได้มีการศึกษาและทำการวิจัยนำแคลบและแก้วแคลบมาสกัดเอาซิลิกาและนำซิลิกาที่ได้นี้มาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาหรือกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ซีโอไลต์ซิลิกา/อะลูมินา ในการนำแคลบและแก้วแคลบมาสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกทางหนึ่งนอกจากนั้นยังเป็นการลดปริมาณวัสดุเหลือใช้โดยการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้ก่อเกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าอีกด้วย (ณัฐพร ขบา, 2556)



**ภาพที่ 2.2** ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ปรับปรุงจาก *Extraction of Silica from RiceHusk* (pp. 69-74). โดย Bajirao S. Todkar, Onkar A. Deorukhkar and Satyajeet M. Deshmukh, 2016, International Journal of Engineering Research and Development.

ชนิดรูพรุนของซิลิกาสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ ดังนี้

1. รูพรุนซิลิกาแบบเปิด (Open-cell Foam) โดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุมีรูพรุนต่อเนื่องกันเป็นเน็ตเวิร์ค มีความพรุนตัวสูงมากโดยเฉลี่ยมีช่องว่างภายในถึงร้อยละ 75-95
2. รูพรุนซิลิกาแบบปิด (Closed-cell Foam) นั้น ผนังเซลล์แต่ละเซลล์จะแยกออกจากกันไม่ต่อเนื่องเหมือนกับแบบรูพรุนเปิด ทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ การใช้งานสามารถนำมาเป็นวัสดุก่อสร้าง ซึ่งรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก

ดังนั้นในการนำวัสดุรูพรุนไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น เป็นตัวดูดซับ เป็นคะตะลิสต์และเซ็นเซอร์นั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะในวัสดุที่มีรูพรุนเป็นแบบเปิดเท่านั้น ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนแบบปิดจะไม่สามารถนำมาใช้ในงานตามที่กล่าวมาข้างต้น ได้วัสดุรูพรุนที่เป็นแบบปิดสามารถนำมาใช้ในงานจำพวก การใช้เป็นวัสดุในการเก็บเสียงการเป็นฉนวนกันความร้อน หรือเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา ([สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2558](#))



**ภาพที่ 2.3** ลักษณะโครงสร้างของรูพรุนซิลิกา รูพรุนซิลิกาชนิดแบบเปิด (a) รูพรุนซิลิกาชนิด

แบบปิด (b). ปรับปรุงจาก *วัสดุพูนคืออะไร* (60-69), โดย ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

## 2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, $TiO_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์หลายอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตาไลซิส (Photocatalysis) เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบปกติ (ไม่ใช้แสง) ได้ดีอีกด้วยซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาเช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซิน, สารประกอบคลอรีน) เป็นต้น (ศรัณูญ ชัยวิเชียร, 2555)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากเป็นสารเคมีที่เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี ราคาไม่แพง และไม่ละลายน้ำทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความโปร่งแสง จึงทำให้แสงส่องผ่านได้เป็นอย่างดี มีพื้นที่ผิวหน้าสูงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกาะติดผิว มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดการกัดกร่อน อีกทั้งไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม (ศศิมา จันสุ, 2556)

### 2.6.1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีสีขาวเสถียรมากไม่ว่องไวต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่เป็นพิษ ไม่เหลืองคล้ำ ไม่มีกลิ่น และมีความสามารถในการดูดซับถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสารที่ปลอดภัย สารชนิดนี้พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่สีทาบ้านไปจนถึงเครื่องสำอาง



**ภาพที่ 2.4** ลักษณะทางกายภาพของผงของไทเทเนียมไดออกไซด์. ปรับปรุงจาก การสังเคราะห์ คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์และสมบัติการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง, โดย ศศิมา จันสุ, 2556, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

### ตารางที่ 2.2

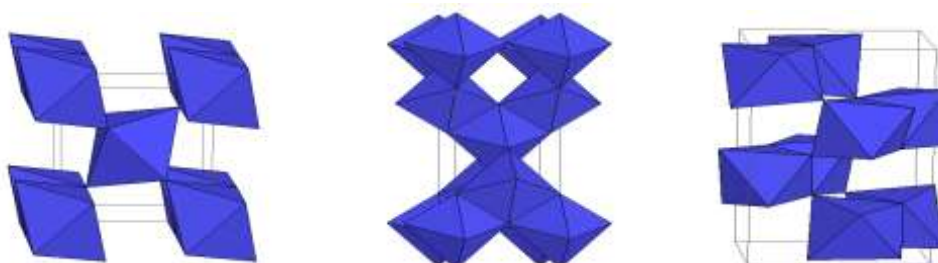
แสดงสมบัติทางกายภาพทั่ว ๆ ไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชื่อ	Titanium dioxide
สูตรโมเลกุล	TiO <sub>2</sub>
น้ำหนักโมเลกุล	79.9 g/mol
ลักษณะและสี	ของแข็งสีขาว
จุดเดือด	2,500 °C
จุดหลอมเหลว	1,830 °C

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก การสังเคราะห์คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์และสมบัติการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง, โดย ศศิมา จันสุ, 2556, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

### 2.6.2 โครงสร้างและสมบัติของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาตินั้นมีโครงสร้างผลึก 3 ชนิดหลัก คือ อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) และรูไทล์ (Rutile) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล



(Tetragonal) โครงสร้างผลึกอนาเทสรูไทล์และบรูคไคท์สามารถแสดงได้ในรูปของ  $\text{TiO}_2$  ที่เป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอลโดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอลในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลและโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลโดยโครงสร้างของผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.5

(a) (b) (c)

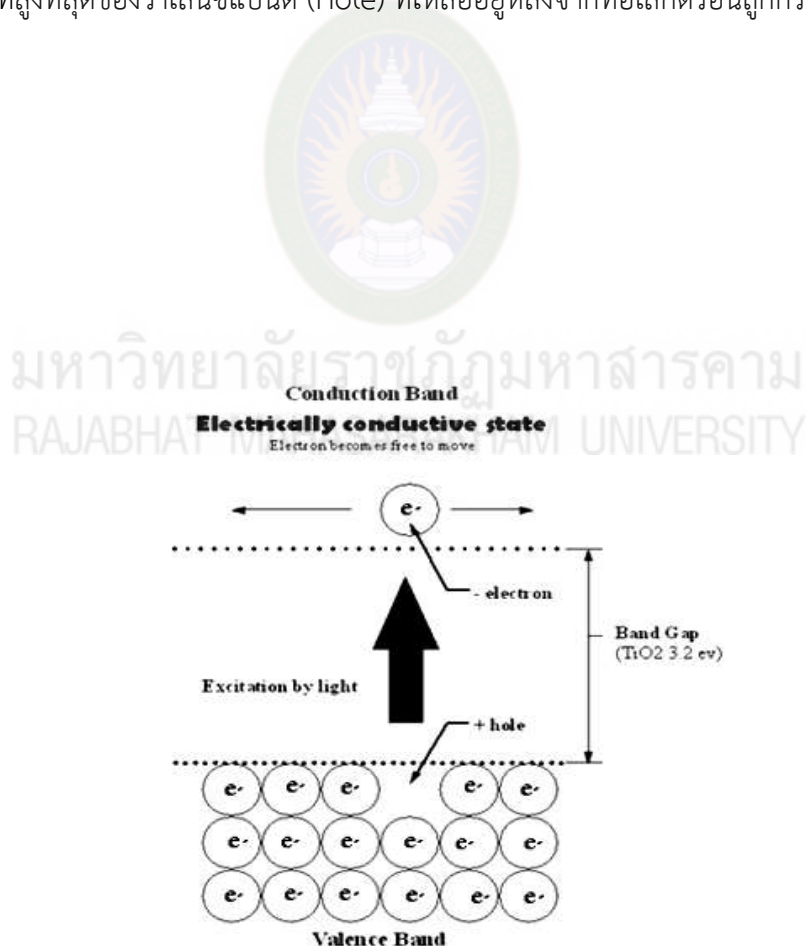
**ภาพที่ 2.5** ภาพแสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์: รูไทล์ (a) อนาเทส (b) บรูคไคท์ (c). ปรับปรุงจาก *ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์* (44-53). โดย ชลดา อธิการณวงศ์, 2554, ยะลา: มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้วแต่ออนาเทสและรูไทล์ เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาเทส สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียสนับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสและตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสง) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้วยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้แก่ความดัน ปริมาณของผลึกความไม่สมบูรณ์ของผลึกและขนาดของผลึกในการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโครงสร้างผลึกทั้งอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา กันโดยทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสโดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาโครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสโดยทั้งนี้ทั้งนั้นยังมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่พื้นที่ผิวการกระจายตัวของรูพรุนขนาดของอนุภาคผลึกและที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

### 2.6.3 สมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส



เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกันซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction Reaction) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแถบต้องห้าม (Band Gap Energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพลังงานแถบต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับโดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited Electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของวาเลนซ์แบนด์ (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว



ภาพที่ 2.6 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง.

ปรับปรุงจาก การสังเคราะห์คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์และสมบัติ การเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง, โดย ศศิมา จันสุ, 2556, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะคือมีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงานทำให้เกิดเป็นระดับ พลังงานแถบต้องห้ามหรือแบนด์แก๊ปซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ ถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นที่ผิว ของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุดความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิดอนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทาง อิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้มีค่าพลังงานแถบต้องห้ามแตกต่างกันคือ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึก อนาเทสและ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสง เริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกันโดยโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วง ความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา โฟโตแคตาไลซิส (อารีพร อ่อนตาม, 2558)

## 2.7 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic Process)

คำว่า โฟโตคะตาไลสต์ (Photocatalyst) เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ “โฟโต (Photo)” ที่ใช้นำหน้าคำที่แสงมาเกี่ยวข้องด้วย และ “คะตาไลสต์ (Catalyst)” ที่เป็นกระบวนการที่อนุภาคของ สารมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อ สิ้นสุดกระบวนการ และเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (The Activation Energy) ว่าสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst)

### 2.7.1 ความหมายของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวมันเอง (สรรรค์ จิตรใคร่ควร, 2009, น. 21)

### 2.7.2 หลักการของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงปฏิกิริยา (Fundamental of photocatalysis reaction)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic Process) เป็นกระบวนการเร่ง ปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงโดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำหน้าที่ลด

พลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาจะเรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงจะประกอบไปด้วยปัจจัยที่สำคัญคือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
2. พลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. น้ำ
4. ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่น ๆ

นอกจากนี้การฉายแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงนั้นยังเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$E$  = พลังงานควอนตัม (Quantum Energy (จูล))

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

$v$  = ความถี่ของคลื่นแสง (เฮิรตซ์หรือวินาที<sup>-1</sup>)

$c$  = ความเร็วของคลื่นแสง =  $2.997 \times 10^8$  (เมตร/วินาที)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

### 2.7.3 ชนิดของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงสามารถแยกได้ 2 ประเภทเมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงดังนี้

2.7.3.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Photocatalysis) คือตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงอยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลวตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจนทำให้ง่ายต่อการศึกษาแต่มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสถียรภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.7.3.2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Photocatalysis) คือตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินด้วยแสงอยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยาเช่นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลวการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆ

อย่างเช่นปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ยาเชื้อเพลิงเส้นใยสังเคราะห์ตัวทำละลายซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

#### 2.7.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้แก่

2.7.4.1 โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดงโครเมียมนิเกิลเป็นต้น

2.7.4.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นต้น

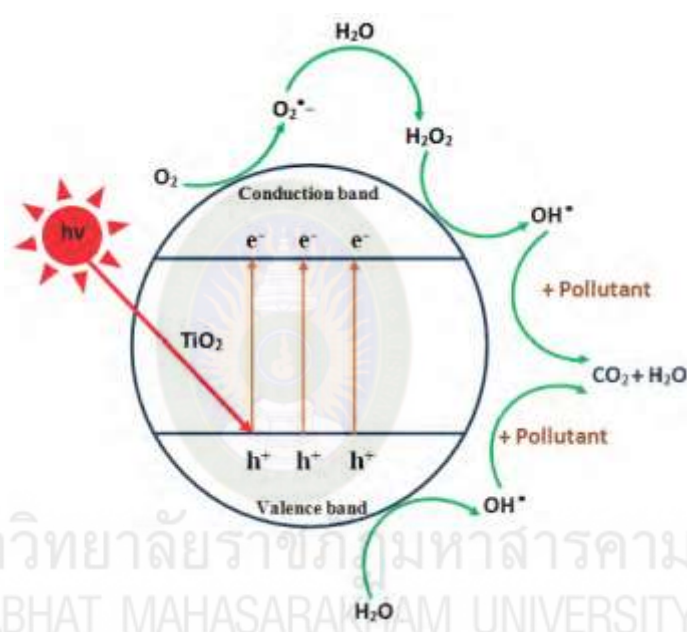
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกันโดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่า แบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง (h) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะว่ามีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวใหม่ของ e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup> ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากเพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอนโฮล แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ป ของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์ (กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร, 2553)

#### 2.7.5 กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสารอินทรีย์โดยทั่วไปนั้นจะเกิดจากการที่บริเวณผิวของสารประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีช่องว่าง (hole) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) และน้ำ (H<sub>2</sub>O) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH<sup>•</sup>) และเรดิคัลตัวอื่นส่วนที่บริเวณผิวของสารประเภทโฟโตแคตตาลิสต์ที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำ (H<sub>2</sub>O) กับซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) โดย

สามารถเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) ได้อีก ในขณะที่สภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนไม่เพียงพอจะทำให้โปรตอน ( $\text{H}^+$ ) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำเข้ามารับอิเล็กตรอนแทนเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล ( $\text{H}^\cdot$ ) โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจนเรดิคัลจะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิแดนซ์หลักในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเนื่องจากไฮโดรเจนเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) และช่องว่างที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีคุณสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดส์ของช่องว่างกับไฮดรอกไซด์ไอออนจะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลและขณะเดียวกันช่องว่างเกิดการออกซิไดส์กับสารอินทรีย์ด้วย แสดงดังภาพ 2.6

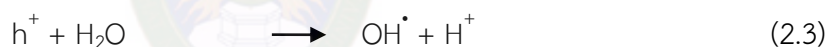


**ภาพที่ 2.7** กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์. ปรับปรุงจาก *Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO<sub>2</sub>* (pp. 317-322), โดย Nezameddin Daneshvar, Ezzatollah Salari, Alireza Khataee, 2004, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.

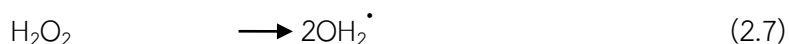
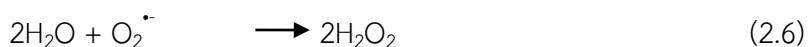
ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดจากการที่แสงที่มีพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence Band) ของอนุภาคที่เป็นวัสดุเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหลุดออกจากตำแหน่งซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pairs,  $e^-/h^+$ ) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบคอนดักชันได้ง่ายและรวดเร็ว

เพราะว่าไม่มีแถบช่องว่างพลังงานจึงเป็นสาเหตุให้  $e^-/h^+$  รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ  $e^-/h^+$  ในสารกึ่งตัวนำจะเกิดได้ยากเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานของโลหะตัวนำสารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยได้แก่ระดับแถบช่องว่างพลังงานระดับพลังงานแถบคอนดักชันและระดับพลังงานแถบเวเลนซ์ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี  $h^+$  โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ , Hydroxylradical) ดังสมการ 2.2-2.3 ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์และอนินทรีย์อื่น ๆ ตัวอย่างของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่โฮลและไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้หมด แสดงได้ดังสมการ 2.9-2.11 ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ( $\text{O}_2^\cdot$ ) ดังสมการ 2.4-2.5 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการ 2.6-2.8 ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้อิออนไฮดรอกไซด์น้ำและมลพิษที่เป็นตัวให้ของตัวพาประจุในสารกึ่งตัวนำ (ศรัญญู ชัยวิเชียร, 2555)

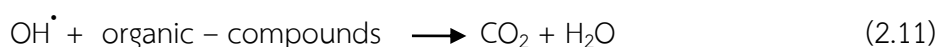
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



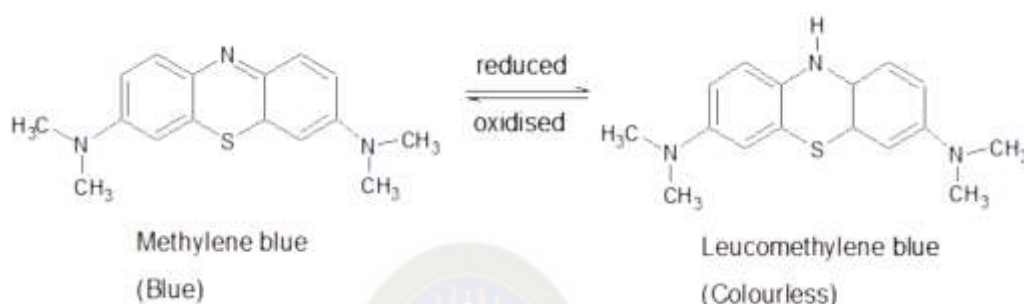
การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้หมด



และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดหรือตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้รับพลังงานโฟตอนแล้วจะทำให้เกิดการรวมกันอีกครั้งหนึ่งของอิเล็กตรอนและโฮล ( $e^-/h^+$  Recombination) ได้เป็นพลังงานความร้อน ดังสมการ 2.12 (ศศิมา จันสุ, 2556)



**ภาพ 2.8** กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเมทิลีนบลู. ปรับปรุงจาก *Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water* (pp. 145-157), โดย Ammar Houas, Hinda Lachheb, Mohamed Ksibi, Elimame Elaloui, Chantal Guillard and Jean-Marie Herrmann, *Applied Catalysis B: Environmental*.

## 2.7.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและภายในต่าง ๆ กล่าวคือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยภายนอก (Extrinsic Parameter) ได้แก่ การควบคุมสภาวะต่าง ๆ ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เช่น ความเข้มแสง (Light Intensity) ความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ค่า พี-เอช (pH) ของสารละลาย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Loading) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นต้น ในส่วนของปัจจัยภายใน (Intrinsic Parameter) และลักษณะทางกายภาพและเคมีจะเกี่ยวข้องกับสมบัติเฉพาะตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โครงสร้างผลึก ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวที่มีผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยปัจจัยภายนอกและภายในสามารถอธิบายได้ดังนี้ (Andreozzi, Insola, Caprio, Marotta, Tufano, 1996, pp. 75-81)

### 2.7.6.1 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic Parameters) ได้แก่

1) ความเข้มแสง (light Intensity) และ ความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการ

กระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮล ความเข้มแสงที่เหมาะสมในกระกระตุ่นอาจอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่นไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี กล่าวคือ โครงสร้างอะนาเทสและรูไทล์มีแถบความช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โดยโครงสร้างอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

2) อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction Temperature) อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถเกิดในอัตราที่ต่ำหากอุณหภูมิในปฏิกิริยาสูงหรือต่ำเกินไป เนื่องจากอัตราการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Recombination) จะเกิดได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นความร้อน และการดูดซับ (Adsorption) บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

3) ค่าพีเอชของสารละลาย (pH Solution) มีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับ (adsorption) สารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถเพิ่มหรือลดปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่พื้นผิวซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล นอกจากนี้แล้วค่าพีเอชยังมีอิทธิพลต่อค่าความเสถียรในการกระจายตัวของสารละลายผสมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารประกอบอินทรีย์ (Dispersion Stability)

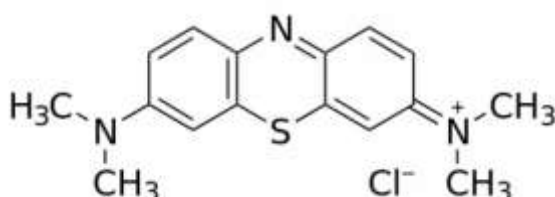
4) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Loading) หากมีมากเกินไปจะทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากมีความทึบแสงมากทำให้ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาลดลง โดยปกติแล้วปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อปริมาตรน้ำจะใช้ 1 กรัมต่อลิตร เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดีที่สุด (นัตตา เวชชากุล, 2555, น. 28)

## 2.8 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

เมทิลีนบลู (Methylene Blue) ชื่อ IUPAC ของเมทิลีนบลู คือ 3,7-bis (Dimethylamino-phenolthiazin-5-ium Chloride สูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_{16}H_{18}N_3SCl$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 319.85 g/mol ลักษณะทางกายภาพเป็นผลึกสีน้ำเงิน (ภัทรานิตร์ ทองเทพ, 2558, น. 36) เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สีบางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่าสีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจนอกจากนี้พิษของเมทิลีนบลูอาจทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำและบริเวณใกล้เคียงดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ (อารีพร อ่อนตาม, 2558)



เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประเภทดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) สูตรโครงสร้างแสดง ดังภาพที่ 6 เมทิลีนบลู มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีเขียวเข้มละลายได้ดีในน้ำและละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้มเมทิลีนบลู เป็นสารอินทรีย์ที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นสีย้อม ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นยารักษาโรคในมนุษย์และยารักษาโรคในปลาเป็นต้น (จิรวรรณ พิจารย์, วาสนา พันชน, มิกิ กัณณะ, สราวุฒิ สมนาม และ สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2558, น. 174-185)

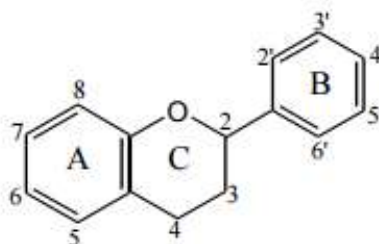


**ภาพที่ 2.9** สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู. ปรับปรุงจาก การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน (น. 174-185), โดย จิรวรรณ พิจารย์, วาสนา พันชน, มิกิ กัณณะ, สราวุฒิ สมนาม และ สัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2558, ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.

