



รายงานการวิจัย  
เรื่อง

การเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว  
 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  Nanocomposites with Rice Husk as a Precursor



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2561)



รายงานการวิจัย  
เรื่อง

การเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว  
 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  Nanocomposites with Rice Husk as a Precursor



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปีงบประมาณ 2561)

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์จาก สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ช่วยสนับสนุนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จตามเป้าหมายทุกประการ และงานวิจัยนี้จะสำเร็จมิได้เลยหากขาดการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัยที่ได้ให้ความอุปการะทางด้านกำลังใจ สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยตลอดมา คุณค่าและเกียรติภูมิอันใดที่พึงมีในการวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตเวทิตาแก่บิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่าน

พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์

2562



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย                    การเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว  
ผู้ดำเนินการวิจัย            พัทธราภรณ์ พิมพ์จันทร์  
หน่วยงาน                      คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
   มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
ปี พ.ศ.                         2562

### บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยทำการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวและนำซิลิกาที่ได้จากแกลบข้าวไปเตรียมเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุผสมรูปอนุ ซิลิกากับไทเทเนียมไดออกไซด์ ศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ด้วยเทคนิค XRD FT-IR และ SEM ศึกษาการสลายสารละลายเมทิลีนบลูโดยการดูดซับในที่มืด การสลายภายใต้แสงอาทิตย์ และภายใต้รังสียูวีด้วยเทคนิค Spectrophotometer จากผลการวิจัยพบว่าวัสดุผสมมีประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูได้ 34.54 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้แสงอาทิตย์สลายได้ 74.76 เปอร์เซ็นต์ และภายใต้รังสียูวีสลายได้ 63.21 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 3 ชั่วโมง

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

**Research Title** SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Nanocomposites with Rice Husk as a Precursor  
**Researcher** Patcharaporn Pimchan  
**Organization** Faculty of Science and Technology  
Rajabhat Maha Sarakham University  
**Year** 2019

### ABSTRACT

The SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposites with rice husk as a precursor were investigated for use in the optical catalysts. The silica from the rice husk can be prepared to sodium silicate for raw material to silica mesoporous. The morphology of the hybrid was characterized by XRD, FT-IR and SEM. The adsorption was study by using the degradation of methylene blue with spectrophotometer. The study found that the TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> composite showed the adsorption at 34.54 % in dark, and photocatalytic activity at 74.76 % in sunlight and at 63.21 % under UV irradiation at 3 hours.



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
สมมติฐานการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
แกลบ (Rice husk).....	3
ซิลิกา (Silica).....	4
วัสดุรูพรุน (Porous Material).....	9
วัสดุผสม (Hybrid Materials).....	10
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide).....	11
เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	14
ปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Photocatalytic).....	15
การดูดซับ (Adsorption).....	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>29</b>
วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
การเตรียมแกลบข้าว.....	29
การเตรียมซิลิกา (SiO <sub>2</sub> ) จากแกลบข้าว.....	30
การเตรียมโซเดียมซิลิเกต (Na <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7</sub> ) จากแกลบข้าว.....	30
การเตรียมวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	29
การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู.....	31
การศึกษาการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู.....	31
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b> .....	34
การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว.....	34
การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	35
การพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกา $TiO_2-SiO_2$ .....	36
การศึกษาการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู.....	38
ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู.....	40
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ</b> .....	47
สรุปผลการวิจัย.....	47
ข้อเสนอแนะ.....	47
<b>บรรณานุกรม</b> .....	48
<b>ประวัติผู้วิจัย</b> .....	51

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ (โลหะออกไซด์) ที่พบในแคลบ.....	4
2.2 ตารางแสดงลักษณะและขนาดของซิลิกา.....	7
2.3 คุณสมบัติของโครงสร้างผลึก 3 แบบของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.4 ประสิทธิภาพของไทเทเนียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์.....	18
4.1 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู ของ $\text{TiO}_2$ , $\text{SiO}_2$ , และ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ในที่มีด.....	39
4.2 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ของ $\text{TiO}_2$ , $\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ภายใต้แสงอาทิตย์	41
4.3 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู หลังดูดซับของ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ .....	43
4.4 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ของ $\text{TiO}_2$ , $\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ภายใต้รังสียูวี.....	44
4.5 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู หลังดูดซับของ $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ .....	46



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ซิลิกาจากแกลบ.....	5
2.2 โครงสร้างของซิลิกาผลึก.....	8
2.3 รูปทรงรูปร่างต่าง ๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกรม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว.....	10
2.4 โครงสร้างของไทเทเนียมออกไซด์.....	13
2.5 โครงสร้างเคมีของเมทิลีนบลู.....	15
2.6 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Mechanism of Photocatalytic)....	16
2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.8 กลไกการดูดซับ.....	20
3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 แกลบข้าว.....	34
4.2 ซิลิกาจากแกลบข้าว.....	35
4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ SiO <sub>2</sub> (a), TiO <sub>2</sub> (b) และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (c).....	36
4.4 กราฟการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของ SiO <sub>2</sub> (a), TiO <sub>2</sub> (b) และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (c)....	37
4.5 SEM ของวัสดุผสม TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	38
4.6 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c) และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) ในที่มีด.....	39
4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c) และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) ในที่มีด.....	40
4.8 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้แสงอาทิตย์เมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c), และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) .....	41
4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c) และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงอาทิตย์.....	42
4.10 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูที่เวลาต่างๆของวัสดุผสม TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	43
4.11 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้รังสียูวีเมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c), และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) .....	44
4.12 ประสิทธิภาพการสลายของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้รังสียูวี เมื่อเติม SiO <sub>2</sub> (b), TiO <sub>2</sub> (c), และ TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (d) .....	45
4.13 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสม TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