เมทิลีนบลู เป็นสีย้อมที่เป็นด่าง (Basic Dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิว หรือภายในเซลล์ ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรเจนและแรงแรงแวนเดอร์วาล เมทิลีนบลูมี CAS Number: 61-73-4 สามารถใช้เป็นสีย้อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรียเป็นรีเอเจนท์ ตัวย้อมยังกระบวนกรสร้างโพลีเมอร์และสีย้อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษ สิ่งทอ และหนังเป็นต้น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็งเป็นผงสีเขียวเข้ม ไม่มีกลิ่น จะกลายเป็นสีฟ้าเมื่อละลายน้ำ เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกที่มีการดูดซับสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยการแตกตัวเป็นประจุบวก ชนิดของวัสดุดูดซับ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ เป็นต้น (ศิริประภา ชัยเนตร, ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และครรชิต คงคาเงิน, 2556)

## 2.9 สารฟลาโวนอยด์ (Phenolic Compounds)

สารฟลาโวนอยด์เป็นสารมีสีพบได้ในดอกไม้และผลไม้หลายชนิดจัดเป็นสารกลุ่ม Polyphenols ที่มีสูตรโครงสร้างหลักเป็น Flavan หรือ 2-Phenylbenzopyran ดังรูป



**ภาพที่ 2.10** สูตรโครงสร้างหลักสารกลุ่ม Flavan. ปรับปรุงจาก *Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview* (pp.1-16) โดย Shashank Kumar and Abhay K. Pandey, 2013, The Scientific World Journal.

### 2.9.1 ชนิดและแหล่งของ Flavonoids

Flavonoids แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้หลายกลุ่มโดยการเข้าแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมในวงเบนซีนด้วย กลุ่ม Hydroxyl, Methoxyl และ Glycoside ในธรรมชาติพบว่ามี Flavonoids มากกว่า 4,000 ชนิดตัวอย่าง เช่น

2.9.1.1 Anthocyanins เป็นสารสีม่วงแดงหรือน้ำเงินซึ่งพบในดอกไม้ เช่น ดอกอัญชัน ในผลไม้ เช่น บลูเบอร์รี่ บิลเบอร์รี่ ลูกหว้า มะเกี๋ยง เป็นต้น

2.9.1.2 Proanthocyanidins เป็นสารไม่มีสี พบในแก่นของต้นไม้ใบไม้

2.9.1.3 Flavonols เป็นสารไม่มีสีพบใน ใบแปะก๊วย เปลือกสนเช่นต้นจันทน์เวิร์ด เป็นต้น

2.9.1.4 Flavones หรือ Anthoxanthins เป็นสารสีเหลืองพบในดอกไม้ ผลไม้ เป็น Flavonoid ชนิดที่พบมากที่สุด

2.9.1.5 Isoflavones เป็นสารสีเหลือง แต่พบน้อยมักพบในถั่วเหลือง

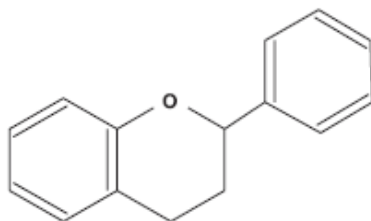
2.9.1.6 Flavanones เป็นสารไม่มีสีพบในใบไม้

2.9.1.7 Chalcones และ Aurones เป็นสารสีเหลืองพบในดอกไม้

2.9.1.8 Quercetin เป็น Flavonoid ที่มีการศึกษาวิจัยมากที่สุดพบใน แอปเปิ้ล ชา ห้วหอม เป็นต้น

2.9.1.9 Epicatechin พบในโกโก้

2.9.1.10 Oligomericproanthocyanidin พบในพืชหลายชนิด เช่น เมล็ดองุ่น เปลือกสน บิลเบอร์รี่ ชาเขียว ชาดำ แบล็คเคอแรน เป็นต้น (พลศรี เชื้อเหรียญทอง: 2550)



**ภาพที่ 2.11** สูตรโครงสร้างของสาร Flavonoid. ปรับปรุงจาก *Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview* (pp.1-16) โดย Shashank Kumar and Abhay K. Pandey, 2013, The Scientific World Journal.

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง (2550) ศึกษาการเตรียมซิลิกาและซิลิกอนจากแกลบโดยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า ในส่วนแรกของงานจะเป็นการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตัวรับแสงอาทิตย์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น โดยวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาสารเมื่อตัวรับแสงได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้พลังงานจากไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากการทดสอบอุณหภูมิภายในห้องเผาสารโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวพบว่า ไม่สามารถให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการคือ  $650^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานจากทั้งสองแหล่งควบคู่กันเสมอจากนั้นจึงทำการเตรียมซิลิกาและซิลิกอนจากแกลบ โดยเผาแกลบที่ผ่านกระบวนการรีฟลักซ์ในบรรยากาศของ แก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้แกลบสีขาวซึ่งเป็นซิลิกา เมื่อตรวจสอบด้วย XRD พบว่ามี โครงสร้างแบบอสัณฐาน ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ) ในส่วนของการเตรียมซิลิกอนได้ใช้ซิลิกาบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ผสมกับแมกนีเซียมให้ เป็นเนื้อเดียวกัน ในอัตราส่วน  $\text{SiO}_2 : \text{Mg}$  เท่ากับ 1 : 2 โดยโมล จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศอาร์กอนเป็นเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ได้ด้วยวิธี XRD พบว่ามี Si,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  และสารประกอบอื่น ๆ ของ Mg เกิดขึ้นรวมทั้ง Mg ที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ ที่ได้ไปล้างในสารละลายกรด  $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$  ตามลำดับ ในอัตราส่วน ระยะเวลาและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเทา จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD อีกครั้ง พบว่าคงเหลือเพียงซิลิกอน(Si)เป็นส่วนใหญ่ จากนั้นนำผงซิลิกอนที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Raman Spectra พบว่าในซิลิกอนที่ได้จากการเผาที่เวลาต่างกัน 1, 2 และ 3 ชม. จะให้พีคที่มีค่าเลขคลื่นต่างกันเป็น  $520.99\text{ cm}^{-1}$ ,  $519.11\text{ cm}^{-1}$  และ  $518.47\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ จากการวัด ปริมาณโลหะเจือปนใน Si ที่เตรียมได้ด้วยวิธี ICPEs พบว่ามีโลหะ Fe, Cu, Ca และ Cr ในปริมาณที่แตกต่าง

กัน ตั้งแต่ 0.033 mg/g ถึง 2.015 mg/g อย่างไรก็ตามแม้ว่า ซิลิกอนที่เตรียมได้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 97% ซึ่งไม่ตีพ้อต่อการนำไปประยุกต์แต่การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็ยังเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการให้ความร้อน เพราะสามารถประหยัด พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 25%

อรอนงค์ จุลพันธ์ และ เมตตา เจริญพานิช (2554) ศึกษาการสังเคราะห์และการพัฒนาวัสดุนาโนในกลุ่มซิลิกาเมโซพอร์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุดูดซับและตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเริ่มจากสังเคราะห์วัสดุดูดซับซิลิกาเมโซพอร์แบบรูพรุน 1 ขนาด และพัฒนาการสังเคราะห์ให้ได้ซิลิกาเมโซพอร์ที่มีรูพรุน 2 ขนาดในโครงสร้าง โดยมีการกระจายตัวของรูพรุนแบบต่าง ๆ นอกจากนี้ ยังเน้นการนำวัสดุทดแทนจำพวกกากของเสีย เช่น ถ้ำลอย ถ้ำกลบและโคโคซาน ซึ่งมีราคาถูก หาได้ง่ายภายในประเทศมาใช้ทดแทนสารตั้งต้นที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเป็นกระบวนการผลิตที่สะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเน้นการนำกากของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานด้านการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยาต่อไป

เชาว์ ศรีเพชรดี (2553) ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดซิลิกาจากถ้ำกลบสามารถสกัดให้อยู่ในรูปของโซเดียมซิลิเกตได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การปรับค่า pH ให้เป็นกลางส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ได้กลายเป็นซิลิเกต ในการเตรียมซิลิกาที่มีรูพรุนโดยกระบวนการโซลเจล ซึ่งกระบวนการโซลเจลินี้เกิดพร้อมกับการจับตัวเป็นก้อนของเนื้อเยื่อในน้ำยางธรรมชาติ ยางแห้งที่ได้จะมีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลซึ่งอยู่ในลักษณะของยางธรรมชาติที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาเจล ผลคือยางที่ได้จะมีสมบัติพิเศษในเรื่องคุณสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของงานนำยางที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลมาทำการเติมสารเสริมแรงร่วมอีก 2 ชนิด คือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและถ้ำลอย ปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่มากเกินไปจะถูกใช้เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวแก่ซิลิกาแบบตกตะกอนและถ้ำลอย เอกลักษณะการบ่ม สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพ พบว่าเวลาสก็อช เวลาในการบ่ม แรงบิดต่ำสุดและสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่เติมถ้ำลอยพบว่าเวลาสก็อช เวลาในการบ่ม แรงบิดต่ำสุดและสูงสุดมีค่าลดลง ค่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของทั้งสองระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงและแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาแบบตกตะกอนที่ปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีของการเติมถ้ำลอยที่ปรับปรุงพื้นผิวพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณถ้ำลอยเป็น 10 phr อย่างไรก็ตาม ค่าความยาว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลของปริมาณซิลิกาและถ้ำลอย ภายถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของซิลิกาในเมทริกซ์ของยาง และความเข้ากันกับเมทริกซ์ยางของถ้ำลอยที่ได้รับการปรับปรุงผิว

ธนาชัย จงสุวรรณไพศาล (2552, น. 49-63) ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ และทดสอบอุปกรณ์ดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากถ้ำกลบ เพื่อนำมาใช้ลดความชื้นของอากาศภายนอกที่จะ

เข้ามาภายในอาคารปรับอากาศ ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศลงได้ โดยในส่วนของ การออกแบบ ได้ออกแบบให้อุปกรณ์ดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบเป็นระบบผนัง กระจก 2 ชั้น ภายในบรรจุแผ่นซิลิกาที่สกัดจากแกลบ ติดตั้งขวางทางเดินอากาศในลักษณะสลับพื้น ปลา ผนังดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบมีช่องระบายอากาศทั้งด้านบนและด้านล่าง โดย ติดตั้งพัดลมระบายอากาศไว้ที่ช่องระบายอากาศด้านบน ส่วนการทดลองได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นในสภาวะจำลอง 3 สภาวะตามสภาพ อากาศในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูหนาวและฤดูฝน ส่วนที่ 2 ทดสอบในสภาพ อากาศจริง ซึ่งจากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสามารถในการลดการใช้พลังงานของผนัง ดูดซับความชื้น เมื่อจำลองสถานการณ์ติดตั้งผนังดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบภายใน ห้องนอนขนาดเล็กพบว่า ผนังดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบสามารถลดการใช้พลังงาน ได้มากที่สุด

ในช่วงฤดูฝน และน้อยที่สุดในช่วงฤดูร้อน ซึ่งจะทำงานได้ดีเฉพาะ 1-2 ชั่วโมงแรกเท่านั้น โดยผนังดูด ซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบจะดูดซับความชื้นในอากาศได้ในช่วงเวลากลางคืน และคาย ความชื้นในเวลากลางวัน หมุนเวียนเป็นวัฏจักร โดยไม่จำเป็นต้องนำแผ่นซิลิกาออกมารีดความชื้น

ชวีศรี กรณ์ย์เมธากุล (2549) สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โพโตคะตะลิสต์ในรูปแบบลิทอนา เทสสามารถสลายสารมลพิษในน้ำและอากาศโดยใช้แสงได้แต่ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วย แสงจำกัดในช่วงของแสงยูวีจึงสามารถนำมาปรับช่วงของการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงวิสิเบิล ซึ่งเป็น องค์ประกอบหลักของแสงอาทิตย์ได้โดยการปรับแต่งพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธี doping ด้วยอะตอมของธาตุซัลเฟอร์ จากไทโอยูเรีย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไทเทเนียมไอโซโพรพ รอกไซด์กับไทโอยูเรียเป็น 1:4 และเผาภายใต้บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศา เซลเซียส จากนั้นนำมาพัฒนาประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

อภิชน วัชรินทร์วงศ์ (2555) การนำกระบวนการโพโตคะตะไลซิสมาระยุกต์ใช้ในการ บำบัดมลพิษอากาศ โดยมลพิษอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันตราย มีการศึกษาสองส่วน การศึกษาส่วนแรกเป็นการทดลองขยายพื้นที่ผิวของไทเทเนียมให้มีขนาดใหญ่ โดยสังเคราะห์แผ่น ไทเทเนียมขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยกระบวนการแอนโนได เซชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค FESEM ได้พื้นผิวเป็นแบบท่อนาโน ลักษณะคล้ายคลึงกัน จากนั้นทำการทดลองออกแบบจุดเชื่อมต่อหลังแผ่นไทเทเนียมต่างกัน 1 และ 2 จุด พบว่า การ เชื่อมต่อ 1 จุด ทำให้ได้ออกไซด์เป็นท่อในระดับนาโนเมตร ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่เล็กกว่าและเรียง ตัวสม่ำเสมอว่าการเชื่อมต่อแบบ 2 จุด จึงเลือกใช้แผ่นไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร และการ เชื่อมต่อแบบ 1 จุด เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแอนโนไดเซชันที่มีต่อ

ลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนได้ถูกศึกษา และพบว่า ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ของการแอโนไดเซชันทำให้เกิดพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอและให้ค่า Photocurrent Density มากที่สุด คือ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การศึกษาส่วนที่สองเป็นศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการฉายแสงยูวีเอ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการ แลงเมียร์ – อินเซลวูด ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (kr) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็ม ต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ (KL) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม

วิทยา พันพา (2008) แกลบได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการล้างโดยการชะด้วยสารละลายยากรด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แกลบที่ได้อยู่ในรูปของซิลิกา ออสซิลอนที่มีความบริสุทธิ์สูง ได้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และซิลิกาไลต์ นำส่วนผสมเบื้องต้นในรูปของเจล ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 ไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-24 ชั่วโมง เพื่อให้แกลบมีศักยภาพสูงสุดในการใช้งาน ได้ทำการสังเคราะห์ ZSM-5 โดยใช้สัดส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาที่กว้างในช่วง 30-2075 จากการสังเคราะห์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ พบว่าเจลที่มีสัดส่วนโดยโมลซิลิกาต่ออะลูมินาน้อยกว่า 80 ได้ก่อให้เกิดเฟสอสซิลอนและ ZSM-5 ที่มีความเป็นผลึกที่ค่อนข้างต่ำ สัดส่วนโดยโมล ระหว่าง 80-200 ได้ก่อให้เกิด ZSM-5 ที่มีความเป็นผลึกที่สูง และสัดส่วนโดยโมล ที่สูงกว่า 200 ได้ก่อให้เกิดซีโอไลต์ชนิดซิลิกาไลต์ ในการเพิ่มปริมาณโซเดียมออกไซด์ในรูปของโซเดียมอะลูมิเนตเพื่อปรับสัดส่วน โดยโมลซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล พบว่าไม่ได้ช่วยเพิ่มอัตราการตกผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกหรือปริมาณของผลผลิตที่ได้ แต่พบว่าสมบัติเหล่านี้ถูกเสริมได้ด้วยการเพิ่มสัดส่วนโดยโมลซิลิกาต่ออะลูมินาในเจล นอกจากนี้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากแกลบได้ถูกนำมาเตรียมเป็นวัสดุ เซิงประกอบโดยวิธีการแช่ในสารละลายไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าวัสดุเซิงประกอบระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์กับ ZSM-5 (สัดส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) ได้ลดความเข้มของสสารละลายเมทิลีนบลูอย่างฉับพลันในที่มีด โดยเมทิลีนบลู ถูกดูดซับอย่างรวดเร็วบนวัสดุเซิงประกอบ ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการรวมเข้าด้วยกันของ ZSM-5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และเกลือโซเดียมซัลเฟตที่ยึดติดบนผิวของวัสดุเซิงประกอบ ไอออนซัลเฟต ที่ยึดติดอยู่ได้ก่อให้เกิดการตกตะกอนของเมทิลีนบลู ลงบนผิววัสดุเซิงประกอบ ช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาที่เกิดจากตัวเร่งเซิงแสงในการฟอกสีของสารละลายเมทิลีนบลู ส่วนวัสดุเซิงประกอบ (สัดส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก) ฟอกสีของเมทิลีนบลู ภายใต้แสงยูวีได้ อย่างสมบูรณ์ใน 2.5 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ P-25 ที่ใช้ในเชิงการค้า

พฤกษ์ ตัญญูรัตน์ (2555) วัตถุประสงค์หลักของการศึกษางานวิจัยนี้คือ การกำจัดพาราครอท ซึ่งเป็นสารกำจัดวัชพืชที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส โดยผู้วิจัยได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนตัวรองรับซิลิกาจากแกลบข้าว ด้วยวิธีการทำให้เอบซุ่มแบบคอลลอยด์ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวก่อกัมมันต์ เกาะติดอยู่บนซิลิกาจากแกลบข้าวที่เป็นตัวรองรับ แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งด้วยเครื่อง XRD SEM-EDS BET Surface Area และ UV-DRS เพื่อช่วยให้สามารถอธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ ผลการทดสอบพบว่าผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแบบอนาเทส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 20 และ 30 มีพื้นที่ผิว 188 124 และ 82 ตร.ม./กรัม และมีค่า Band Gap Energy เท่ากับ 3.28, 3.25, 3.20 eV ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวเร่งทั้งหมดสามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง อัลตราไวโอเล็ต จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมใช้ในท้องตลาด (Degussa, P25) จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพ การกำจัดพาราครอทได้ประมาณร้อยละ 67 สูงกว่า P25 ที่กำจัดได้ประมาณร้อยละ 39 และยังสามารถใช้กำจัดพาราครอทที่อยู่ในน้ำเสียที่ปนเปื้อนยากำจัดวัชพืชที่จำหน่ายในท้องตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงประมาณร้อยละ 69 อีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแปรที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพต่อการกำจัดพาราครอท โดยกำหนดตัวแปร 4 ตัวแปรได้แก่ ความเข้มข้นของพาราครอท ค่าความเป็นกรดต่างในน้ำ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรึงบนซิลิกาจากแกลบข้าว และปริมาณการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Bhenken Design และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม MINITAB<sup>®</sup> จากผลการทดลองพบว่าตัวแปรทุกตัวมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดพาราครอท ยกเว้นสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรึงบนซิลิกาจากแกลบข้าว ค่าที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการกำจัดพาราครอทสูงสุดร้อยละ 90.04 ที่ความเข้มข้นของพาราครอทเริ่มต้น 10 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.91 ปริมาณสัดส่วนไทเทเนียมบนซิลิกาจากแกลบข้าวร้อยละ 30 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0 กรัมต่อลิตร ในการทดลองจลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับและไอโซเทิร์มของการดูดซับพบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาสอดคล้องตามแบบจำลอง Pseudo-second order model และ Langmuir Model ตามลำดับ เมื่อทดสอบจลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสด้วยแบบจำลอง Langmuir-Heishelwood-Hougen-Watson (LHHW) Model พบว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาสอดคล้องตามแบบจำลองเป็นอย่างดี ขั้นตอนสุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการสลายตัวของพาราครอทด้วยการวัดค่าซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำ เพื่อพิสูจน์ว่าพาราครอทสามารถสลายตัวได้หมดไม่เหลือเป็นสารพิษตกค้าง ซึ่งผลการทดลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าพาราครอทสามารถสลายตัวได้จนไม่สามารถวัดค่าซีไอดีได้ในเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเข้มข้นของพาราครอทเริ่มต้น 10 ส่วนในล้านส่วน

Yener et al. (2015, pp. 84-93) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อโครงสร้าง คุณสมบัติ และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตโดยใช้แก้วกลายเป็นแหล่ง  $\text{SiO}_2$  พบว่าการสังเคราะห์  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  คอมโพสิตจากวิธี Thermal hydrolysis โดยใช้  $\text{TiCl}_4$  ในการสังเคราะห์ ไทเทเนียมสำหรับใส่ในรูพรุนของ  $\text{SiO}_2$  ที่เตรียมได้จากแก้ว  $\text{TiO}_2$  มีลักษณะเป็นทรงกลมและจับกันเป็นก้อนรูปร่างคล้ายดอกไม้ ในลักษณะผลึกแบบรูทล์  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  คอมโพสิตที่มีพื้นผิวมากกว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$

Hui et al. (2015, pp. 1609-1611) วัสดุนาโนคอมโพสิต ซึ่งมีปริมาณผลึกอนาเทสสูงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีซึ่งเตรียมได้จากวิธี โซล-เจล โดยใช้แก้วเป็นเทมเพลต การวิเคราะห์ลักษณะทางความร้อน, โครงสร้างระดับไมโคร และสารประกอบทางเคมีของวัสดุคอมโพสิตโดยเทคนิค TG-DSC, XRD, FESEM, EDS และการดูดซับทางกายภาพด้วยไนโตรเจน ผลจากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลง  $\text{TiO}_2$  ในรูปผลึกอนาเทสเป็นผลึกรูทล์ ที่ 700~800 องศาเซลเซียส และสมบูรณ์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เมื่อสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  ที่ 500 หรือ 600 องศาเซลเซียส, เซลล์ของนาโน  $\text{TiO}_2$  จะมีลักษณะเป็นเส้นและมีส่วนเว้า และเป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาในการเพิ่มอนุภาคนาโน เซลล์ของนาโน  $\text{TiO}_2$  จะมีลักษณะโครงข่ายเป็นชั้น นำเติมลงรูพรุนของแก้วกลายเป็น วัสดุนาโนคอมโพสิต  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง วัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในวัสดุรูพรุนซิลิกาจาก แกลบข้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยและซิลิกาจากแกลบ มีเครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัยตามลำดับดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 เครื่องมือ อุปกรณ์

- 3.1.1.1 เครื่องสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่อเนื่อง (Sohxlet)
- 3.1.1.2 เครื่อง UV-Vis Spectrometer Perkin Elmer Lamda 12
- 3.1.1.3 เครื่องกำเนิดหลอดรังสียูวี ขนาด 125 วัตต์
- 3.1.1.4 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง Bartorius BL210s
- 3.1.1.5 ตู้อบ (Oven) Memmert D06062
- 3.1.1.6 โถดูดความชื้น (Desicator)
- 3.1.1.7 เครื่องระเหยแห้ง (Rotary Evaporator) Buchi R-124
- 3.1.1.8 เตาเผา
- 3.1.1.9 เครื่อง FTIR
- 3.1.1.10 เครื่อง SEM
- 3.1.1.11 เครื่อง XRD
- 3.1.1.12 เครื่อง Centrifuge
- 3.1.1.13 ปีกเกอร์ขนาด 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.1.14 ขวดน้ำกลั่น
- 3.1.1.15 ขวดปรับปริมาตรขนาด 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.1.16 ปีเปต ขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร

##### 3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 เมทานอล (Methanol  $\geq$  99.9%)
- 3.1.2.2 ไอโซโพรพานอล (Iso-propanol)

- 3.1.2.3 ไททาเนียม ไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)
- 3.1.2.4 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric Acid 37%)
- 3.1.2.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด (Sodium Hydroxide)
- 3.1.2.6 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)
- 3.1.2.7 เปลือกกล้วยหอม (Banana Peel)
- 3.1.2.8 แกลบ (Rice Husk)

## 3.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

### 3.2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ปีเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 % โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 83.33 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกริมาตร เขย่าสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.2.2 สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm

เตรียมสารละลายมาตรฐาน เมทิลีนบลู เข้มข้น 100 ppm โดยชั่งสี้อมเมทิลีนบลู 0.1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกริมาตร เขย่าสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.3.3 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู สำหรับทดสอบการย่อยสลายสี

3.3.3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐาน เมทิลีนบลู เข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐาน เมทิลีนบลู เข้มข้น 100 ppm

3.3.3.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย เมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

3.3.3.3 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสง

## 3.3 วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 กระบวนการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน ไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO<sub>2</sub>NPs) สามารถเตรียมได้ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 นำไทเทเนียมไดออกไซด์ (Carlo Erba' Reagent) 2 กรัม ไปอบไล่ความชื้นที่ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.1.2 เผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.1.3 นำไปวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะผลึกด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR

### 3.3.2 การเตรียมสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม

3.3.2.1 นำพืชตัวอย่างมาทำความสะอาด แล้วล้างให้แห้ง จากนั้นหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

3.3.2.2 ชั่งตัวอย่างพืชให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในทิมเบิล ทิมเบิลละ 30 กรัม นำไปสกัดด้วยชุดสกัดต่อเนื่อง (Soxhlet) โดยมีเมทานอลเป็นสารสกัด 4 ครั้ง

3.3.2.3 ทำการสกัดประมาณ 4 ชั่วโมง

3.3.2.4 นำสารสกัดที่ได้ไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบลดความดัน (Rotary Evaporator) จะได้สารสกัดหยาบซึ่งมี สารฟลาโวนอยด์

### 3.3.3 การเตรียมซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาจากแกลบข้าว (Rohani Abu Bakara, Rosiyah Yahya, Seng Neon Gan, 2015) สามารถเตรียมได้ดังต่อไปนี้

3.3.3.1 ล้างแกลบให้สะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.3.2 รีฟรักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริก เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.3.3.3 นำมาล้างน้ำจนหมดความเป็นกรดโดยตรวจสอบให้ มีค่า pH = 7 และอบแห้งที่ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.3.4 นำแกลบมาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่แห้งที่มีฝาปิดสนิท นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, SEM และ FT-IR

### 3.3.4 การเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในซิลิกา (TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> nanocomposite)

3.3.4.1 อบผงซิลิกาที่ได้จากแกลบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3.4.2 นำผงซิลิกา 0.2 กรัม ละลายใน ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร นำไปกวนต่อเนื่อง (Magnetic Stirring) 30 นาที และนำไป Sonication 1 ชั่วโมง

3.3.4.3 เติม ไอโซ-โพรพานอล 50 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที

3.3.4.4 เติมไททาเนียม ไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>NPs) อนุภาคนาโน ในปริมาณ 0.01, 0.02 และ 0.03 กรัม

3.3.4.5 กวนสารผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 19 ชั่วโมง กรอง และล้างด้วยไอโซโพรพานอล 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง

3.3.4.6 นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C 36 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ของสารจากอัตราส่วนของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 5, 10 และ 15% เรียกว่า 5%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub>

**3.3.5 การเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารพลาไวโนยด์ในซิลิกา (TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> nanocomposite)**

3.3.5.1 อบผงซิลิกาที่ได้จากแคลบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำผงซิลิกา 0.2 กรัม ละลายใน ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร กวนต่อเนื่อง (Magnetic Stirring) 30 นาที และ Sonication 1 ชั่วโมง

3.3.5.2 เติม ไอโซ-โพรพานอล 50 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที

3.3.5.3 เติมไททาเนียม ไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>NPs) อนุภาคนาโน 0.01, 0.02 และ 0.03 กรัม และสารสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยหอม ในปริมาณ 0.02 กรัม

3.3.5.4 นำสารผสมที่ได้ไปกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 19 ชั่วโมง นำสารผสมที่ได้ไปกรอง และล้างด้วย ไอโซ-โพรพานอล 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง นำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C 36 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ของสารจากอัตราส่วนของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 5, 10 และ 15% และสารสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยหอมเรียกว่า 5TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>, 10TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> และ 15TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>

**3.3.6 ศึกษาวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกา (TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> Nanocomposite) และวัสดุผสมระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารพลาไวโนยด์ในซิลิกา (TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> Nanocomposite) ในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลู**

ศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> โดยศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของเมทิลีนบลู ดังนี้

3.3.6.1 ชั่งวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> 10 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 30 ppm 5 มิลลิลิตร

3.3.6.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

3.3.6.3 เก็บตัวอย่างทุก 5 นาที ใน 30 นาทีแรกและทุก 30 นาที ใน 180 นาทีต่อมา

3.3.6.4 นำสารละลายตัวอย่างมาแยก โดยการปั่นเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที

3.3.6.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวอย่างที่ 664 นาโนเมตร และคำนวณความเข้มข้นของเมทิลีนบลู ที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน

3.3.6.6 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  ทดสอบปฏิกิริยากับสารละลายเมทิลีนบลู ในสภาวะเดิม

3.3.6.7 วัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ ของเมทิลีนบลู ในสภาวะเดียวกับการทดลอง

### 3.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งหมด ไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยเทคนิค XRD, FT-IR และ SEM



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

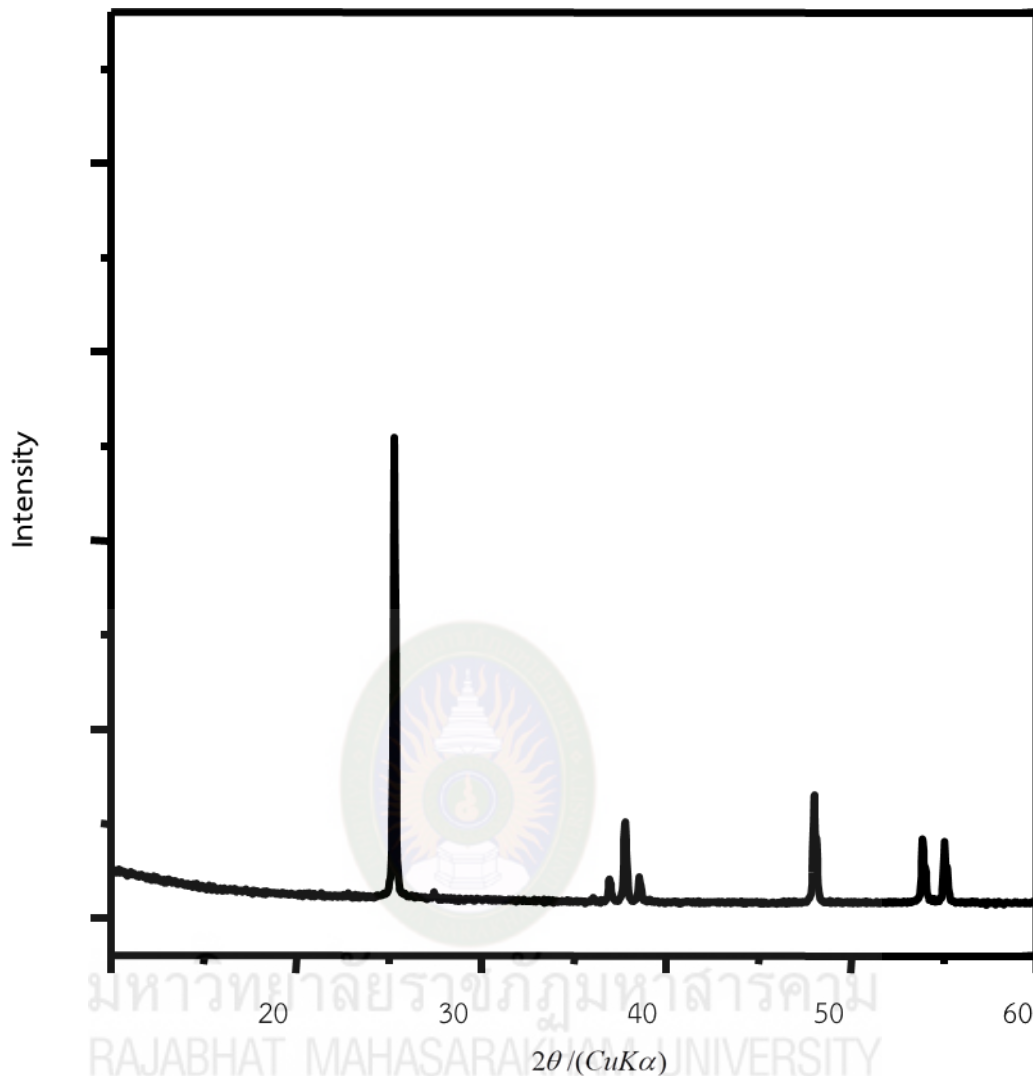
จากการทดลองการเตรียมวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยและชิลิกาจากแกลบ โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลช่วยในการเสริมประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น ในเบื้องต้นเป็นการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะ และสมบัติของวัสดุนาโนสังเคราะห์ รวมถึงการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของวัสดุนาโนสังเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาของสารละลายเมทิลีนบลู โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโน (TiO<sub>2</sub>NPs)

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

จากผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าการเลี้ยวเบนของสารที่เตรียมจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.1 อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล Joint Committee Powder Diffraction Standards, JCPDS file พบพีคหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $25.29^\circ$ ,  $37.79^\circ$ ,  $48.87^\circ$  และ  $54.98^\circ$  ตรงกับ no.73-1764 ปรากฏว่าเป็นเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็นอะนาเทส และมีโครงสร้างเป็นแบบเททระโกนอล (บุรุษภัทร์ อินทรีย์สังวร, 2548, น. 47-52)

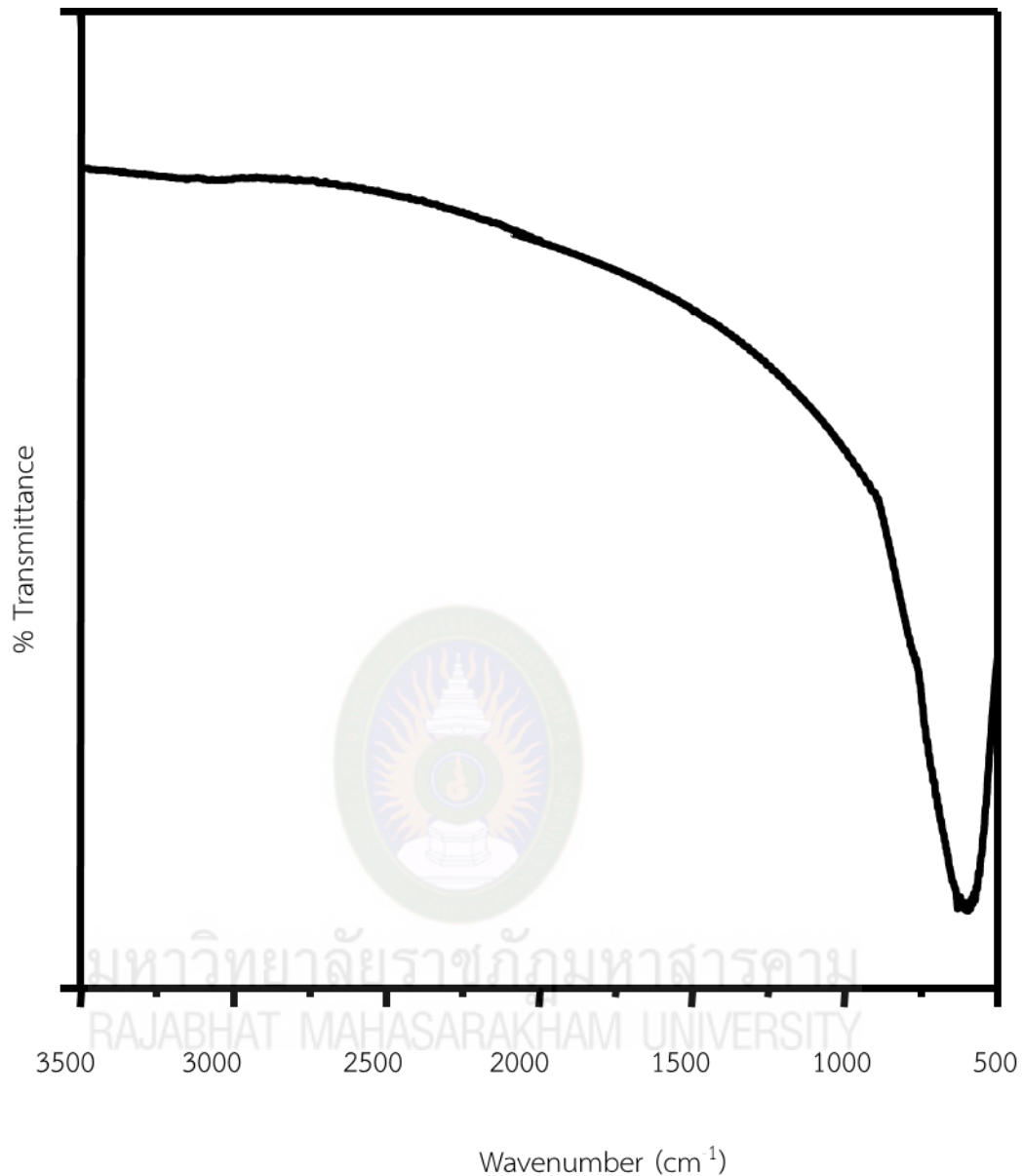
จากการทดลองจะสังเกตว่าพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์จะมีความเข้มที่ต่ำ และฐานของพีคค่อนข้างกว้าง อธิบายได้ว่าจากความเข้มข้นต่ำเนื่องจากความเป็นผลึกของสารมีค่าน้อยซึ่งอาจจะมีโครงสร้างอสัณฐานปนอยู่ด้วยนั่นเอง และจากฐานของพีคค่อนข้างกว้างอธิบายได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จะมีขนาดอนุภาคที่เล็กซึ่งเป็นไปตามสมการของ Scherrer Formular หรือมีเกรนขนาดที่เล็กนั่นเอง (นิตดา เวชชากุล, 2548, น. 67, หทัยทิพย์ พันฤทธิ์ดำ, 2556)



ภาพที่ 4.1 XRD Patterns ของ อนุภาคนาโนไทเทเนียม ( $\text{TiO}_2\text{NPs}$ )

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

นำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีในช่วงเลขคลื่น  $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$  ได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนไทเทเนียม (TiO<sub>2</sub>NPs)

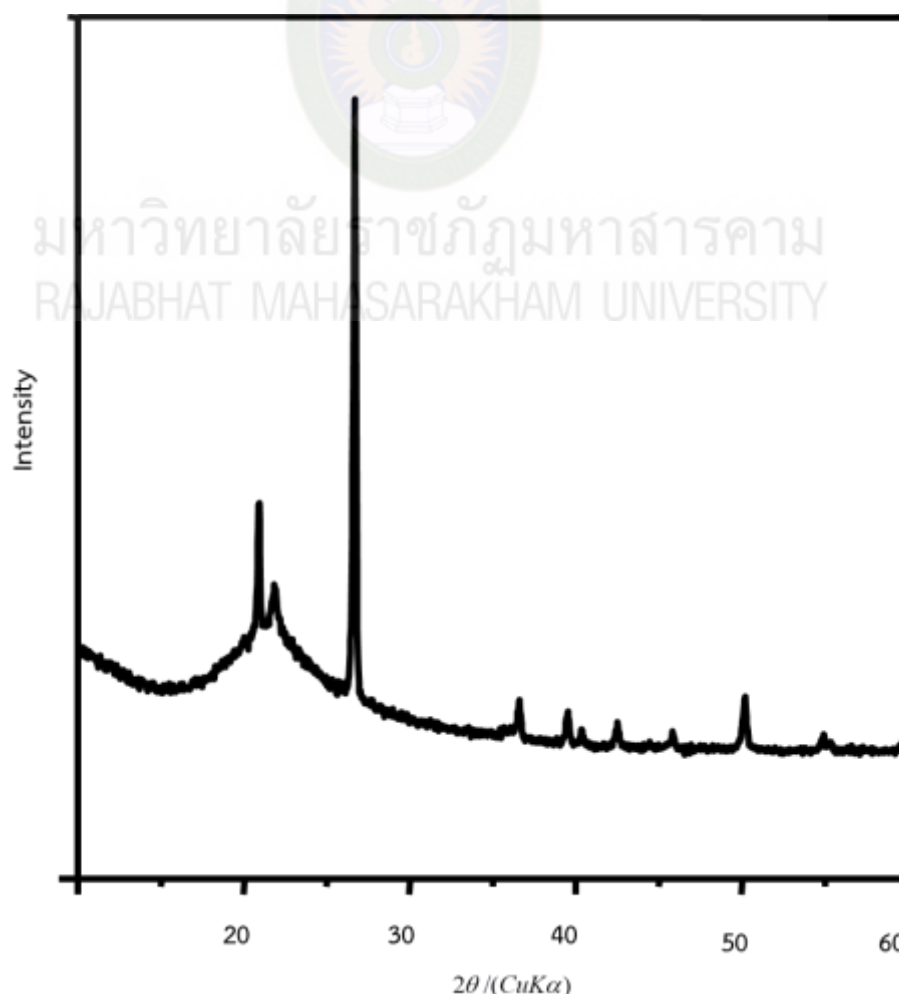
จากผลการทดลองพบว่า มีแบนด์ (Band) ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 700-500 cm<sup>-1</sup> ซึ่งมาจากการสั่นของ Ti-O stretching โดยมักจะเกิดที่เลขที่คลื่นประมาณ 580 cm<sup>-1</sup> (บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร, 2548) โดยพีคที่เห็นจะเป็นพีคที่มีลักษณะกว้างซึ่งเป็นตำแหน่งของพีคโลหะกับออกซิเจนที่ยังไม่สามารถมองเห็นการแยกพีคได้ชัดเจน (นัตตา เวชชากุล, 2555, น. 25-30)