แกลบข้าวเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวที่มีปริมาณมากจึงได้มีการนำแกลบข้าวมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม ใช้เป็นส่วนผสมในงานก่อสร้าง ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน แต่ก็ยังมีแกลบจำนวนมากที่ต้องนำไปกำจัดโดยใช้วิธีฝังกลบทำให้เกิดปัญหามลภาวะ ซึ่งจากการศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแกลบพบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย คาร์บอนร้อยละ 50 ออกซิเจนร้อยละ 42 ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 60-70 ซิลิกาจะพบมากที่บริเวณผิวนอกของแกลบร้อยละ 20-30 และออกไซด์ของโลหะโซเดียมแคลเซียมเหล็กตลอดจนธาตุโลหะอีกเล็กน้อย

จากการศึกษาพบว่าในแกลบนั้นมีปริมาณซิลิกาสูงและมีความบริสุทธิ์สูง โดยสามารถสกัดซิลิกาจากแกลบข้าวได้หลายวิธี เช่น การสกัดด้วยกรดหรือเบส และวิธีการเผา ซึ่งจะสกัดด้วยกรดหรือเบสก่อนที่จะนำไปเผาจะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงแล้วจึงนำซิลิกาที่สกัดได้มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุรูพรุนเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ (จิตรลดาชูมี, 2554)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์โลหะและเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด *n*-type มีโครงสร้างอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ อนาเทส รูไทล์และบรูคไทล์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบมากในธรรมชาติ คือ ชนิดรูไทล์และอนาเทส ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโครงสร้างวัสดุนาโนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีเมื่อได้รับแสงยูวีก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆที่สัมผัสกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างอนาเทสให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีที่สุดในทั้ง 3 ชนิด แต่อนาเทสมีความเสถียรภาพทางความร้อนได้น้อยจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอนาเทสไปเป็นรูไทล์ได้ง่าย ที่ผ่านมามีงานวิจัยมากมายพยายามปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอื่น (อริวัฒน์ พรหมจันทร์ และวัชรินทร์ เมฆลา, 2557)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นปฏิกิริยาที่ตัวสารไม่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงหรือทำให้หมดไปในกระบวนการที่เกิดขึ้น โดยสารเร่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า Photocatalyst ปัจจุบันสาร Photocatalyst ที่ได้รับความนิยมที่สุด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เนื่องจากมีราคาไม่แพงไม่เป็นพิษความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และยังเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วโดยปฏิกิริยา Photocatalysis จะเกิดขึ้นเมื่อสาร Photocatalyst เช่น เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยปลดปล่อยประจุลบ (-) ออกมาซึ่งประจุลบจะไปจับกับออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ในอากาศกลายเป็น “ซูเปอร์ออกไซด์ (Super Oxide:  $\text{O}_2^-$ )” ส่วนประจุบวก (+) ที่เหลืออยู่ก็จะไปดึงเอาประจุลบของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ในอากาศเพื่อให้ตัวเองกลับมาสมดุลดังนั้นไททาเนียมไดออกไซด์จึงไม่สลายหรือหายไปเมื่อปฏิกิริยานั้นเสร็จสิ้นลงและน้ำที่สูญเสียประจุลบไปจะกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอน (Hydroxyl Radicon:  $\text{OH}^-$ ) ซึ่งทั้ง “ซูเปอร์ออกไซด์ ( $\text{O}_2^-$ )” และ “ไฮดรอกซิลเรดิคอน ( $\text{OH}^-$ )”

รอกซิลเรติคอน (OH)” ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์พันธะไฮโดรคาร์บอน แล้วกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ คืบสู่อากาศจึงสามารถทำลายสารอินทรีย์ สิ่งสกปรกต่างๆ ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งไม่เป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อม

จากความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ได้รับความสนใจ ในการใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายแต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อจำกัดในโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ด้านเสถียรภาพเพื่อควบคุมโครงสร้างและความเสถียรผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในวัสดุรูพรุน ซิลิกาจากแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุหาง่ายและราคาถูก โดยศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ด้วยการวัดการสลายตัวของสีเมทิลีนบลู

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุรูพรุนผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  โดยใช้ซิลิกาที่สกัดจากแกลบข้าว
2. เพื่อศึกษาสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลายเมทิลีนบลู

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

### 1.3.1 ขอบเขตด้านการวิจัย

- 1) วัสดุตั้งต้นสำหรับเตรียมซิลิกาคือ แกลบข้าว ได้จากโรงสีข้าวจังหวัดมหาสารคาม
- 2) ทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในที่มืด ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 09.00-12.00 น.ของทุกวันและภายใต้รังสียูวี เป็นเวลา 180 นาที