## 4.2 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ )

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

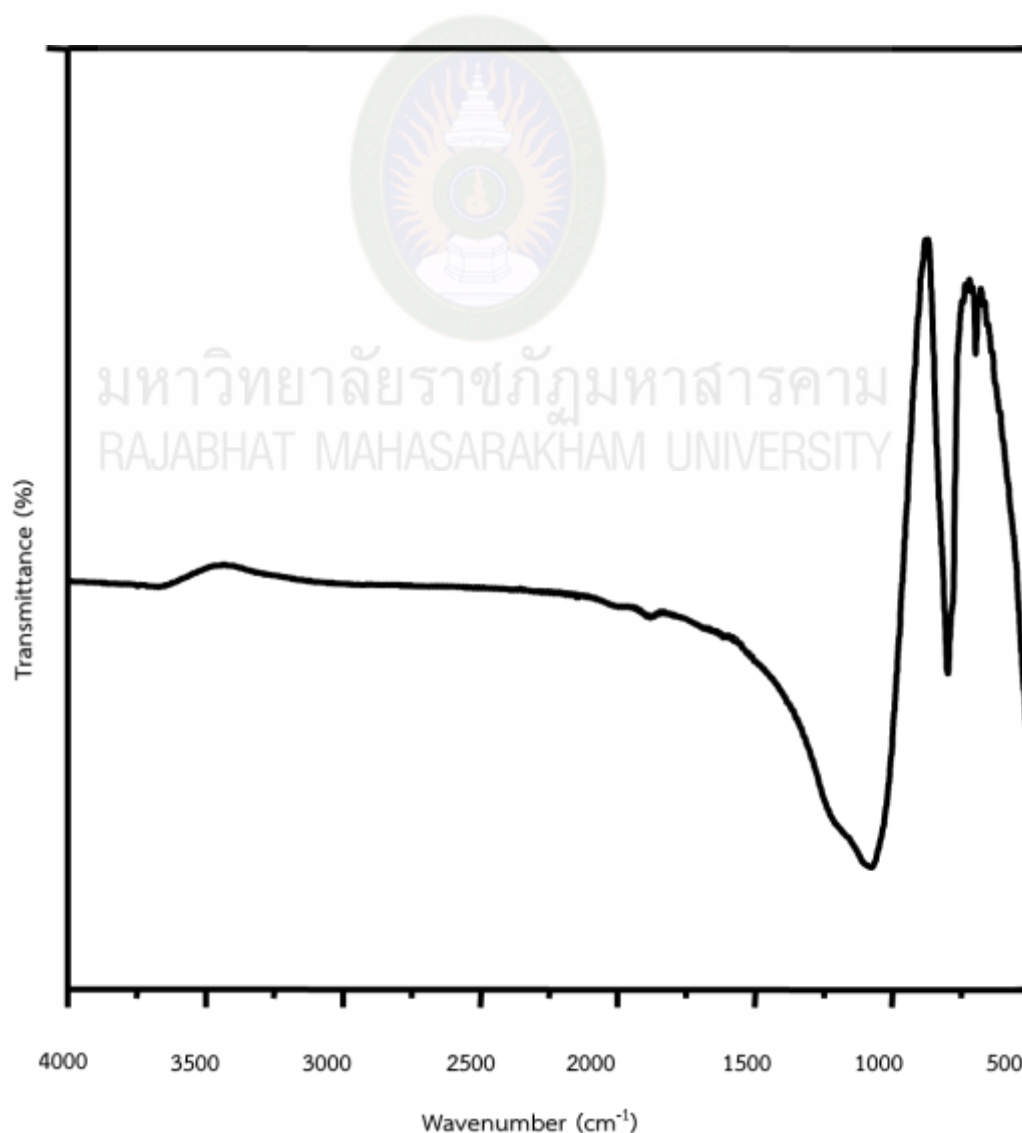
การวิเคราะห์สำหรับการตรวจสอบความเป็นผลึกของเมโซพอร์รัสของซิลิกาจากแกลบข้าวที่เตรียมได้นั้นสามารถตรวจวัดได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงพีคที่  $20.9^\circ$  และ  $26.6^\circ$  ผลจากการพิสูจน์เอกลักษณ์แสดงให้เห็นว่าเมโซพอร์รัสซิลิกาที่เตรียมได้นั้นมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) (Sekar, Sharma and Kim, 2016, pp. 353-358) เมื่อเปรียบเทียบกับ JCPDS File ตรงกับ no.46-1045 มีลักษณะคล้ายกับพีคของเมโซพอร์รัสของซิลิกา ซึ่งเตรียมได้จากของเสียทางการเกษตรนี้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานต่าง ๆ (Vishwakarma, Ramachandran, Anbarasan and Rabel1, 2016, pp. 1999-2007)



ภาพที่ 4.3 XRD Patterns ของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ )

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ซิลิกาจากแกลบข้าวโดยเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

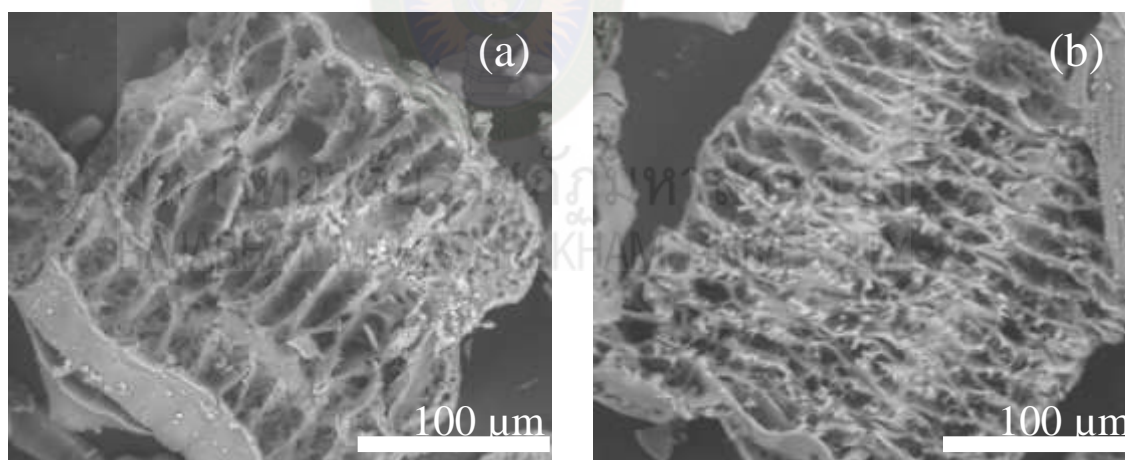
เมื่อพิจารณาโครงสร้างของซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบข้าวด้วยเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ที่ผ่านการรีฟักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบพีกค่าการดูดกลืนที่  $796 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นและการงอของโมเลกุลแบบยืดของหมู่ O-Si-O และพีกค่าการดูดกลืนที่  $1138 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของโมเลกุลแบบยืดของหมู่ไซลอคเซน (Si-O-Si) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบข้าวมีเอกลักษณ์ทางเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี เหมือนกับ Precipitate Silica (เขาว์ ศรีเพชรดี, 2553)



#### ภาพที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ )

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ซิลิกาจากแกลบข้าวโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เพื่อศึกษาลักษณะของการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวด้วยเทคนิค SEM จากการวิเคราะห์พื้นผิวภายนอกของซิลิกา พบว่าซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ มีรูพรุนมาก พื้นผิวที่สูง ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้เป็นตัวดูดซับที่ดี (Huriye and Serife, 2015, pp. 84-93) ซิลิกาจากแกลบมีรูพรุนขนาดไมโครโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวที่ประมาณ 4  $\mu\text{m}$  และ 7  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ จากการซิลิกามีร่องรอยพื้นผิวและรูพรุนจำนวนมาก จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง (Madrid, Nogueira and Margarido, 2012) ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุคอมโพสิต เหมาะกับการพัฒนาการใช้งานมากขึ้น เช่น วัสดุคอมโพสิตใช้สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



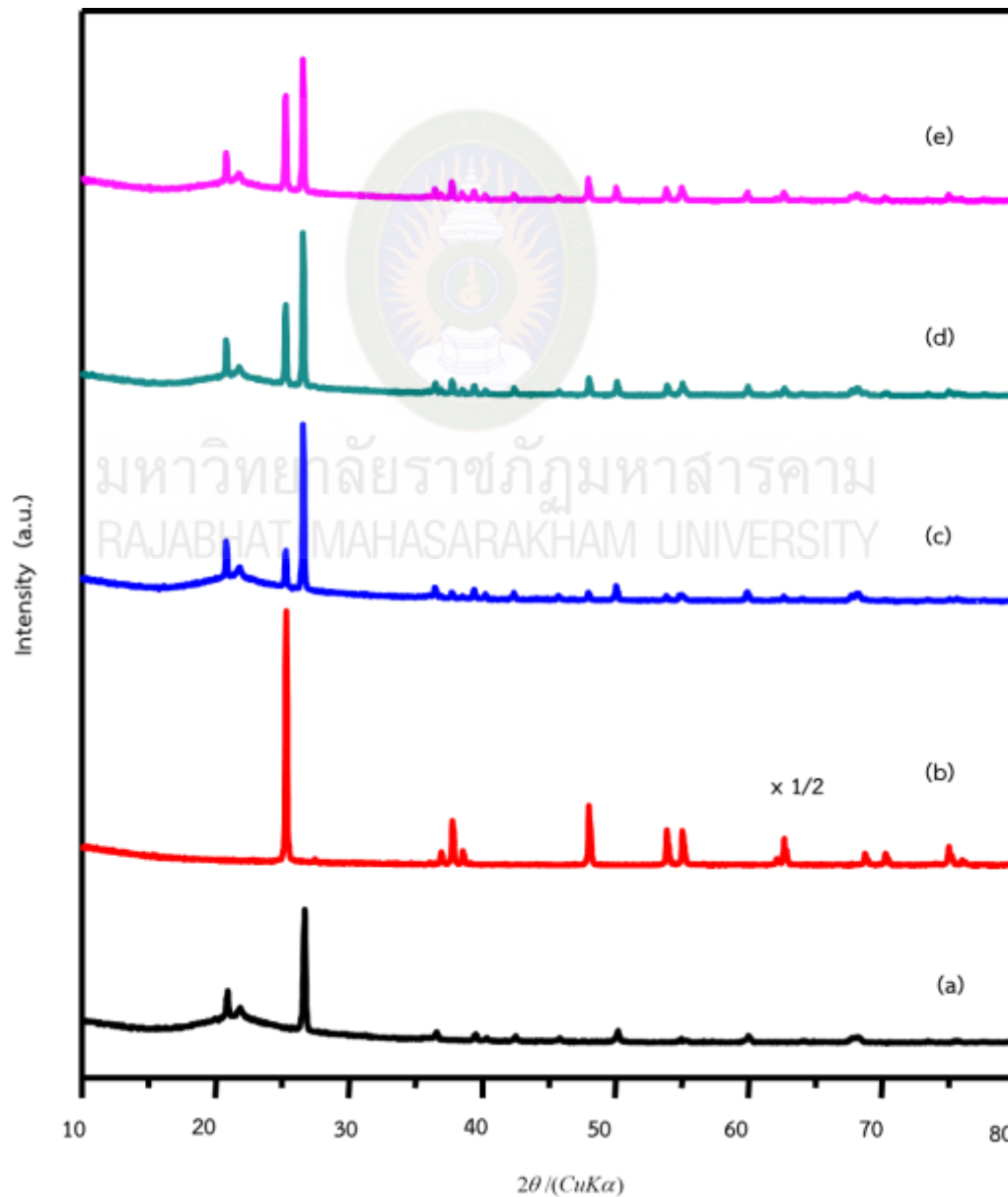
#### ภาพที่ 4.5 แสดงภาพ SEM ของซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{SiO}_2$ )

#### 4.3 ผลการเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในซิลิกาจากแกลบ ( $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ nanocomposite)

##### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

จากการเตรียม  $\text{TiO}_2@SiO_2$  Nanocomposite นำวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) พบว่าวัสดุนาโนปรากฏจุดสูงสุดที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.9^\circ$ ,  $21.8^\circ$ ,  $25.29^\circ$  และ  $26.6^\circ$  ตรงกับทิศทางผลึกเป็น 100, 002 และ 110 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ (Pummarin, Chamorn, Nurak and Siriluk, 2012, pp. 343-352) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ  $SiO_2$  จากแถบ พบว่ามีพีคผสมระหว่าง  $SiO_2$  และ

$TiO_2$  ดังภาพที่ 4.6c แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่เตรียมได้เป็นวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกา

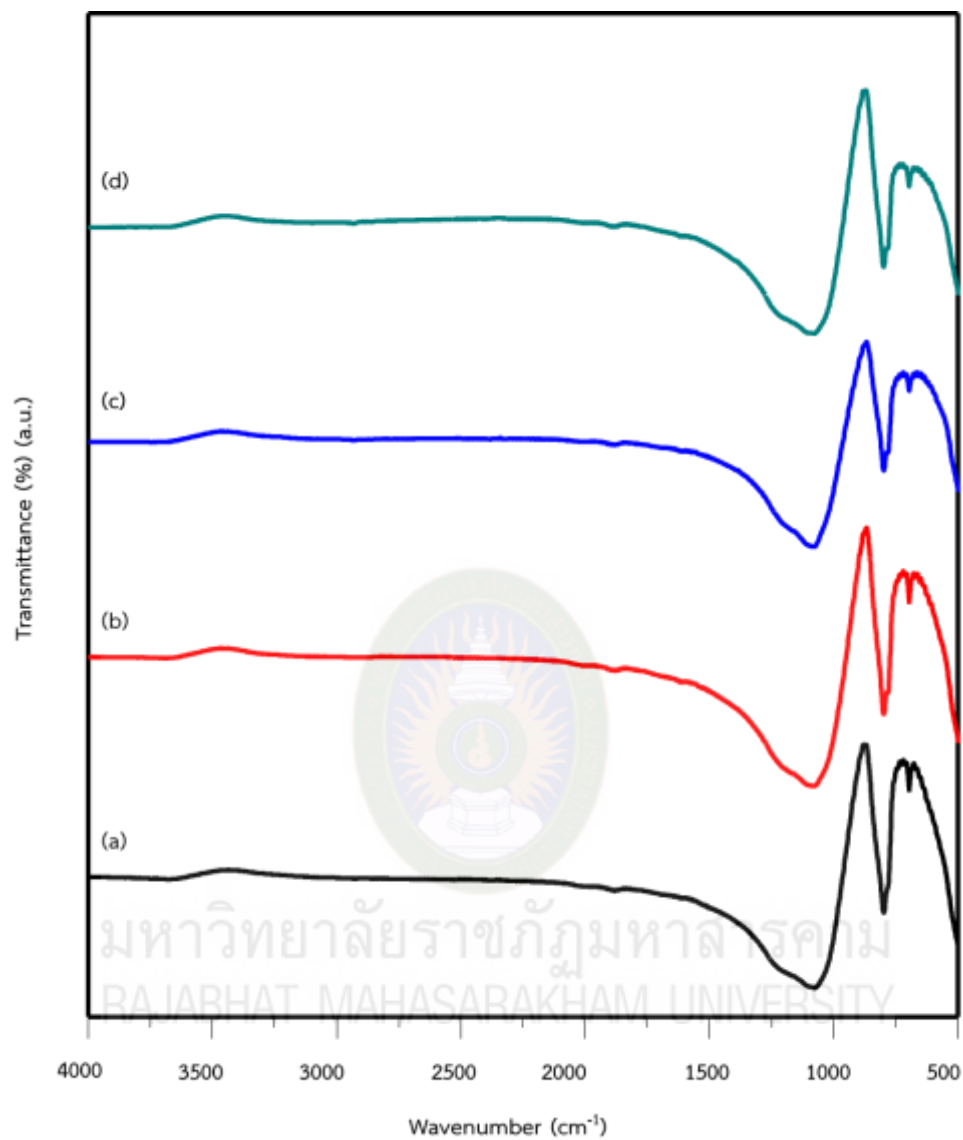


**ภาพที่ 4.6** XRD Patterns ของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $\text{TiO}_2$  (b),  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (c),  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (d) และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (e)

เมื่อเตรียมวัสดุผสมระหว่าง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  ที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0.5 : 10, 1 : 10 และ 1.5 : 10 พบพิกที่ตำแหน่ง  $2\theta$   $20.9^\circ, 21.8^\circ, 25.29^\circ$  และ  $26.6^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  เหมือนกัน แสดงถึงการผสม  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  โดยอัตราส่วนที่ต่างกัน ทำให้ความเข้มข้นของพิกที่ตำแหน่ง  $25.48^\circ$  และ  $26.6^\circ$  ต่างกันเท่านั้น แสดงว่าการเพิ่มปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (ภาพที่ 4.6c – ภาพที่ 4.6e)

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มนอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากการวิเคราะห์ FT-IR ของวัสดุผสมนาโน  $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  ดังแสดงในรูป 4.7 และตารางที่ 4.1 พบว่าข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่ และชนิดการสั่นของพันธะ ที่เลขที่คลื่นที่ประมาณ  $1100, 798, 438 \text{ cm}^{-1}$  ที่ตำแหน่งความถี่ที่  $1100 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการงอของพันธะในกลุ่มของ Si-O-Si Bending (Huriye and Serife, 2014, pp. 84-93) ที่เกิดจากซิลิกาจากแคลบข้าวที่อยู่ในวัสดุผสม สำหรับที่ตำแหน่งความถี่  $438$  และ  $798 \text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งของความถี่ของการสั่นในโมเลกุลของ Ti-O stretching และ Si-O-Ti vibrations ที่เกิดจากการรวมตัวกันระหว่าง  $\text{Si-O}^-$  และ  $\text{Ti}^{4+}$  ที่อยู่ใน  $\text{SiO}_2$  ตามลำดับ (Licciulli, Nisi, Pal, Laera, Creti and Chiechi, 2016, pp. 75-80) จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุนาโน  $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  ในอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของไทเทเนียมที่ 5, 10, 15 เปอร์เซ็นต์ พบสเปกตรัมที่ตำแหน่งความถี่และการสั่นที่เลขคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (b-d) โดยข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่ และชนิดการสั่นของพันธะทั้ง  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2, 10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าที่เลขที่คลื่น  $438 \text{ cm}^{-1}$  มีกลุ่มของ Si-O-Si bending (Huriye and Serife, 2014, pp. 84-93) ที่เลขคลื่น  $798-777 \text{ cm}^{-1}$  เป็นพิกของ O-Si-O stretching ที่เลขที่คลื่น  $1044-1029 \text{ cm}^{-1}$  มีกลุ่มของ Si-O-Si (Rohani, Rosiyah and Seng, 2016, pp. 189-195) เมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าหมู่ไฮดรอกซิลเกิด Hyperchromic shift ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงมากขึ้น และเกิด Hypochromic Shift ทำให้สเปกตรัมเคลื่อนไปทางที่มีความยาวคลื่นลดลงจากที่เลขคลื่นเดิม  $798 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อเติม  $5\%\text{TiO}_2$  จะเกิดพิกที่เลขคลื่น  $778 \text{ cm}^{-1}$ ,  $10\%$  และ  $15\%$  ของ  $\text{TiO}_2$  โดยน้ำหนักจะเกิดพิกที่เลขคลื่น  $778$  และ  $777 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ และที่เลขคลื่น  $1044 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อเติม  $5\%\text{TiO}_2$  จะเกิดพิกที่เลขคลื่น  $1029 \text{ cm}^{-1}$ ,  $10\%$  และ  $15\%$  ของ  $\text{TiO}_2$  โดยน้ำหนักจะเกิดพิกที่เลขคลื่น  $1031$  และ  $1030 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของไทเทเนียมสามารถเข้าไปแทรกตัวในซิลิกาไดออกไซด์จากแคลบได้



ภาพที่ 4.7 FT-IR Spectra ของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (b),  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (c) และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (d)

#### ตารางที่ 4.1

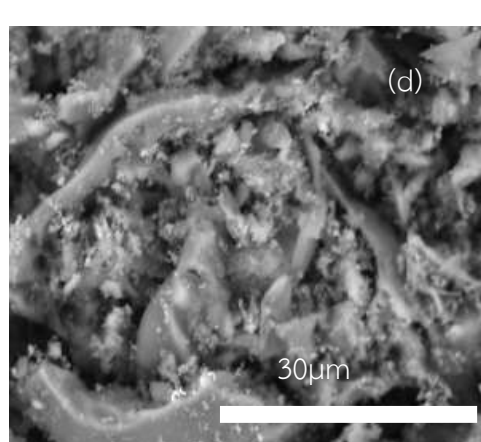
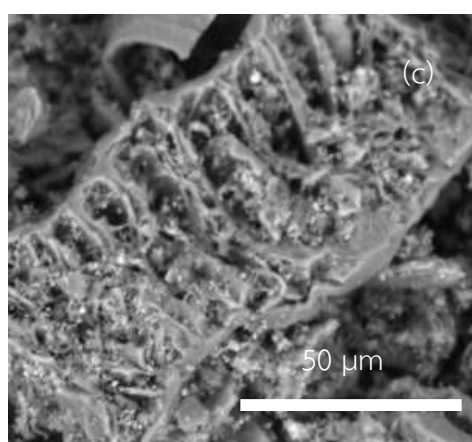
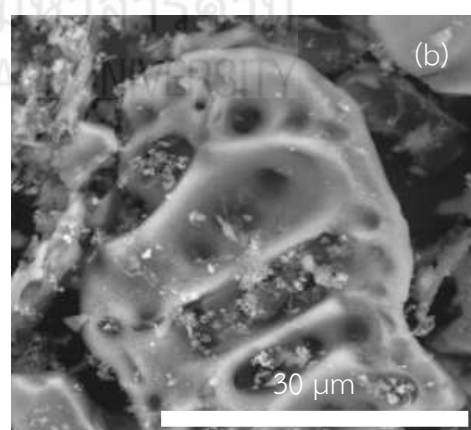
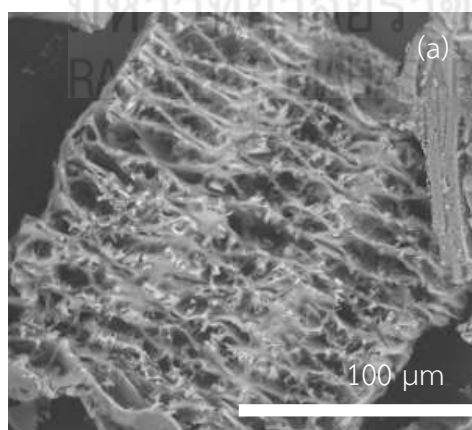
ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของ  $\text{SiO}_2$  และวัสดุนาโน  $\text{TiO}_2 @\text{SiO}_2$

Assignments	Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )			
	$\text{SiO}_2$	$5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$	$10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$	$15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$
Si-O-Si	438	-	-	-
O-Si-O	798	778	778	777

Si-O-Si	1044	1029	1031	1030
Ti-O-Ti	-	622	693	691

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ซีลิกาจากแคลบข้าวโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในซีลิกาจากแคลบ ไปทดสอบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) จากภาพที่ 4.8 b-d จะเห็นได้ว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคระดับนาโนจะดูดซับเข้าไปในบริเวณพื้นผิวและรูพรุนระดับไมโครของซีลิกาจากแคลบ ทำให้เกิดเป็นริ้วสันและรอยย่น ในการเพิ่มรอยย่นในวัสดุนาโนคอมโพสิต  $\text{TiO}_2@SiO_2$  เป็นการเพิ่มพื้นผิวการสัมผัสมากขึ้นจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกให้มากยิ่งขึ้น (Chen, Zhao, Wang, Li and Lei, 2015, pp. 1609-1611) วัสดุนาโนคอมโพสิต  $\text{TiO}_2@SiO_2$  จากภาพที่ 4.9b ที่อัตราส่วน 5% โดยน้ำหนักของ  $\text{TiO}_2$  สามารถกระจายทั่วอนุภาค  $SiO_2$  และแทรกเข้าไปในรูพรุน เมื่อเพิ่มปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  เป็น 10% โดยน้ำหนัก อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  จะดูดซับที่ผิวและรูพรุนเข้าไปอยู่ในแนวเส้นและร่องของรูพรุนดังภาพที่ 4.8c และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมอนุภาคนาโน เป็น 15% โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมมีปริมาณมากเมื่อแทรกเข้าไปในรูพรุนของซีลิกาจากแคลบพบว่าไทเทเนียมอนุภาคนาโนเหลือล้นออกมาด้านนอกและรวมตัวกันเป็นก้อนและกระจุกกระจายทั่วพื้นผิวของซีลิกา ภาพที่ 4.8d



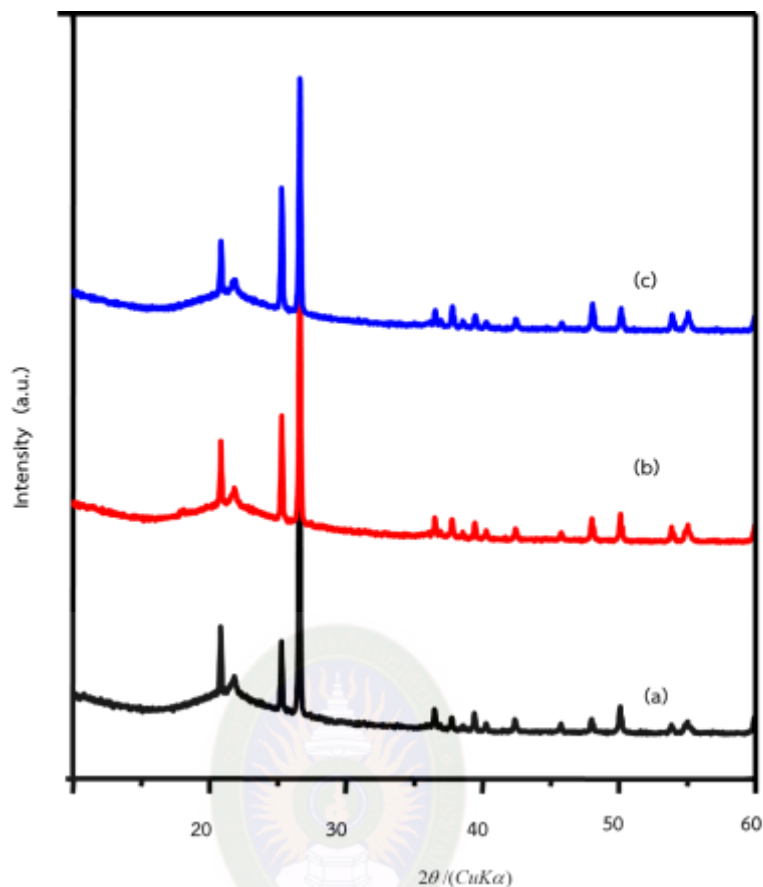
ภาพที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (b),  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (c) และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  (d)

#### 4.4 ผลการเตรียมวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบข้าว ( $\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ Nanocomposite)

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

จากการเตรียม  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  Nanocomposite นำวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) จากภาพที่ 4.10 พบว่าวัสดุนาโนปรากฏจุดสูงสุดที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.8^\circ$ ,  $21.8^\circ$  และ  $26.6^\circ$  มีทิศทางผลึกเป็น 100, 002 และ 110 ตามลำดับ เป็นโครงสร้างใหม่ของไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ (Klankaw, Chawengkijwanich, Grisdanurak, and Chiarakorn, 2012, pp. 343-352) ซึ่งลักษณะที่ได้จะคล้ายกับการวิเคราะห์วัสดุผสมนาโน  $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  จากการวิเคราะห์ลักษณะไม่พบพีคของสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมอาจเนื่องจากปริมาณของสารสกัดที่ได้มีปริมาณที่น้อยและเมื่อเติมสารสกัดลงใน  $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  สารสกัดจะแทรกเข้าไปในรูพรุนของซิลิกาจากแกลบข้าว





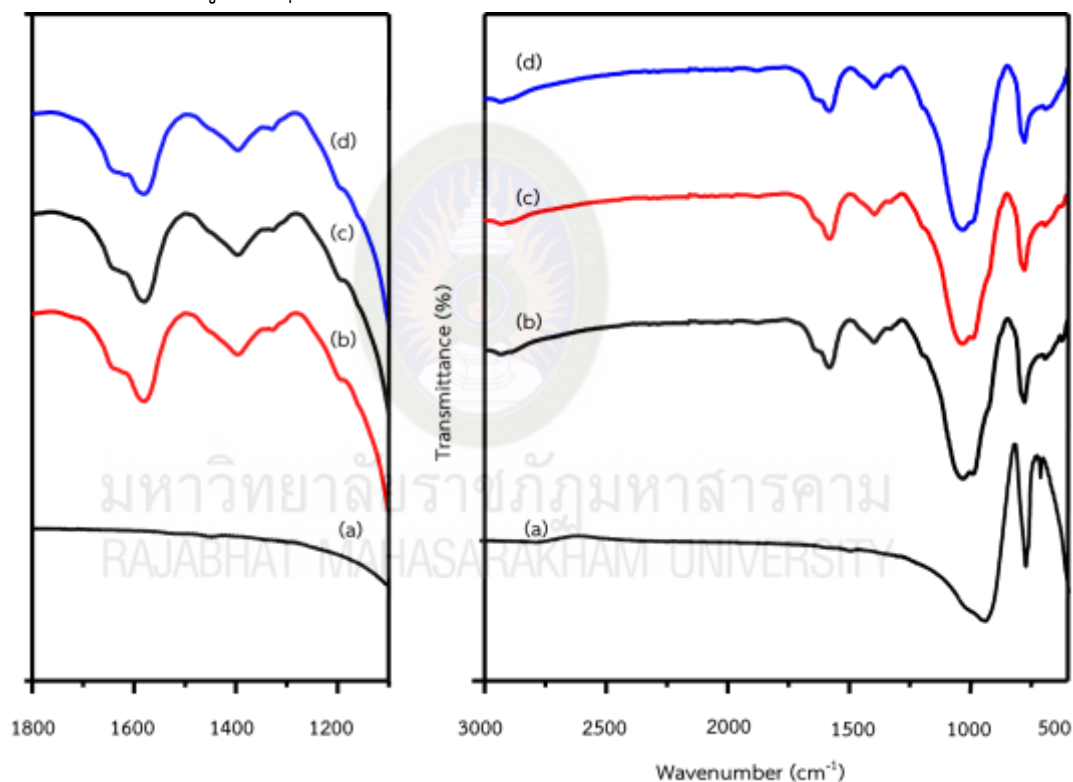
ภาพที่ 4.9 XRD Patterns ของ 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (a), 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (b) และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (c)

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มนอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากการทดสอบ FT-IR ของวัสดุผสมนาโน TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> โดยการเติมสารสกัดที่เตรียมจากเปลือกกล้วยหอมลงในวัสดุผสมนาโน TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> พบสเปกตรัมที่ตำแหน่งความถี่และการสั่นของโมเลกุล ในภาพที่ 4.10 (b-d) และตารางที่ 4.2 โดยสเปกตรัมของ 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ปรากฏที่เลขคลื่น 1396-1389 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นลักษณะของการสั่นในโมเลกุล -C-O- และ -C=C- stretching ในวงแหวนของอะโรมาติก (Das and Velusamy, 2014, 2283) ที่เลขที่คลื่น 787-786 cm<sup>-1</sup> เป็นการสั่นของโมเลกุล O-Si-O stretching ที่เลขที่คลื่น 1044-1029 cm<sup>-1</sup> มีกลุ่มของ Si-O-Si stretching (Rohani, Rosiyah and Seng, 2015, p. 87) ที่เลขที่คลื่น 691-622 cm<sup>-1</sup> และ 987-959 cm<sup>-1</sup> เป็นกลุ่มของ Ti-O, Ti-O-Ti และ โมเลกุลของ Ti-O-Si Stretching (Linsong, Honghao, Jianliang and Xiaohong. 2017, pp. 9377-9381) ยืนยันการเกิด SiO<sub>2</sub> และ TiO<sub>2</sub>

สารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสารโพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์

(Ramakrishnan, Selvaraj, Radhakrishnan, Radhakrishnan, Palanisamy, Poongodi and Babu, 2011, pp. 1128-1133) ซึ่งเป็นโมเลกุลของสารต้านอนุมูลอิสระมีประสิทธิภาพในการลดประจุของโลหะ จากภาพที่ 4.11 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมจากรูปที่เพิ่มกำลังขยายของวัสดุผสมนาโน  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  ที่เตรียมได้จะพบแถบการดูดกลืนที่เลขที่คลื่นประมาณ  $1723$  และ  $1607 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จากสายโพลีเมอร์ เช่น สารโพลีฟีนอล สารฟลาโวนอยด์ (Rivera-Rangel, Gonzalez-Munoz, Avila-Rodriguez, Razo-Lazcano and Solans, 2017, p.6) โดยข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่ และชนิดการสั่นของพันธะทั้ง  $5\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$ ,  $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  และ  $15\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 ยืนยัน  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และสารออกแกนิกอยู่ในวัสดุผสมที่เตรียมได้



ภาพที่ 4.10 FT-IR Spectra ของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $5\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  (b),  $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  (c) และ  $15\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  (d)

#### ตารางที่ 4.2

ความถี่และชนิดการสั่นของพันธะด้วยเทคนิค FT-IR ของ สารสกัดหยาบ และวัสดุนาโน  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$

Assignments	Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )			
	SiO <sub>2</sub>	5%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub>	10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub>	15TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub>
-C-O-	1393.68	1393.68	1389.37	1396.24
H-O-H and -	-	1723, 1607	1723, 1607	1723, 1607
OH	-	787.50	787.19	786.30
Si-O	798	779	778.55	777.32
O-Si-O	-	622.01	620.58	619.72
Ti-O and Ti-	-	960.08	959.54	987.45
O-Ti				
Ti-O-Si				

#### 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลู

ในการศึกษานี้เป็นการเตรียมวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม ในซิลิกาที่สกัดได้จากแกลบเพื่อนำมาทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู โดยทดสอบด้วย SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (ในอัตราส่วนTiO<sub>2</sub> : 5%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub>) และ TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (ในอัตราส่วนTiO<sub>2</sub> : 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>) ผลการทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู เป็นดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายในที่มีด

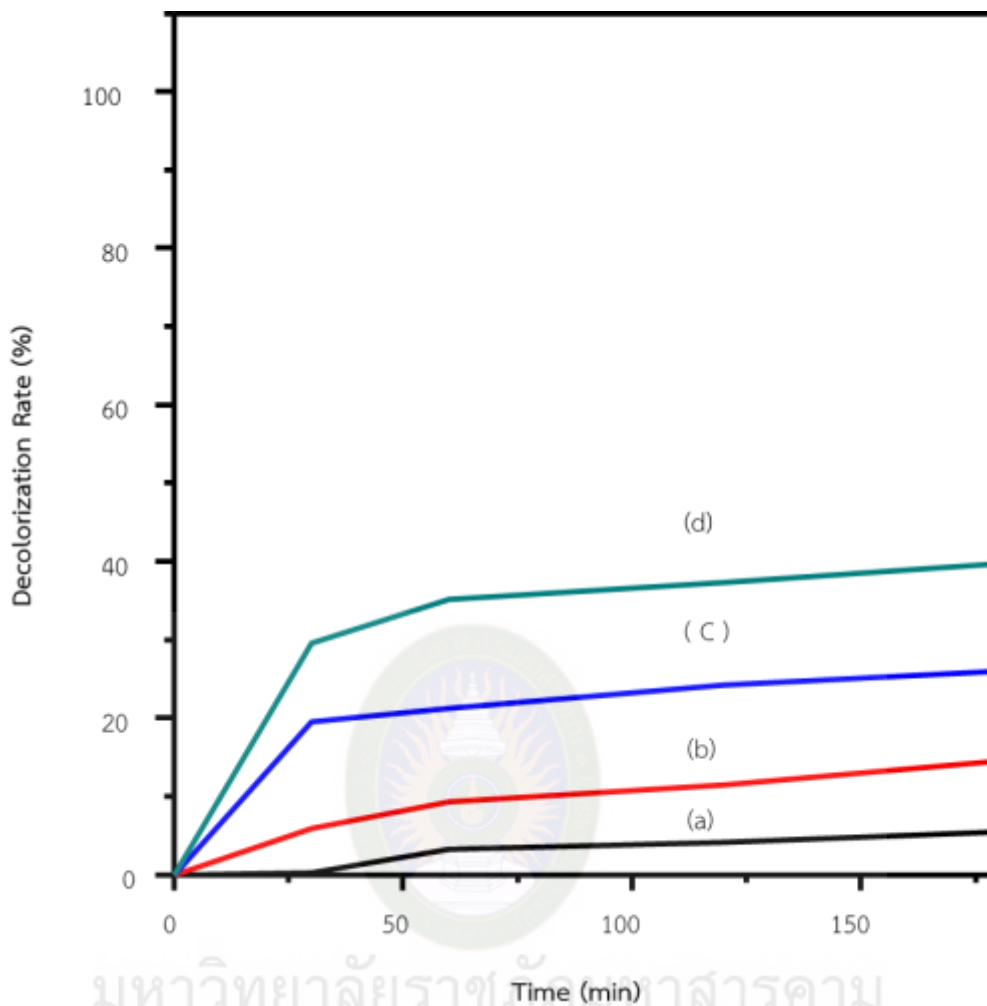
การทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm ภายใต้สภาวะของ SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ในที่มีด ทำการทดลองที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มคงที่ที่เวลา 120 นาที และ SiO<sub>2</sub> มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารละลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดที่ 5.45 TiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดที่ 14.44 เปอร์เซ็นต์ 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดที่ 24.63 เปอร์เซ็นต์ และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> มีอัตราการย่อยสลายได้สูงสุด โดยมีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุดที่ 39.72 เปอร์เซ็นต์ จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารละลายเมทิลีนบลู

ในวัสดุผสมต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยาในที่มืด แสดงว่าวัสดุผสม สามารถดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูได้โดย จากค่าการดูดซับจะสอดคล้องกับพื้นที่ผิวของวัสดุผสมที่เตรียมได้และผลของการดูดซับยืนยันได้ว่าการเตรียมวัสดุผสมระหว่าง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของ  $\text{SiO}_2$  ได้ นอกจากนี้ สารสกัดที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอมยังสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุผสมได้เช่นกัน ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู ดังตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.11

### ตารางที่ 4.3

เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  และ  $10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$  ภายในที่มืด

เวลา (นาที)	การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู (%)			
	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$	$10\%\text{TiO}_2/\text{Fla}@\text{SiO}_2$
30	0.31	5.88	19.58	29.55
60	3.31	9.3	21.29	35.13
90	4.16	11.44	22.93	37.27
120	5.45	14.44	24.63	39.72



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO<sub>2</sub> (a), TiO<sub>2</sub> (b), 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (c) และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (d) ในที่มีด

#### 4.5.2 การสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงจากธรรมชาติ

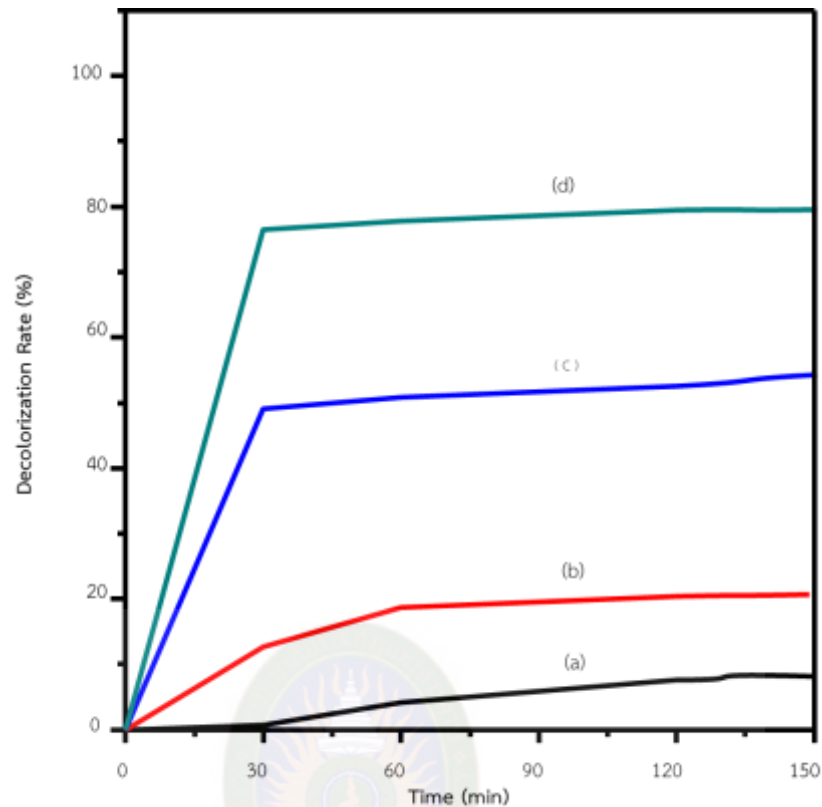
การทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm ภายใต้สภาวะของ SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> โดยทำปฏิกิริยาภายใต้แสงแดดธรรมชาติ ทำการทดลองที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่า 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> มีอัตราการย่อยสลายได้สูงสุด โดยมีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลา 120 นาทีได้สูงสุดที่ 79.53 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 52.55 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ TiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 21.29 เปอร์เซ็นต์ และ SiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 8.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังตาราง 4.4 และภาพที่ 4.12 พบว่าเมื่อ