1.3.2 ขอบเขตด้านระยะเวลา คือ 1 ตุลาคม 2559 – 30 กันยายน 2560

## 1.4 สมมติฐานการวิจัย

1. สามารถสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบข้าวได้
2. สามารถสังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ได้
3. วัสดุรูพรุนผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีในสารละลายเมทิลีนบลู

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกระบวนการเตรียมวัสดุรูพรุนผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  โดยใช้ซิลิกาที่สกัดจากแกลบ
2. ทราบถึงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุรูพรุนผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
3. สามารถนำเอาวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยการเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว ได้ศึกษาหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับ ดังนี้

1. แกลบ (Rice husk)
2. ซิลิกา (Silica)
3. วัสดุรูพรุน (Porous Material)
4. วัสดุผสม (Hybrid Materials)
5. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
6. เมทิลีนบลู (Methylene blue)
7. ปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Photocatalytic)
8. การดูดซับ (Adsorption)
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related work)

#### 2.1 แกลบ (Rice Husk)

##### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแกลบ

แกลบข้าวเป็นส่วนประกอบในเมล็ดข้าวเป็นผลชนิด caryopsis มีเยื่อหุ้มเมล็ด (testa) อยู่ติดผนังรังไข่ (ovary wall) เมล็ดข้าวประกอบด้วยแกลบ (hull or husk) และข้าวกล้อง (brown rice) แกลบเป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) หาง (awn) ชั่วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmae) เปลือกใหญ่จะปกคลุมอยู่ 2 ใน 3 ของเนื้อที่เปลือกเมล็ดยึดแน่นอยู่ภายในส่วนของเปลือกใหญ่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตะขอปิดแน่น (hook like structure) โดยแกลบมีความยาว 4-5 มิลลิเมตร กว้าง 1-2 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ คือ 95-150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความร้อนประมาณ 3,000-3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม แกลบข้าวเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการสีข้าว เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลีบเลี้ยง ฟางและข้าวเมล็ดประมาณร้อยละ 20-24 โดยน้ำหนักของข้าวเปลือก (นิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา, 2557)

##### 2.1.2 องค์ประกอบของแกลบ

แกลบมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.1 และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์โดยมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและไม่นำความร้อน องค์ประกอบหลักของแกลบแสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ (โลหะออกไซด์) ที่พบในแกลบ

สารอนินทรีย์	น้ำหนัก (Wt%)
SiO <sub>2</sub>	21 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23
CaO	1.24
MgO	0.21
MnO <sub>2</sub>	0.07

ที่มา: พรสวรรค์ อศวแสงรัตน์, 2555

### 2.1.3 ประโยชน์ของแกลบ

1. เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในภาคครัวเรือน เช่น เชื้อเพลิงในเตาประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยแกลบ 1 กิโลกรัม สามารถให้พลังงานจากการเผาไหม้ได้สูงถึง 3800 กิโลแคลอรี ซึ่งใกล้เคียงกับไม้ และถ่านไม้ที่ 4000-5000 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม จึงสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงจากไม้ได้เป็นอย่างดี

2. เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องจักรไอน้ำของโรงสีข้าว เชื้อเพลิงโรงงานเครื่องปั้นดินเผา โรงงานผลิตปูนซีเมนต์

3. ใช้เป็นวัสดุขัดผิวทั้งในภาคครัวเรือน และอุตสาหกรรม

4. ใช้ในการเผาถ่านเพื่อลด และควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการเผาถ่าน ป้องกันการลุกไหม้เป็นเปลวไฟ

5. เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก อิฐมอญ รวมถึงผสมดินเหนียวสำหรับงานก่อ

6. ใช้ในการปรับปรุงดินในหลายด้าน อาทิ การปรับปรุงดินเค็ม การเพิ่มความร่วนซุยของดิน การเพิ่มอินทรีย์วัตถุ และแร่ธาตุอาหารในดิน เป็นต้น

7. การใช้ประโยชน์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ใช้รองพื้นสำหรับฟาร์มไก่หรือสุกร

8. ใช้ทำขนวนเทคลุ่มกอน้ำแข็งป้องกันน้ำแข็งละลาย

## 2.2 ซิลิกา (Silica)

### 2.2.1 ซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ซิลิกาที่อยู่ในแกลบนั้นเกิดขึ้นจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าว โดยรากของข้าวก็จะทำการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆที่จำเป็นรวมทั้งธาตุซิลิกา (Si) ด้วย จากนั้นสารละลายซิลิกอนก็จะมาถูกสะสมอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกเมล็ดข้าวและกลายเป็นซิลิกาที่รวมตัวกับเส้นใยประเภทเซลลูโลสและลิกนิน เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าวหรือที่เราเรียกว่า “แกลบ”

องค์ประกอบของแกลบนั้นประกอบด้วยสารอนินทรีย์อยู่ประมาณร้อยละ 20-25 เซลลูโลส ร้อยละ 40-50 ลิกนินร้อยละ 19-30 และน้ำตาลประมาณร้อยละ 17-26 โดยในส่วนของสารอนินทรีย์ นั้นองค์ประกอบหลักก็คือซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 85-99 นอกจากนั้นยังมี  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$  และอื่นๆซึ่งปริมาณซิลิกาและมลทินเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูกข้าว ชนิดของข้าวและปุ๋ย ที่ใช้

ซิลิกาที่ได้จากแกลบที่ผ่านกระบวนการล้างและเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส นั้นจะยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเป็นอสัณฐานซิลิกา (Amorphous phase) มีร้อยละ  $SiO_2$  อยู่สูงมาก (>99%) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูงมากมีขนาดของอนุภาคที่ละเอียดมาก (ต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร) เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบอื่นๆ เช่น ซิลิกาที่ได้จากการบดทราย Quartz, Flint รวมทั้งเมื่อเทียบกับอสัณฐานซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็กๆพวกไดอะตอมที่ตายแล้วตกตะกอนทับถมกันมานานหลายร้อยล้านปีซึ่งอสัณฐานซิลิกาเหล่านี้เรียกว่า “ไดอะตอมไมท์ (Diatomite)”

เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลิกาที่มีอยู่ในแกลบเทียบกับส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวและพืชชนิดอื่นๆ แกลบก็ยังมีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าพืชชนิดอื่นอยู่มาก โดยในฟางข้าวมีซิลิกาอยู่ร้อยละ 82 เปลือกข้าวโพดมีซิลิกาอยู่ร้อยละ 54 ไม้ไผ่มีซิลิกาอยู่ร้อยละ 57 เป็นต้น

กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบข้าวนั้นสามารถใช้แกลบดิบหรือแกลบที่ผ่านการเผา แต่การจะทำให้ได้ซิลิกาบริสุทธิ์จากข้าวแกลบนั้นจะทำได้ยากกว่าและซิลิกาที่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาที่สังเคราะห์จากแกลบดิบมากหลังจากผ่านขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดพวก Alkali oxide ให้ออกไปจากแกลบแล้วก็นำแกลบไปอบแห้งและทำการเผา โดยอุณหภูมิการเผาและเวลาในการเผาจะส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วก็จะได้ผงซิลิกาสีขาวที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ซิลิกา มีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ซิลิกาจากแกลบ

ที่มา: นางลักษณะ มีทอง, 2557

### 2.2.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) เป็นสารประกอบของซิลิกอน และออกซิเจน มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น และรส พบมากในดินและหิน และเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิ เป็นสารดูดซับ

ความชื้น เป็นสารเพิ่มความเงา เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เป็นต้นซิลิกามีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อให้มีคุณสมบัติเฉพาะตามต้องการซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมี 2 ประเภท คือ เกิดเป็นรูปผลึก (Crystalline) มีขนาดแตกต่างกันไปตั้งแต่หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz rock) และทราย และอีกประเภทหนึ่งคือ ซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (Biogenic silica) เช่น ซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างไดอะตอม และซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างพืช ซิลิกาทั้งสองประเภทมีสูตรทางเคมีเหมือนกันแต่มีสมบัติหลายประการแตกต่างกันไปเพราะมีโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะแตกต่างกันทำให้มีสมบัติต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความว่องไวต่อปฏิกิริยาไม่เหมือนกัน เพราะซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าซิลิกาในรูปผลึกมาก ซิลิกาเป็นสารประกอบของธาตุซิลิกอน (Si) และธาตุออกซิเจน (O) มีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) แบบตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จัก โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลาง และล้อมรอบด้วย 4 อะตอม ของออกซิเจน เป็น  $\text{SiO}_4$  ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก แต่จะเกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมกับอัลคาไล (alkali), วานาเดต (vanadate), คลอไรด์ (chloride) และบอเรต (borate) แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากนัก แบ่งซิลิกาออกเป็น 6 ชนิด คือ

1. นีโอซิลิเกต (Nesosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 1 : 4$ )
2. โซโรซิลิเกต (Sorosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 2 : 7$ )
3. ซัยโคลซิลิเกต (Cyclosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 1 : 3$ )
4. ไอโนซิลิเกต (Inosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 4 : 11$ )
5. ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 2 : 5$ )
6. เทกโทซิลิเกต (Tectosilicate) ( $\text{Si} : \text{O}_2 = 1 : 2$ )

### 2.2.3 คุณสมบัติทางเคมีของซิลิกา

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นแร่ธาตุที่ประกอบไปด้วยซิลิกอน (Si) 1 อะตอม และออกซิเจน (O) 2 อะตอม ออกซิเจนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลก รองลงมาคือ ซิลิกอน ดังนั้นจึงเกิดสารประกอบของซิลิกาในธรรมชาติจำนวนมาก ซิลิกาเป็นสารประกอบของซิลิกอนและออกซิเจน มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เกิดเป็นรูปผลึกและเกิดจากสิ่งมีชีวิต จากการสังเคราะห์ซิลิกาพบมากโดยเฉพาะในรูปผลึกขนาดต่างๆ มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ด้านอุตสาหกรรม นอกจากนี้สารอื่นก็มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิเกต (Silicate) และซิลิโคน (Silicone) ซึ่งมักทำให้เข้าใจผิดว่าเป็นซิลิกา โดยทั่วไปโมเลกุลของซิลิกาจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบ และมีรูปแบบซ้ำๆ กัน จึงเรียกว่า ผลึกซิลิกา (crystalline silica) (สุดาพร ตั้งควนิช, 2550) ลักษณะและขนาดของซิลิกาแสดงดังตารางที่ 2.2

## ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะและขนาดของซิลิกา

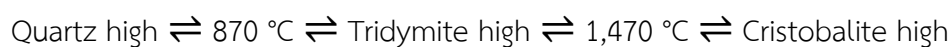
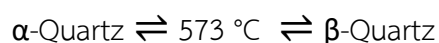
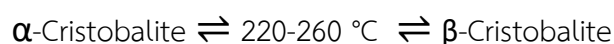
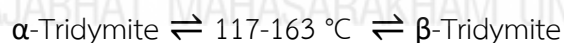
ลักษณะ	ขนาด	การนำไปใช้
Pore Diameters (Å Angstrom)	600-16000	
Pore Volume (mL/g)	0.70-1.10	1. ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือซิลิกา
Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	≤90	เจล
Bulk Density (g/l)	200-280	2. ซิลิกาสำหรับ HPLC
pH Value (10%)	5-7	column
Loss at Heat %	≤5	3. ซิลิกาสำหรับใช้แยกโมเลกุล
Appearance	White or Milk White	ใหญ่ๆ เช่น โพรตีน

ที่มา: สุตาพร ตังควนิช, 2550

### 2.2.4 รูปแบบของซิลิกา

#### 1. ซิลิกาผลึก (crystalline silica)

ผลึกซิลิกาในธรรมชาติที่พบมาก 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ ทริไต์ไมท์ และคริสโตบาไลต์ซึ่งรูปแบบทั้ง 3 แบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO<sub>2</sub> แต่แตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิคอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง กล่าวคือ ในรูปผลึกของคริสโตบาไลต์ และทริไต์ไมท์นั้นอะตอมต่างๆ จัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันน้อยกว่าควอตซ์ จึงทำให้ทั้งคริสโตบาไลต์และทริไต์ไมท์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า (ควอตซ์ 2.65 คริสโตบาไลต์ 2.33 และทริไต์ไมท์ 2.27) ซึ่งผลึกเกิดจากการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงดังแผนภาพ (นิทศน์ ทิพย์โสตนัยนา, 2557)



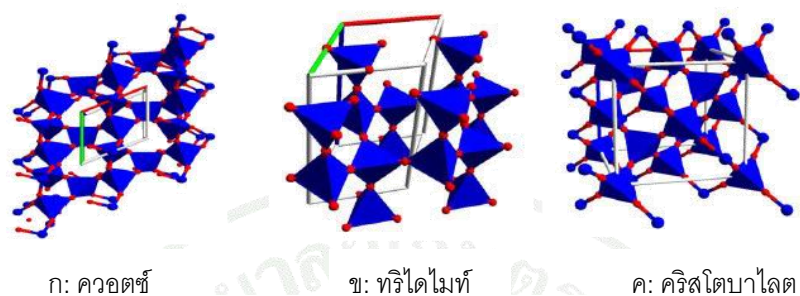
ควอตซ์ เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวดังภาพที่ 2.2ก โดยแอลฟา-ควอตซ์ ( $\alpha$ -quartz) เกิดขึ้นในรูป SiO<sub>2</sub> ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573 องศาเซลเซียส และเบตาควอตซ์ ( $\beta$ -quartz) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 573-873 องศาเซลเซียส

ทริไต์ไมท์ (ภาพที่ 2.2ข) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1,470 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวโดยมีแอลฟา-ทริไต์ไมท์ ( $\alpha$ -tridymite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 117 องศาเซลเซียส และเบตาทริไต์ไมท์ ( $\beta$ -tridymite) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1,470 องศาเซลเซียส

คริสโตบาไลต์ (ภาพที่ 2.2ค) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 1,470-1,710 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวแบบแอลฟา-คริสโตบาไลต์ ( $\alpha$ -cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นเกิดขึ้นที่



อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 200-275 องศาเซลเซียส แต่ไม่เสถียรแต่ปีตา-คริสโตบาไลต์ ( $\beta$ -cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่น เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 100-275 และ 275-1,470 องศาเซลเซียสและเสถียรในรูปซิลิกาที่อุณหภูมิ 1,470 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 องศาเซลเซียส



ก: ควอตซ์

ข: ทริโดไมท์

ค: คริสโตบาไลต์

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของซิลิกาผลึก  
ที่มา: นิต์ศน์ ทิพยโสตนัยนา, 2557

## 2. ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica)

ซิลิกาอสัณฐานเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างซิลิคอนและออกซิเจนอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบไปด้วยอนุภาคนาขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งซิลิกาอสัณฐานเป็นรูปแบบของซิลิกาชนิดไม่มีผลึก (noncrystalline silica) สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้ด้วยวิธีรังสีเลี้ยวเบน (X-ray diffraction) ซึ่งพบความเป็นผลึกประเภทแอลฟา-ควอตซ์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573 องศาเซลเซียสและเบต้า-ควอตซ์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 573-873 องศาเซลเซียส โดยซิลิกาอสัณฐานสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ วิเทรียส ซิลิกา (vitreous silica) เอ็มซิลิกา (silica M) หรือซิลิกาชนิดผลึก (crystalline silica) และพวกสุดท้ายคือซิลิกาอสัณฐานชนิดเล็ก (micro amorphous silica) ซึ่งรวมถึงโซล (sols) ผงเจล (gels powder) และแก้วที่มีความพรุนสูง (porous glasses) ซึ่งทั้งหมดมีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปพื้นที่ผิวมากกว่า 3 ตารางเมตรต่อกรัมโดยถ้าแก้วที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่ถึง 873 องศาเซลเซียสจะได้ซิลิกาอสัณฐาน และซิลิกาอนุภาคต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปพื้นที่ผิวมากกว่า 3 ตารางเมตรต่อกรัมโดยถ้าแก้วที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่ถึง 873 องศาเซลเซียสจะได้ซิลิกาอสัณฐาน และซิลิกาอสัณฐานยังมีชื่อเรียกอื่นต่างกันไป เช่น ซิลิกาเจล (silica gel), ปริซิพิเตตซิลิกา (precipitated silica) ฟูมซิลิกา (fumed silica) และ คอลลอยด์ซิลิกา (colloidal silica) เป็นต้น