การทดลองภายใต้แสงจากธรรมชาติเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นจากสถานะในที่มีด 39.81 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีของ 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารละลายเมทิลีนบลู เพิ่มขึ้นจากในที่มีด 27.92 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสามารถย่อยสลายได้ดีเนื่องจากรูพรุนของ SiO<sub>2</sub> สามารถดูดซับเอาสีของสารละลายเมทิลีนบลู และสารชีวโมเลกุลที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอมให้อิเล็กตรอนกับ TiO<sub>2</sub> ดังนั้นจึงสามารถสนับสนุนการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้อย่างมีประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี

#### ตารางที่ 4.4

เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ภายใต้แสงจากธรรมชาติ

เวลา (นาที)	การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู (%)			
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	10%TiO <sub>2</sub> @SiO <sub>2</sub>	10%TiO <sub>2</sub> /Fla@SiO <sub>2</sub>
30	0.74	12.73	49.13	76.53
60	4.16	18.72	50.84	77.82
90	7.39	20.43	51.63	78.43
120	8.44	21.29	52.55	79.53



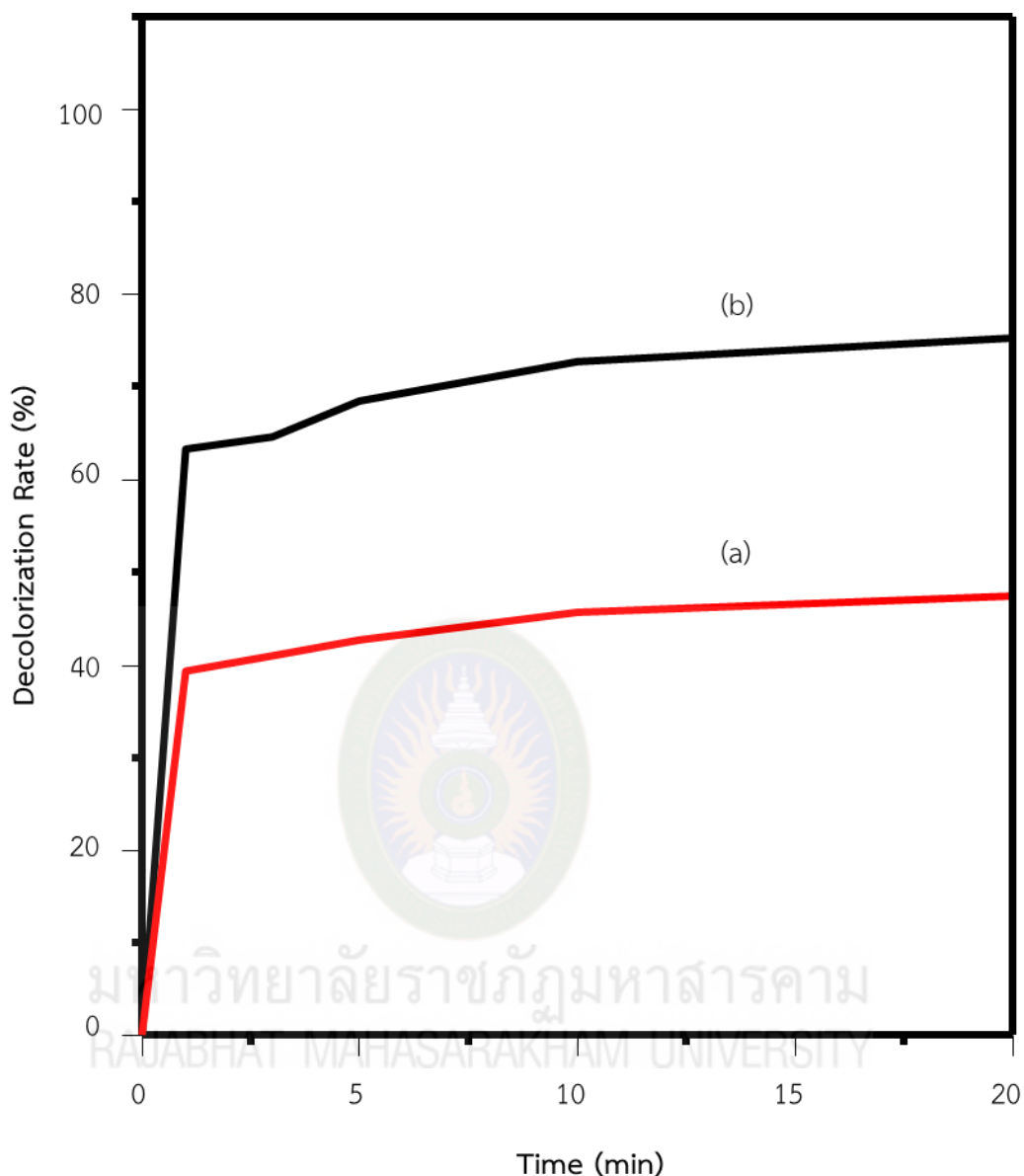
ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO<sub>2</sub> (a), TiO<sub>2</sub> (b), 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (c) และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ

การทดลองภายใต้แสงแดดจากธรรมชาติพบว่า SiO<sub>2</sub> สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูได้ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับเนื่องจาก SiO<sub>2</sub> เป็นวัสดุมีรูพรุน (Chen, Zhao, Wang, Li and Lei, 2015, p.1609) ยืนยันได้จากสีของ SiO<sub>2</sub> เปลี่ยนจากผงสีขาวเป็นสีน้ำเงินตามสีของสารละลายเมทิลีนบลูหลังจากทำปฏิกิริยา ดังภาพที่ 4.13 ในขณะที่ TiO<sub>2</sub> และวัสดุผสมสามารถเกิดการดูดซับควบคู่กับการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงดังจะเห็นได้จากสีของวัสดุผสมหลังทำปฏิกิริยามีสีน้ำเงินอ่อนแสดงว่ามีบางส่วนสลายไปจึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารละลายเมทิลีนบลูสูงกว่า (Attia, Afifi and Hassan, 2014, pp. 3998-4005)



**ภาพที่ 4.13** การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO<sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (a) SiO<sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (b) TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (c) TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (d) TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ก่อนทำปฏิกิริยา (e) และ TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> หลังทำปฏิกิริยา (f)

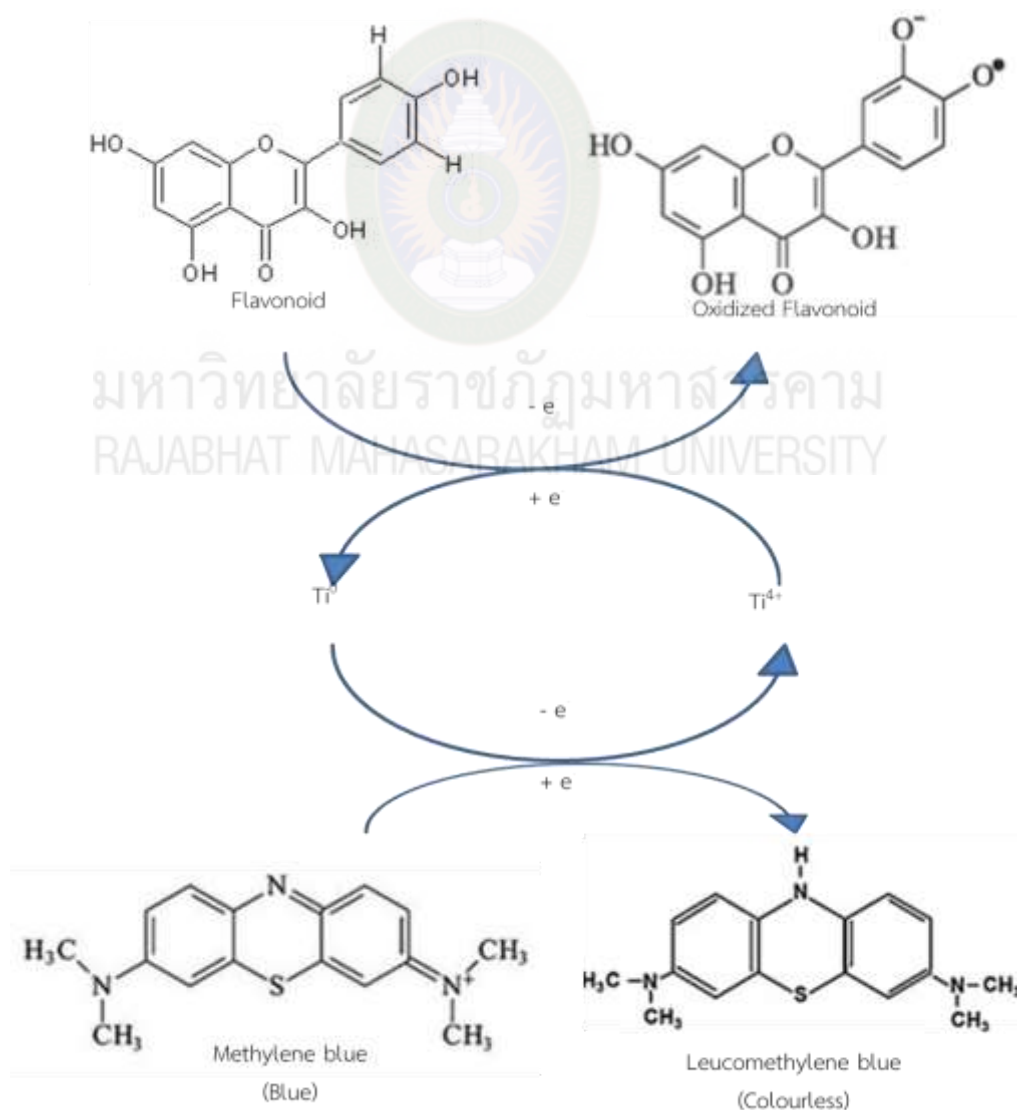




ภาพที่ 4.14 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย  $10\%TiO_2@SiO_2$  (a) และ  $10\%TiO_2/Fla@SiO_2$  (b) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ

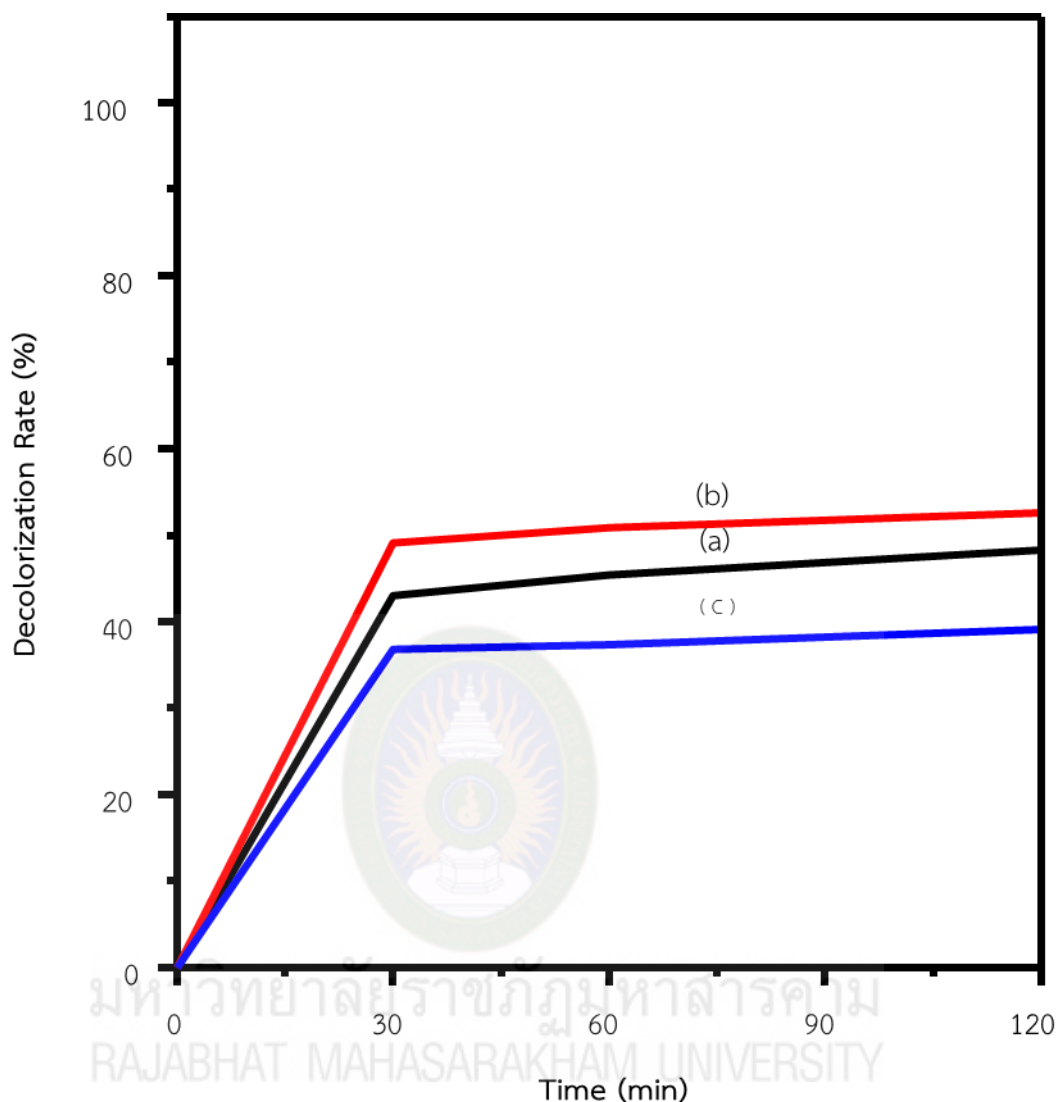
เมื่อทำการเตรียมวัสดุผสม  $10\%TiO_2@SiO_2$  พบว่ามีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงกว่า  $TiO_2$  แสดงว่า  $SiO_2$  สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งเชิงแสงของ  $TiO_2$  ได้ เนื่องจาก  $SiO_2$  เป็นวัสดุที่มีรูพรุนทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นโดยสมบูรณ์ที่ 120 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสม  $10\%TiO_2/Fla@SiO_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ถึง 76.53 เปอร์เซ็นต์ ที่ 30 นาที แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ  $TiO_2$  ได้ เนื่องจากมี

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารอินทรีย์ที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอมซึ่งทำหน้าที่เหมือน  $\text{Na}_2\text{BrH}_4$  เป็นตัวให้อิเล็กตรอนไปยังที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ในเวเลนซ์แบนด์ (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานจากแสงที่มากกว่า Band gap อิเล็กตรอนในไทเทเนียมจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จาก เวเลนซ์แบนด์ (Valenceband) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ทำให้เกิดโฮล ขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pairs) จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังสารละลายเมทิลีนบลู (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) เมื่อสารละลายเมทิลีนบลูรับอิเล็กตรอนจะเกิดการเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสารละลายที่ไม่มีสี (Das and Velusamy, 2014, p.2285, Liu, Zhang and Zhang, 2016, pp. 195-196) ทำให้  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  สามารถเกิดปฏิกิริยาการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู สมบูรณ์โดยใช้เวลาเพียง 30 นาที เท่านั้น



**ภาพที่ 4.15** กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$

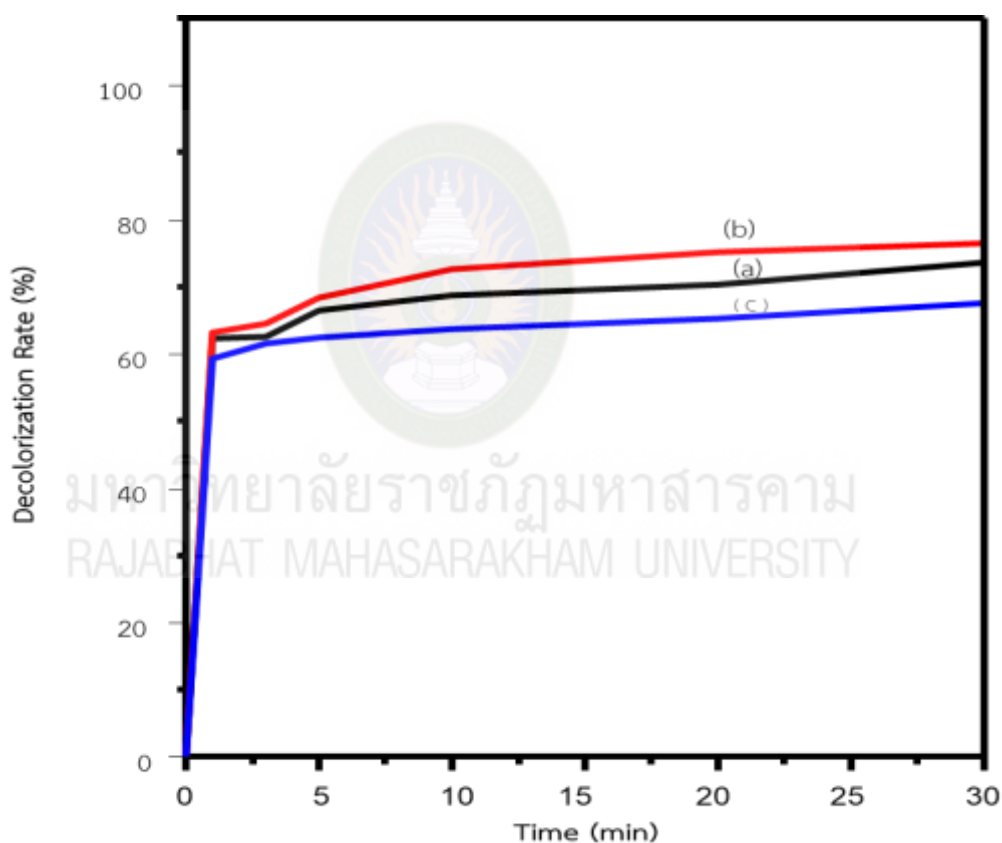
เมื่อทำการศึกษาผลของ  $\text{TiO}_2$  ใน  $\text{SiO}_2$  ต่อการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยทำการทดลองนี้  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$ ,  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  ได้ผลดังภาพที่ 4.16 จากผลการทดลองการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู พบว่าทุกอัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  สามารถเกิดปฏิกิริยาการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้อย่างสมบูรณ์ใน 120 นาที โดย  $10\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  ย่อยสลายได้สูงสุดที่ 52.55 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่  $5\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  และ  $15\%\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  สามารถสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ 48.32 และ 39.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  ใน  $\text{SiO}_2$  ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งเชิงแสงได้ดีที่สุด คือ 10 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค  $\mu$  Scanning electron Microscope (SEM) (จากภาพที่ 4.8) ที่พบว่าอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  กระจายตัวสม่ำเสมอที่สุด



ภาพที่ 4.16 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วยวัสดุนาโน 5%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (a), 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (b) และ 15%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ

การทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของ TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ในอัตราส่วน 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub>, 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ผลการทดสอบการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซีกจากกล้วยภายใต้แสงจากธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ผลดังภาพที่ 4.16 พบว่าที่เวลา 30 นาที วัสดุนาโน TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ทุกอัตราส่วน สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ถึง 76.53 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า สารฟลาโวนอยด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาเชิงแสงโดยไม่ขึ้นกับ

อัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  อาจเป็นไปได้ว่าวัสดุผสมมีประสิทธิภาพในการสลายได้ดีจนทำให้สารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm สลายเกือบหมดจึงไม่เห็นความแตกต่าง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ต้องมีการกระจายตัวที่เหมาะสมภายใน  $\text{SiO}_2$  ด้วยจึงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดและสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีเมทิลินบลูมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้ดี เนื่องจากสารชีวโมเลกุลที่ได้จากสารสกัดมีความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน และ  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารสกัดและเมทิลินบลูโดยทำหน้าที่เป็นสารรีด็อกซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมักเรียกว่าเป็นผลการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron Transfer) (Edison and Sethuraman, 2012, pp.1351-1357)



ภาพที่ 4.17 การย่อยสลายสีของเมทิลินบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วยวัสดุนาโน 5% $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  (a), 10% $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  (b) และ 15% $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  (c) ภายใต้แสงจากธรรมชาติ