ซิลิกาเจล ประกอบด้วยอนุภาคของซิลิกาที่รวมตัวกัน (colloidal) เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติซึ่งมีน้ำภายในโครงสร้างเป็นตัวกลางระหว่างอนุภาคเมื่อกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างทำให้เกิดการหดตัวอย่างรุนแรงและเรียกซิลิกาเจล ที่ไม่มีน้ำในโครงสร้าง หรือมีชื่อเรียกว่า ซีโรเจล (xerogels)

ปริซิพิเตตซิลิกา เป็นผงที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาที่ตกผลึกมาจากสารละลายซิลิเกต (silicate solution) มีลักษณะเป็นผงสีขาว

ฟุ้งซิลิกา ประกอบด้วยอนุภาคเล็กละเอียดมีลักษณะใสคล้ายแก้วมีพื้นที่ผิว 20 ตารางเมตร ต่อกรัม เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยารีดักชันควอตซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยผงถ่านภายในเตาไฟฟ้าซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่มีคือซิลิคอน (silicon) และเฟอร์โรซิลิคอนอัลลอยด์ (ferrosilicon alloys)

คอลลอยด์ซิลิกา อนุภาคของซิลิกามีขนาด 3-100 นาโนเมตร กระจายลอยตัวอยู่ในน้ำมีพื้นที่ผิว 50-270 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาณซิลิการ้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักและมีสารช่วยกระจายตัว (stabilizer, Na<sup>+</sup>) ประมาณร้อยละ 1 โดยเป็นซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมีลักษณะใส ไม่มีสี (นิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา, 2557)

### 2.2.5 ประโยชน์ของซิลิกา

1. อุตสาหกรรมอาหาร อนุภาคนาโนซิลิกาจะใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหารกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในส่วนของกำมะถันเป็นวัตถุเจือปนอาหาร และอยู่ในอาหารโดยตรง เช่น การเป็นสารตัวกลางที่นำพารสชาติ สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของอาหาร สารลดฟองในเครื่องดื่ม เป็นต้น

2. อุตสาหกรรมทางการแพทย์ อนุภาคนาโนซิลิกาถูกนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับหีบห่ออาหาร นอกจากนี้ยังได้มีการนำอนุภาคนาโนซิลิกาไปใช้งานทางการแพทย์ในส่วนของกำมะถันระบบการนำส่งยา การตรึงเอนไซม์ และ DNA transfection

3. อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและยา จากการที่อนุภาคนาโนซิลิกาเป็นสารที่มีความเฉื่อยจึงมักนำมาใช้ในเครื่องสำอาง โดยเฉพาะยาสีฟัน ในส่วนของกำมะถันนำมาใช้กับยาล้างฟันได้

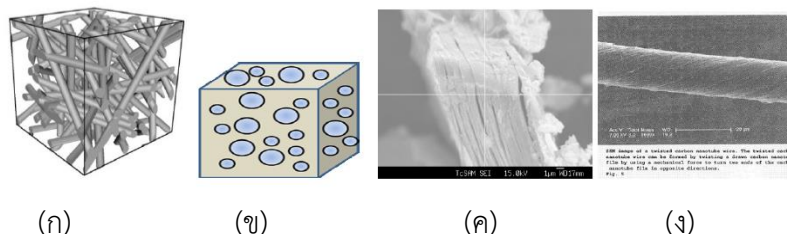
4. อุตสาหกรรมยางและซิลิโคน อนุภาคนาโนซิลิกานิยมใช้กันมากในการเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ในกลุ่มของยางและซิลิโคน

5. อุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช โดยนิยมนำไปใช้ในส่วนของการเป็นยาฆ่าแมลง โดยสารชนิดนี้จะถูกดูดซับในชั้นไขมันของแมลง และทำให้เกิดการ dehydration ในแมลงทำให้แมลงตายได้