#### 4.5.3 ภายใต้แสงรังสียูวี

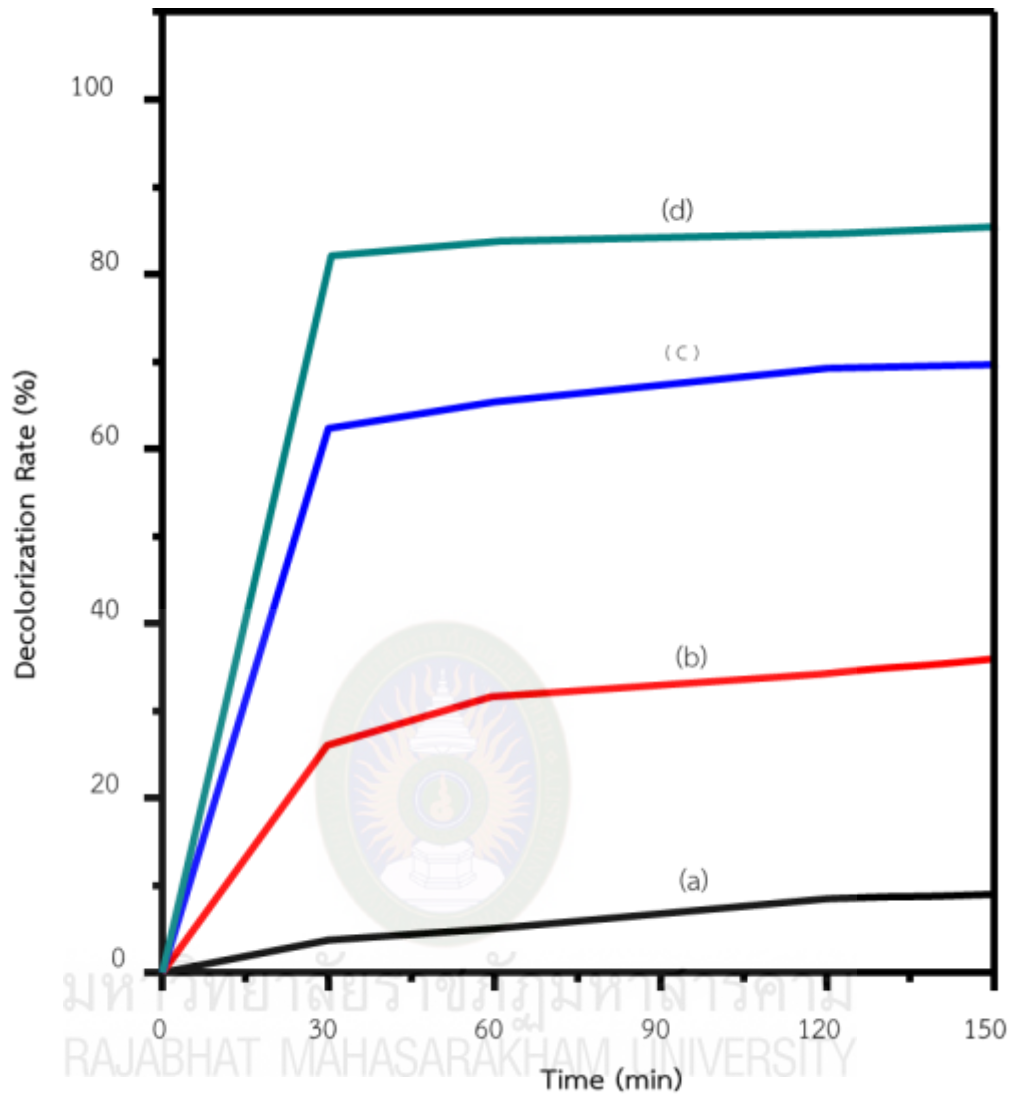
การทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm ภายใต้สภาวะของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , 10% $\text{TiO}_2@\text{SiO}_2$  และ 10% $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  โดยทำปฏิกิริยาภายใต้

รังสียูวี ทำการทดลองที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่า  $10\%TiO_2/Fla@SiO_2$  มีอัตราการย่อยสลายได้สูงสุด โดยที่เวลา 30 นาที มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุดที่ 82.1 เปอร์เซ็นต์ และรองลงมาคือ  $10\%TiO_2@SiO_2$  มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 62.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่  $TiO_2$  มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 26.01 เปอร์เซ็นต์ และ  $SiO_2$  มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลู สูงที่สุดที่ 3.73 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.18

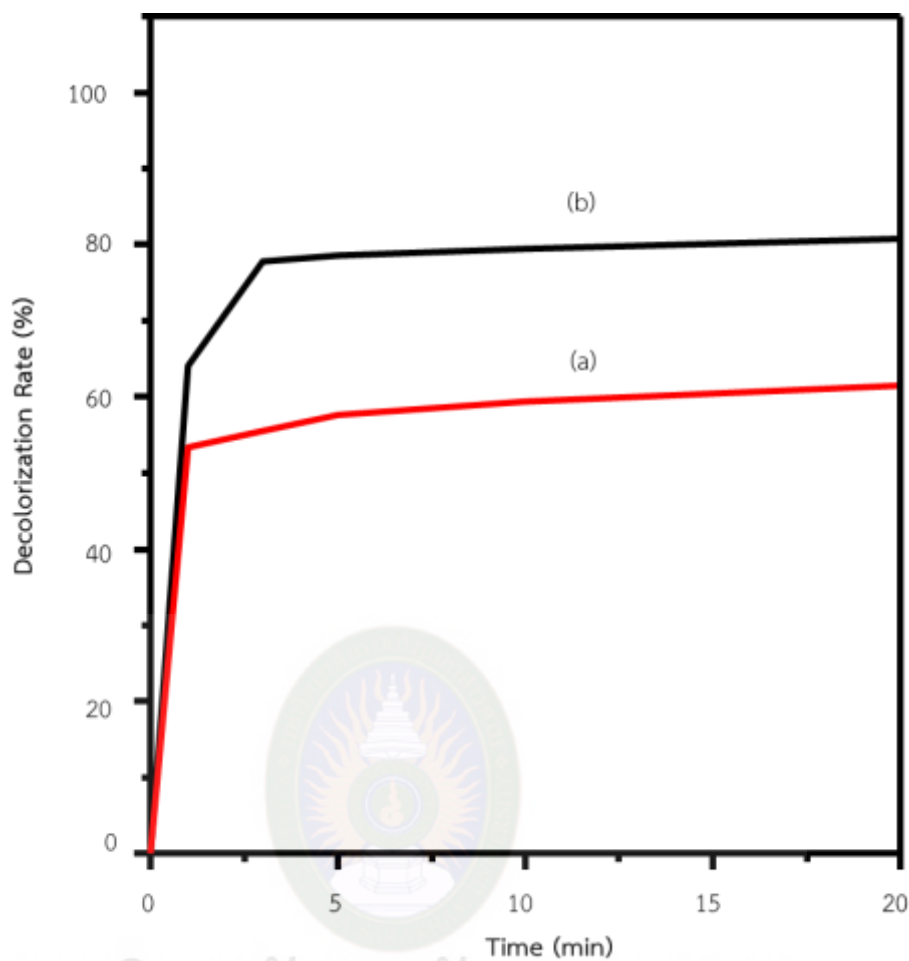
#### ตารางที่ 4.5

เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 30 ppm ด้วย  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $10\%TiO_2@SiO_2$  และ  $10\%TiO_2/Fla@SiO_2$  ภายใต้แสงรังสียูวี

เวลา (นาที)	การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู (%)			
	$SiO_2$	$TiO_2$	$10\%TiO_2@SiO_2$	$10\%TiO_2/Fla@SiO_2$
30	3.73	26.01	62.4	82.1
60	5.02	31.57	65.4	83.81
90	8.44	34.14	69.25	84.67
120		9.73	38	70.06



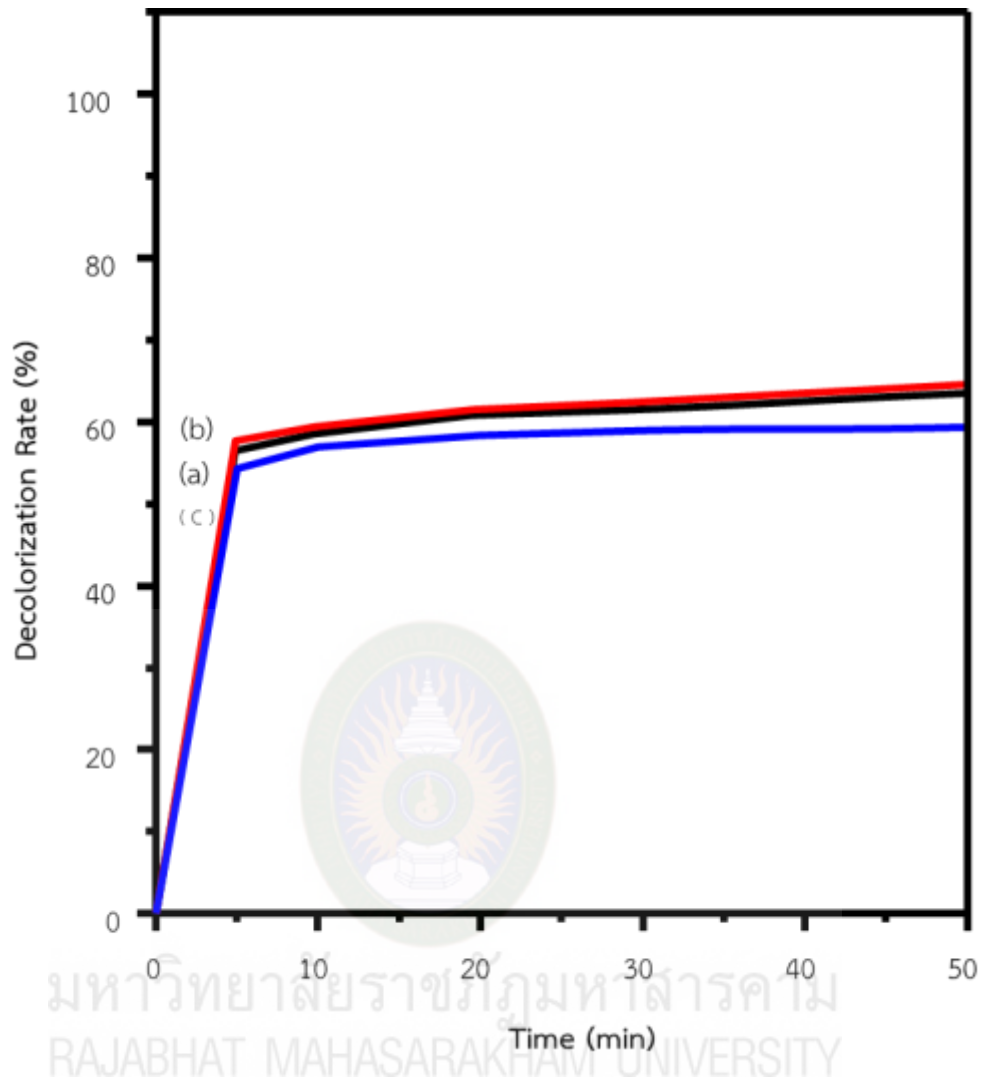
ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย SiO<sub>2</sub> (a), TiO<sub>2</sub> (b), 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (c) และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงจากรังสียูวี



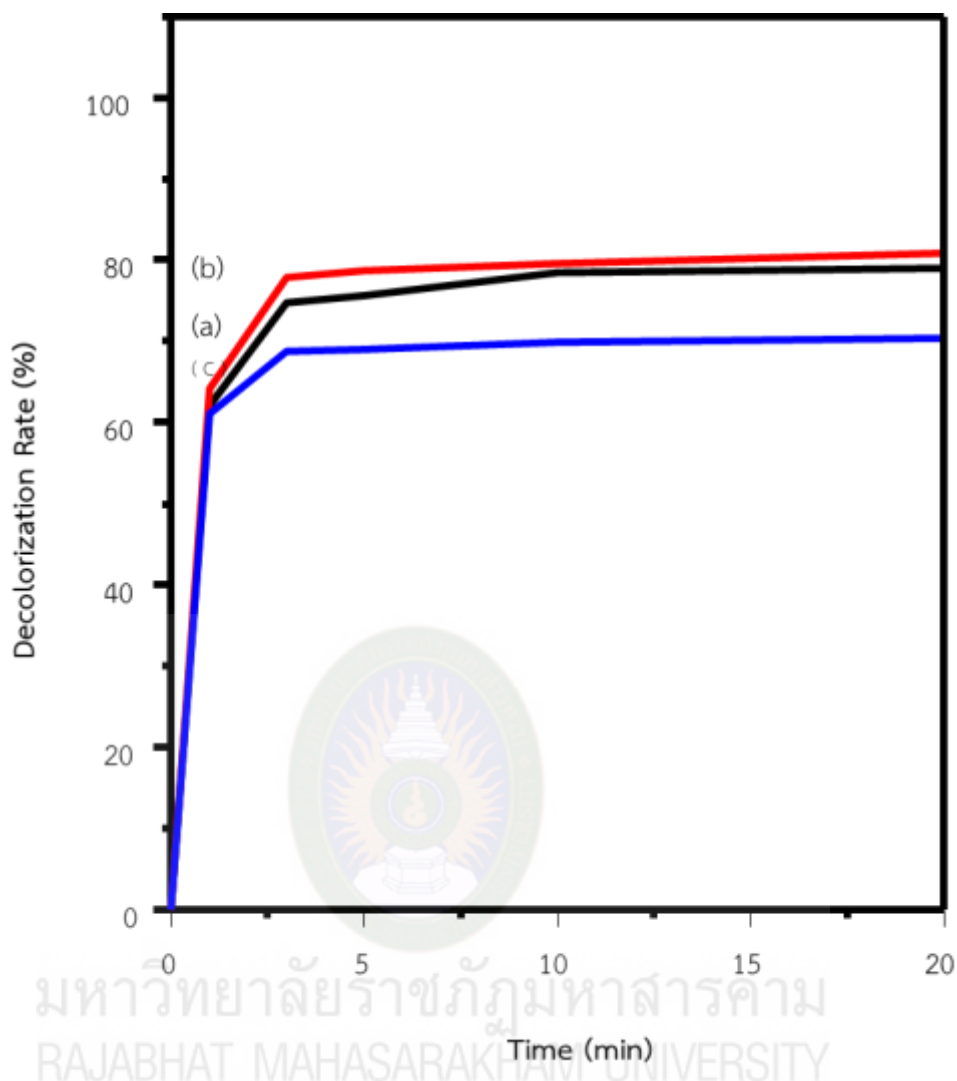
ภาพที่ 4.19 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (a) และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (b) ภายใต้แสงจากรังสียูวี

เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู ระหว่างวัสดุผสม 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ภายใต้แสงจากรังสียูวี ดังภาพที่ 4.19 พบว่า 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงกว่า 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> แสดงว่า ภายใต้แสงจากรังสียูวี ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งเชิงแสงของ TiO<sub>2</sub> และสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมใน 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี





ภาพที่ 4.20 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 5%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (a), 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (b) และ 15%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงรังสียูวี



ภาพที่ 4.21 การย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 30 ppm ด้วย 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (a), 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (b) และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> (c) ภายใต้แสงรังสียูวี

จากภาพที่ 4.20 พบว่าที่เวลา 30 นาที วัสดุนาโน TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> สามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ 62.40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ 10%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 61.49 และ 58.97 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ 15%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub> และ 5%TiO<sub>2</sub>@SiO<sub>2</sub>

ผลจากการทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยวัสดุนาโน TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ภายใต้แสงจากรังสียูวี ดังภาพที่ 4.21 พบว่าสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ 82.10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ 10%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ภายในเวลา 30 นาที และ 79.84 72.18 สำหรับ 5%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> และ 15%TiO<sub>2</sub>/Fla@SiO<sub>2</sub> ตามลำดับ พบว่าภายใต้แสงรังสียูวี 10% TiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพสูงสุดสอดคล้องกับการทดลองภายใต้แสงจากธรรมชาติและในที่มืด การทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิดมีแนวโน้ม

เช่นเดียวกัน โดยการทดลองภายใต้แสงรังสียูวีมีประสิทธิภาพสูงกว่าภายใต้แสงจากธรรมชาติ ส่วนในที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเป็นการดูดซับสารเท่านั้น



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้ได้ศึกษาเตรียมวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยและซิลิกาจากแกลบ เพื่อใช้สำหรับในการย่อยสลายสีของเมทิลินบลู การศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียม คือ 5, 10 และ 10 % โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบข้าว พบว่าสามารถย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 30 ppm ภายใต้แสงจากธรรมชาติ แสงรังสียูวี และภายในที่มีด ผลที่ได้สรุปได้ดังนี้

5.1.1  $\text{SiO}_2$  ที่เตรียมได้จากแกลบข้าวเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้เกิดรูพรุนที่ชัดเจน เหมาะสำหรับนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการดูดซับหรือการเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ทางเคมีที่ดี

5.1.2  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ มีขนาดอนุภาคเล็กลง เมื่อนำไปเตรียมร่วมกับ  $\text{SiO}_2$  ที่เตรียมได้จากแกลบข้าว ซึ่งช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ  $\text{TiO}_2$  มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทั้งในสภาวะภายใต้แสงจากธรรมชาติ แสงรังสียูวี และในที่มีด

5.1.3 วัสดุนาโน  $\text{TiO}_2@SiO_2$  เมื่อเตรียมร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมจะได้  $\text{TiO}_2/\text{Fla}@SiO_2$  เมื่อนำไปเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในเมทิลินบลู พบว่าสามารถย่อยสลายสีของเมทิลินบลูได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 1 นาทีซึ่งเร็วกว่าในวัสดุนาโน  $\text{TiO}_2@SiO_2$  เท่านั้น และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก 4 ครั้ง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 พัฒนาเทคนิคการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว ให้ได้รูปร่างทรงกลมเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาณและขนาดของรูพรุนของซิลิกาจากแกลบข้าว

5.2.2 ควรศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในซิลิกาจากแกลบข้าวด้วยเทคนิคอื่น

5.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสีย้อมอื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ด้วย  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  ที่เตรียมได้



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



## บรรณานุกรม

- กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. (2553). การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกสีย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- คุณวุฒิ ประมวลวุฒิธรณ และ จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์. (2555). การพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิตพลาสติกชีวภาพในกระบวนการอัดขึ้นรูป ด้วยการออกแบบการทดลอง. ใน การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 1305-1312.
- จิรวรรณ พิจารย์, วาสนา พันชน, มิกิ กัณณะ, สราวุฒิ สมนาม และ สัมพันธ์ วงศ์นาวา. (2558). การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเพนต์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 20, 174-185.
- ชลดา อีรการณวงศ์. (2554). ปฏิกริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 6, 62-73.
- ชลดา อีรการณวงศ์. (2555). วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์ โครงสร้าง และการประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, (14), 44-53.
- ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล. (2550). การปรับแต่งผิวหน้าของไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง (วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เขาว์ ศรีเพชรดี. (2553). การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากแก้วกลีบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยกระบวนการโซลเจล (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปกร.
- ณัฐพร ชะบา. (2556). การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซิลิกาจากแก้วกลีบเป็นองค์ประกอบ (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐพล ภู่อระกุล, กนกพร บุญนวน. (2550). การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแก้วกลีบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมล้อยาง (รายงานผลการวิจัย). นครสวรรค์: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.
- ณัฐยา ประมวลทรัพย์. (2557). การผลิตและวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและการเผาแคลไซน์ (วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์มหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.



- ธนาชัย จงสุวรรณไพศาล. (2552). ผนังดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาที่สกัดจากแกลบ. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 6, 49-63.
- นัตดา เวชชากุล. (2555). ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, 67, 25-30.
- บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร. (2548). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (รายงานผลการวิจัย). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ผกามาศ ชูสิทธิ์ และ กิตติพงษ์ สุวีโร. (2558). การใช้ขุยมะพร้าวเพื่อเสริมความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์แผ่นยาง (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- พลกษั ตัญตรีรัตน์. (2555). การสลายพาราครอทไดคลอไรด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนตัวรองรับซิลิกาจากแกลบข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 22(3), 327-336.
- พัชรภรณ์ พิมพ์จันทร์, ลัดดาวัลย์ จำเริญพัฒน์. (2547). การตรวจหาฟลาโวนอยด์ในเปลือกกล้วยหอม (รายงานผลการวิจัย). มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- ภัทรานิตฐ์ ทองเทพ. (2558). การพัฒนาเทคนิคโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิสเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการกำจัดสีย้อมอินทรีย์. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2554). วัสดุรูพรุนคืออะไร. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 20, 60-69.
- วรรณทิตา ลาภศิริ. (2546). การสกัดสารฟลาโวนอยด์จากเปลือกมะนาว. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรางคณา วารีน้อยเจริญ. (2554). การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในโภชนเภสัชภัณฑ์. *วารสารคลินิกอาหารและโภชนาการ*, 4(2), 77-82.
- วิภพ สุทชนะ. (2556). ฤทธิ์ต้านมะเร็งของฟลาโวนอยด์: กลไกการออกฤทธิ์. *ศรีนครินทร์เวชสาร*, 28(4), 567-582.
- วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล. (2547). การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ละเยียดพิเศษจากกากของเสีย (รายงานวิจัย). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระพล ทับทิมดี, รัชวุธ สุทธิ และ อีร์วัฒน์ เหล่านากุล. (2559). การแยกซิลิกาจากองค์ประกอบที่ได้จากการเผาแกลบข้าว. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติระดับชาติ*, 3, 143-147.