### 2.3 วัสดุรูพรุน (Porous Material)

วัสดุรูพรุน (Porous Material) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวคัดแยกโมเลกุล (Molecular sieve) ได้มีการนำวัสดุรูพรุนมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน โดยนอกเหนือจากการใช้เพื่อเป็นตัวคัดแยกโมเลกุลแล้ว วัสดุรูพรุนยังสามารถนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างจากการเป็นตัวคัดขนาดของโมเลกุล เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารดูดซับ เซ็นเซอร์ หรืออาจนำไปใช้ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาตรของที่ว่างในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุ โดยทั่วไปวัสดุรูพรุนจะมีความพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.95 นาโนเมตรและรูพรุนนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบแรกเป็นแบบที่เป็นรูพรุนแบบเปิดโดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุ ส่วนแบบที่สองเป็นรูพรุนแบบปิด ซึ่งรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก ดังนั้นในการนำวัสดุรูพรุนไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เป็นตัวดูดซับ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเซ็นเซอร์นั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะในวัสดุที่มีรูพรุนเป็นแบบเปิดเท่านั้น ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนแบบปิดจะไม่สามารถนำมาใช้งานตามที่กล่าวมาข้างต้นได้ วัสดุรูพรุนที่เป็นแบบปิดสามารถนำมาใช้งานจำพวก การใช้เป็นวัสดุในการเก็บเสียง การเป็นฉนวนกันความร้อน หรือเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา วัสดุรูพรุน

มีโครงสร้างและสัณฐาน แบ่งได้หลายแบบ เช่น รูพรุนแบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบที่เป็นแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรูพรุนแบบที่เป็นทรงที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม ในรูพรุนอาจเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นรูพรุนแบบที่บิดเป็นเกลียว ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 รูพรุนรูปแบบต่าง ๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว

ที่มา: ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554

วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry IUPAC) หรือที่มีชื่อย่อเรียกว่า โดยจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป

## 2.4 วัสดุผสม (Hybrid Materials)

วัสดุผสม (Hybrid Materials) เกิดจากการผสมกันของสารอินทรีย์ (Organic Matter) และสารอนินทรีย์ (Inorganic Matter) ถูกค้นพบมาตั้งแต่ก่อนศตวรรษที่ 20 โดยเริ่มตั้งแต่การผลิตสี (Paints) เพื่อความสวยงามซึ่งสีดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวกันของสารอินทรีย์ (Media) และสารอินทรีย์ (Pigment/Coloring Agent) อย่างไรก็ตาม Hybrid Materials เริ่มเข้ามามีจุดเริ่มอยู่ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 และต้นศตวรรษที่ 21 ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากการพัฒนาทางด้านเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่สามารถวิเคราะห์ได้ละเอียดมากขึ้น และความก้าวหน้าของนาโนเทคโนโลยี ที่เป็นเทคโนโลยีที่ศึกษาในระดับอะตอมหรือโมเลกุล (Bottom Up Technology) Hybrid Materials หากแปลตามหลักทางภาษาแล้ว แปลว่า วัสดุผสม จึงเป็นคำที่ถูกนำมาอธิบายถึงวัสดุต่างชนิดกันนำมาผสมกันด้วยกระบวนการทางเคมีจนได้วัสดุชนิดใหม่ ดังนั้น Hybrid Materials คือ วัสดุที่เป็นสารประกอบมากกว่า 2 ชนิดรวมกันด้วยการสร้างพันธะใหม่ระหว่างกันซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ

1. Composite Materials คือ วัสดุประกอบที่เกิดจากการผสมกันของวัสดุหลายชนิดโดยมีการกระจายของวัสดุเสริมแรงใน Matrix ของวัสดุแม่และเป็นการผสมกันในระดับ Macro เท่านั้น
2. Nano-composite คือ วัสดุประกอบที่เกิดการผสมกันระหว่างวัสดุชนิดเดียวกันในระดับนาโน ซึ่งจะมีทั้ง Nano-composite และ Nano-Matrix ประกอบกันอยู่
3. Hybrid Materials คือ วัสดุผสมที่เกิดขึ้นในระดับนาโน โดยเป็นการผสมกันระหว่างวัสดุต่างชนิดกัน
4. Nano-Hybrid คือ วัสดุที่มีการผสมกันในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ด้วยวัสดุต่างชนิดกันซึ่ง ทำให้เกิดการรวมกันด้วยการสร้างพันธะทางเคมีใหม่ (วิรัช เลิศพรหม, 2559)

## 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือไทเทเนียมเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงในหลายๆด้าน เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมี ไม่เป็นพิษและราคาถูก เช่น การเคลือบอุปกรณ์ต่างๆเพื่อความสะอาด การบำบัดน้ำเสีย การฟองอากาศ การกำจัดกลิ่น และทำลายจุลินทรีย์

นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา และตัวรองรับ ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซินและสารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction การสังเคราะห์สาร Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>)

### 2.5.1 คุณสมบัติทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
2. ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส
4. จุดหลอมเหลว 1,850 องศาเซลเซียส
5. ไม่ละลายน้ำ

### 2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. สถานะภาพเป็นของแข็งสีขาว
2. พื้นที่ผิว 50 ตารางเมตร/กรัม
3. ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร
4. ความหนาแน่น 130 กรัม/ลิตร
5. ความถ่วงจำเพาะ 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

6. Modulus of Rupture 140 เมกะปาสกาล
7. กำลังแรงกด 680 เมกะปาสกาล
8. ค่าความต้านทาน (Resistivity, 25 องศาเซลเซียส)  $10^{12}$  โอห์ม-เซนติเมตร
9. ค่าความต้านทาน (Resistivity, 700 องศาเซลเซียส)  $2.5 \times 10^4$  โอห์ม-เซนติเมตร

### 2.5.3 ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์

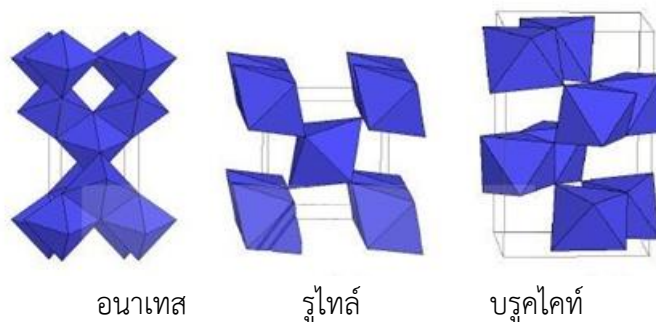
แบ่งตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

1. รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง
2. อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ (อติพล สว่างอารมณ์, 2557)
3. บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของโครงสร้างผลึก 3 แบบของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติ	Rutile	Anatase	Brookite
Crystal structure	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
Lattice	a= 4.5936 c = 2.9587	a= 3.784 c = 9.515	a= 9.184 b=5.447 c=5.154
Space group	$P_4/mnm$	$I4_1/amd$	Pbca
Molecule (cell)	2	2	4
Density ( $g/cm^3$ )	4.13	3.79	3.99

ที่มา: พินิจ เอี่ยมสะอาด และคณะ, 2559



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: พินิจ เอี่ยมสะอาด, 2559

#### 2.5.4 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ ได้แก่

1. ใช้สำหรับสารให้สี อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้อง มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัด-กร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผิวง่ายและเนียน มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาทัບ เป็นต้น

## 6. ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

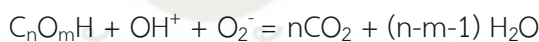
6.1 ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ

6.2 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง โทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงและความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัด และต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไก ดังนี้

– สำหรับการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโนโทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^+$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน ( $\text{O}_2^-$ ) ออกมาสู่อากาศ และอะตอมดังกล่าวจะเข้าดั่งอะตอมไฮโดรเจน และคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่นทำให้จุลินทรีย์ และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป

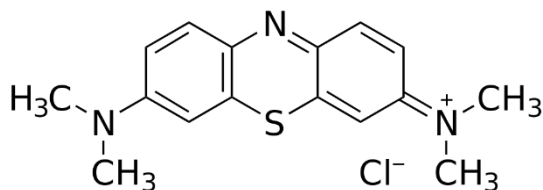
– สำหรับการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงคลื่น 300-400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

– สำหรับบำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโนโทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคดังกล่าวข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



## 2.6 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลู เป็นสีย้อมที่เป็นด่าง (Basic dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมร่วมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิว หรือภายในเซลล์ ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาล เมทิลีนบลูมี CAS Number: 61-73-4 สามารถใช้เป็นสารย้อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรีย เป็นรีเอเจนท์ ตัวย้อมยั้งกระบวนการสร้างโพลิเมอร์และสีย้อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษ สิ่งทอ และหนัง เป็นต้น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีขาวเข็ม ไม่มีกลิ่น จะกลายเป็นสีฟ้าเมื่อละลายน้ำ เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกที่มีการดูดซับสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยการแตกตัวเป็นประจุบวก ชนิดของวัสดุดูดซับ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ เป็นต้น

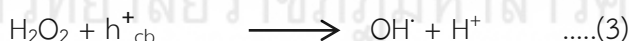
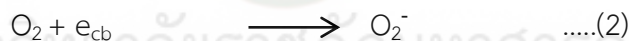
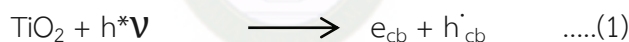


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างเคมีของเมทิลีนบลู  
ที่มา: จีรวรรณ พิจารณ์และคณะ, 2558

## 2.7 การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Photocatalytic)

### 2.7.1 การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic)

ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ หลักการเกิดปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก เมื่อวัสดุโฟโตแคตะไลติกถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นและจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ ทำให้ในแถบเวเลนซ์อิเล็กตรอนเกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH<sup>•</sup>) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) ดังแสดงในสมการ (1)-(3) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะลิสต์



ดังนั้นองค์ประกอบพื้นฐานของปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวเร่งจึงประกอบด้วย พลังงานแสง และตัวเร่ง รวมทั้งน้ำและออกซิเจนเพื่อใช้ในการเป็นตัวรีดิวซ์และตัวออกซิไดซ์ (เสาวลักษณ์ บุญยอด, 2554)

ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. พลังงานแสง การฉายแสงในปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (photon energy) ที่มากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวเรียกว่า พลังงานกระตุ้น (activation energy) ซึ่งแสงสเปกตรัมของคลื่นแสงซึ่งมีขอบเขตอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 100-1000 นาโนเมตร ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงยูวี นี้จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 100 – 400 นาโนเมตร แสงยูวี นี้จะถูกแบ่งเป็นองค์ประกอบหลักๆ 3 องค์ประกอบ คือ

ก. ความยาวคลื่นแสง (long wave UV) อยู่ในช่วง 320 – 400 นาโนเมตร

ข. คลื่นกลาง (middle wave UV) อยู่ในช่วง 280 – 320 นาโนเมตร

ค. คลื่นสั้น (short wave UV) อยู่