- ศรัญญา ชัยวิเชียร. (2555). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุนาโนคอมโพสิต  $\text{BiVO}_4/\text{CeO}_2$  ชนิดใหม่เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศราวุธ ศรานันทรวงศ์, สุพจน์ พัฒนะศรี และปิยะสาร ประเสริฐธรรม. [ม.ป.ป.]. การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{MgO-ZSM-5}$ . [ม.ป.ท.: ม.ป.พ.].
- ศศิมา จันสุ. (2556). การสังเคราะห์คอปเปอร์ (I) ออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์และสมบัติการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศิริประภา ชัยเนตร, ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และครรชิต คงคาเงิน. (2556). การดูดซับเมทิลลีนบลูในน้ำเสียโดยใช้เปลือกไข่ (รายงานผลการวิจัย). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ.
- สรรรค์ จิตรไคร่ควร. (2009). การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 57(179), 21-24.
- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. (2553). ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (Nano Safety) สำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ประกอบการ และนักวิชาการ. นนทบุรี: สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา.
- สุดาพร ตังควนิช. (2549). การผลิตซิลิกาจากแกลบเพื่อใช้ในเทคนิคโครมาโทกราฟี (รายงานผลการวิจัย). อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- หทัยทิพย์ พันธุ์ดีดำ. (2556). การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อภิชน วัชเรนทร์วงศ์, ศรัญญา ทองอุ่น. (2555). ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (รายงานผลการวิจัย). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรอนงค์ จุลพันธ์, ธงไทย วิฑูรย์ และ เมตตา เจริญพานิช. (2554). การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซพอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ. *วารสารวิศวกรรมสาร มก.* 75(24), 103-120.
- อารีพร อ่อนตาม. (2558). การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุไฮบริดไทเทเนียมไดออกไซด์กับแคดเมียมซัลไฟด์. สืบค้นจาก <http://newtdc.thailis.or.th/docview.aspx?tdcid=42918>
- เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง. (2550). การเตรียมซิลิกาและซิลิกอนจากแกลบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์. ใน *รวมบทความย่อผลงานวิจัย 2554*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- Ammar Houas, Hinda Lachheb, Mohamed Ksibi, Elimame Elaloui, Chantal Guillard and Jean-Marie Herrmann. (2001). Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 31, 145–157.
- Andreozzi Rocco, Insola Alissa Palazzo, Caprio Vittorio, Marotta Robert William and Tufano Peter. (1996). The use of manganese dioxide as a heterogeneous catalyst for oxalic acid ozonation in aqueous solution. *Applied Catalysis A: General*, 138, 75-81.
- Attia Nour F., Afifi Heshiam A. and Hassan Mohamed A. (2015). Synergistic Study of Carbon Nanotubes, Rice Husk Ash and Flame Retardant Materials on the Flammability of Polystyrene Nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 2, 3998 – 4005.
- Bakardjieva, S.,Subrt, J.,Stengl, V.,Dianez, M.J.,Sayagues,M.J. (2004). Photoactivity of anatase-rutile TiO<sub>2</sub> nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of homogeneously precipitated anatase. *Applied Catalysis B: Environmental*, 58, 193-202.
- Boonmeemak Wanchai, Fongsamut Chalermpan and Ngaotrakanwiwat Pailin. (2015). Development of TiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Compound with Polyaniline for Electron Storage. *Energy Procedia*, 79, 903-909.
- Chen Hui, Zhao Lei, Wang Xitang, Li Shujing and Lei Zhongxing. (2015). Preparation of Nanoporous TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Composite with Rice Husk as Template and Its Photocatalytic Property. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44,1609-1611.
- Das Indra J and Velusamy Periyasamy. (2014). Catalytic reduction of methylene blue using biogenic gold nanoparticles from *Sesbania grandiflora L*, *Journal of the Taiwan Institute of chemical Engineers*, 45, 2280-2285.
- Edison T. Jebakumar Immanuel and M.G. Sethuraman. (2012). Instant green synthesis of Silver nanoparticles using *Terminalia chebula* fruit extract and evaluation of their catalytic activity on reduction of methylene blue. *Process Biochemistry*, 47(9), 1351-1357.
- Honghao Yan, Jianliang Xiao, Xiaojie Li, and Xiaohong Wang. (2017). Characteri-

- zation and photocatalytic properties of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposites prepared through gaseous detonation method. *Ceramics International*, 43, 9377-9381.
- Huriye Banu Yener and Şerife Şeref Helvacı. (2015). Effect of synthesis temperature On the structural properties and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Composites synthesized using rice husk ash as a SiO<sub>2</sub> source. *Separation and Purification Technology*, 140, 84-93.
- Jun Ki Won, Lee Hye Sun, Roh Hyun-Seog and Park Sang Eon. (2002). Catalytic Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether over Solid-Acid Catalysts. *Bull of the Korean Chem*, 23(6), 803-807.
- Klankaw Pummarin, Chawengkijwanich Chamorn, Grisdanurak Nurak and Chiarakorn Siriluk. (2012). Klankaw Pummarin, Chawengkijwanich Chamorn, Grisdanurak Nurak and Chiarakorn Siriluk. (2012). The hybrid photocatalyst of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> thin film prepared from rice husk silica. *Superlattices and Microstructures*, 51, 343-352.
- Kumar Shashank and Pandey Abhay K.. (2013). Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview. *The Scientific World Journal*, 1-16.
- Li Jianjun, Wu Yanfeng, Cao Jungang, Wei Zhonglin, Guo Ying, Wang Qun and He Xiaodong. (2017). Excellent flexibility of high-temperature-treated SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> hybrid fibers and their enhanced luminescence with Eu<sup>3+</sup> doping. *Ceramics International*, 43, 12710-12717.
- Liu Xueyan Nisi, Ross, Pal S., Laera Margherita A., Creti P. and Chiechi Antonella. (2016). Photo-oxidation of ethylene over mesoporous TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> catalysts. *Advances in Horticultural Science*, 30(2), 75-80.
- Liu Xueyan, Zhang Tingting and Zhang Lei. Microwave-induce catalytic application of magnetically separable strontium ferrite in the degradation of organic dyes: Insight into the catalytic mechanism. *Separation and Purification Technology* 2016, 192-198.
- Liu Xueyan, Zhang Tingting and Zhang Lei. Microwave-induce catalytic application of magnetically separable strontium ferrite in the degradation of organic dyes:

- Insight into the catalytic mechanism. *Separation and Purification Technology* 2016, 192-198.
- Madrid Rosario, Nogueira C. A., and Margarido Fernanda. (2012). Production and characterization of amorphous silica from rice husk waste. *International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation*, 4, 10-13.
- Mandzy, N., Grulke, E., Druffel, T. (2005). Breakage of TiO<sub>2</sub> agglomerates in electrostatically stabilized aqueous dispersions, *Powder Technology*, 160(2), 121-126.
- Nezameddin Daneshvar, Ezzatollah Salari, Alireza Khataee. (2004). Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO<sub>2</sub>. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 162, 317-322.
- Ramakrishnan Baskar, Selvaraj Shrisakthi, Babu Sathyapriya, Radhakrishnan Shyampriya, Radhakrishnan Nithya and Palanisamy Poongodi. (2011). Antioxidant Potential of Peel Extracts of Banana Varieties (*Musa sapientum*). *Food and Nutrition Sciences*, 2, 1128-1133.
- Rivera-Rangel Ruben Dario, Gonzalez-Munoz M.Pilar, Avila-Rodriguez Mario, Razo-Lazcano Teresa Alejandra and Solans Corcita. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles in oil-in-water microemulsion and nano-emulsion using geranium leaf aqueous extract as a reducing agent. *Colloids and Surfaces*, 536, 60-67.
- Rohani Abu Bakar, Rosiyah Yahya, Seng Neon Gan. (2016). Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk, *Procedia Chemistry*, 19, 189-195.
- Sekar Sankar, Sharma Sanjeev Kumar and Deuk Young Kim. (2016). Synthesis and characterization of mesoporous SiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized from Biogenic Rice Husk Ash for optoelectronic applications. *International Journal of Engineering Sciences*, 17, 353-358.
- Todkar Bajirao S., Deorukhkar Onkar A. and Deshmukh Satyajeet M.. (2016). *Extraction of Silica from Rice Husk*. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 69-74.
- Ullah Naznin Ara Begum, S., Ferreira-Neto, E.P., Pasa, A.A., Alcantara, C.C.J., Acuna,

- J.J.S., Bilmes, S.A., Martinez Ricci, M.L., Landers, R., Fermino, T.Z., Rodrigues-Filho, U.P. (2015). Enhanced photocatalytic properties of core@shell  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  nanoparticles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 179, 333-343.
- Ullah Sajjad, Ferreira-Neto Elias P., Pasa André A., Alcântara Carlos C.J., Acuna José J.S., Bilmes Sara A., Martínez Ricci Maria L. and Landers Richard. (2015). Enhanced photocatalytic properties of core@shell  $\text{SiO}_2@\text{TiO}_2$  nanoparticles. *Applied Catalysis B: Environmental*, 179, 333–343.
- Vishwakarma Vinita, Ramachandran D., Anbarasan N. and Rabel Arul Maximus. (2016). Studies of rice husk ash nanoparticles on the mechanical and microstructural properties of the concrete. *Materials Today*, 3(6), 1999-2007.
- Wantala K, Laokiat L, Khemthong P, Grisdanurak N, Fukaya K.. (2010). Calcination temperature effect on solvothermal Fe– $\text{TiO}_2$  and its performance under visible light irradiation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*; 41(5), 612–616.
- Zou hou, Song Mianxin, Yi facheng, Bian Liang, Liu Peng and Zhang Shuai. (2016). Simulated-sunlight-activated photocatalysis of Methyl Orange using carbon and lanthanum co-doped  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  composite, *Journal of Alloys and compounds*, 680, 54-59.
- 
- มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
ภาคผนวก  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY





ภาคผนวก ก

มหาวิทยาลัยการเตรียมสารเคมีและการคำนวณ  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## 1. วิธีการเตรียมสารเคมีและการคำนวณ

### 1.1 การเตรียมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

#### 1.1.1 หาความเข้มข้น HCl โมล ต่อสารละลาย 1000 กรัม

##### การคำนวณ

สารละลาย 100 กรัม มี HCl	37	กรัม
ถ้าสารละลาย 1000 กรัม จะมี HCl $(37 \times 1000) / 100$	370	กรัม
HCl 36.5 กรัม คือ	1	โมล
HCl 370 กรัม จะเท่ากับ $(370 \times 1) / 36.5$	= 10.137	mol

ดังนั้นสารละลายเข้มข้น 10.137 โมล ต่อสารละลาย 1000 กรัม

#### 1.1.2 หาความเข้มข้น HCl โมล ต่อสารละลาย 1000 cm<sup>3</sup> (Molarity)

สารละลาย HCl หนัก 1.2 กรัม	มีปริมาตร 1 cm <sup>3</sup>
ถ้าสารละลาย หนัก 1000 กรัม	มีปริมาตร $(1 \times 1000) / 1.2 = 1000 / 1.2$ มิลลิลิตร
สารละลาย 1000 / 1.2 มิลลิลิตร	มี HCl = 10.137 โมล
สารละลาย 1000 มิลลิลิตร จะมี	

$$\text{HCl } (10.14 \times 1000) \times 1.2 / 1000 = 10.137 \times 1.2$$

$$= 12.16$$

ดังนั้นสารละลายเข้มข้น 12.16 โมลาร์

#### 1.1.3 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

##### การคำนวณ

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ	$C_1 =$ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น
	$V_1 =$ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องปิเปตมา (มิลลิลิตร)
	$C_2 =$ ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ
	$V_2 =$ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ (1 ลิตร)

$$12.16 \text{ โมลาร์} \times V_1 = 1 \text{ โมลาร์} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$V_1 = 1 \text{ โมลาร์} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}$$

1.2 การเตรียมวัสดุผสม 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในซิลิกาจาก แกลบข้าว (10 และ 15 %w/w  $\text{TiO}_2 @ \text{SiO}_2$ ) เตรียมโดยซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 2 และ 3 กรัม ผสมกับ ซิลิกาจากแกลบข้าว ปริมาณ 20 กรัม

#### การคำนวณ

วัสดุผสม 100 กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ 5 กรัม

ถ้าวัสดุผสม 20 กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ 1 กรัม

#### 1.2.1 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

1.2.1.1 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 1 ลิตร

ซึ่งเมทิลีนบลู 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

#### การคำนวณ

สารละลายเมทิลีนบลูปริมาตร 1 ลิตร มีเมทิลีนบลูอยู่ 1000 มิลลิกรัม

ถ้าสารละลายเมทิลีนบลูปริมาตร 1 ลิตร จะมีเมทิลีนบลูอยู่ 1000 มิลลิกรัม = 1 กรัม

1.2.1.2 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูให้มีความเข้มข้น 30 และ 200 ppm ปริมาตร 1 ลิตร

เตรียมโดยปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 1000 ppm จำนวน 30 และ 200 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

#### การคำนวณ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ  $C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

$V_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ต้องปิเปตมา (มิลลิลิตร)

$C_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

$V_2$  = ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ (1 ลิตร)

เช่น ต้องการสารละลายเมทิลีนบลู 30 ppm ต้องเตรียมดังนี้

$$1000 \text{ ppm} \times V_1 = 30 \text{ ppm} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$V_1 = \frac{30 \text{ ppm} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}}{1000 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 30 \text{ มิลลิลิตร}$$



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY  
ภาคผนวก ข  
ภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ ข.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ ข.2 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี





ภาพที่ ข.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ข.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ค  
ภาพการดำเนินงานกิจกรรม

### 1. การเตรียมตัวอย่างซีลีกาจากแกลบข้าว



ภาพที่ ค.1 แกลบหลังทำความสะอาด



ภาพที่ ค.2 กระบวนการรีฟลักซ์แกลบ



ภาพที่ ค.3 แกลบที่ผ่านการรีฟลักซ์



ภาพที่ ค.4 นำแกลบข้าวใส่ในครูชีเบิล เผาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

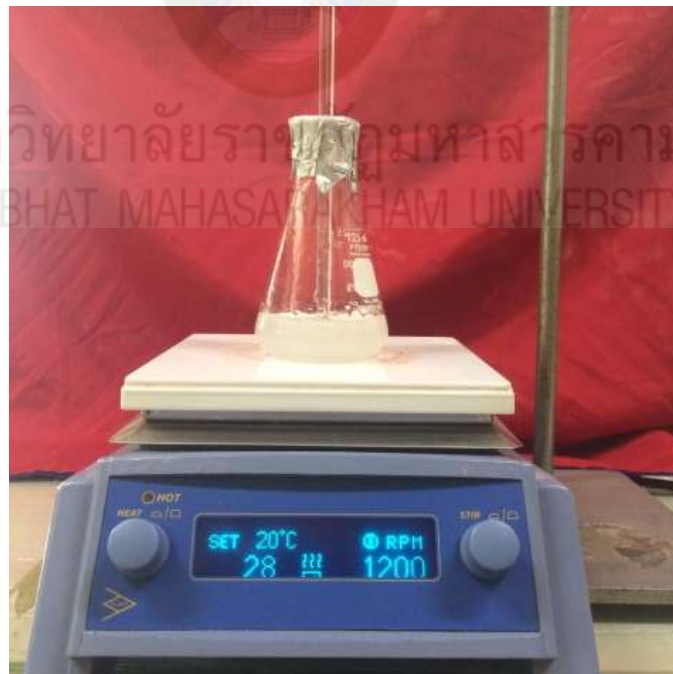


ภาพที่ ค.5 ซิลิกาจากแกลบข้าวมีลักษณะเป็นผงสีขาว

## 2. การเตรียมวัสดุผสม $\text{TiO}_2@ \text{SiO}_2$



ภาพที่ ค.6 ซิลิกาจากแกลบข้าว



ภาพที่ ค.7 ซิลิกานำมาให้ความร้อนกับไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ ค.8 กวนวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  เป็นเวลา 19 ชั่วโมง



ภาพที่ ค.9 วัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

### 3. การเตรียมวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$



ภาพที่ ค.10 ซิลิกานำมาให้ความร้อนกับไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม



ภาพที่ ค.11 กวนวัสดุผสม  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  เป็นเวลา 19 ชั่วโมง





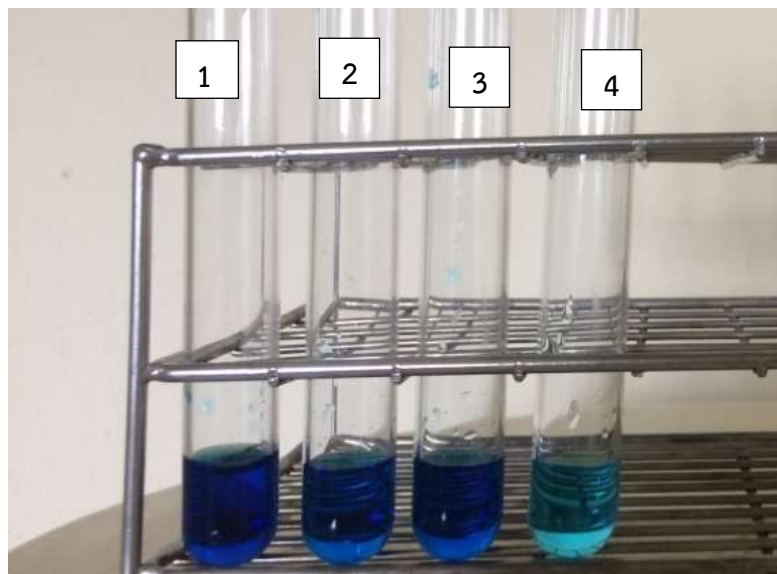
ภาพที่ ค.12 วัสดุผสม  $\text{TiO}_2/\text{Fla@SiO}_2$  ที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

RAJABHAT MAHASARAKAM UNIVERSITY

4. การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

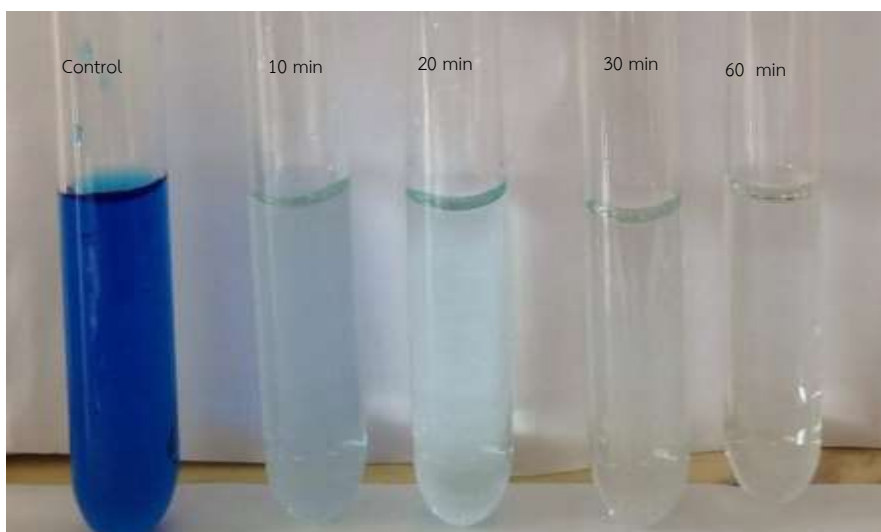
- เมื่อ
- 1 คือ เมทิลีนบลูควบคุม
  - 2 คือ ทำปฏิกิริยาผ่านไป 60 นาที
  - 3 คือ ทำปฏิกิริยาผ่านไป 120 นาที
  - 4 คือ ทำปฏิกิริยาผ่านไป 180 นาที



ภาพที่ ค.13 ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย  $\text{SiO}_2$



ภาพที่ ค.14 ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย  $\text{TiO}_2$



ภาพที่ ค.15 ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$



ภาพที่ ค.16 ลักษณะของเมทิลีนบลูที่ถูกย่อยสลายด้วย  $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{SiO}_2$



## ผลงานวิจัย

Anchalee Makhin, Patcharaporn Pimchan. (2016). The photocatalytic of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> nanocomposites with rice husk as template. *Congress on Science and Technology of Thailand*, 42.

Anchalee Makhin, Chanukorn Tabtimsai, Patcharaporn Pimchan. (2017). The photocatalytic reaction of TiO<sub>2</sub>@ SiO<sub>2</sub> nanocomposites. *International Conference on Sciences and Social Sciences*,7, 667-677.



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY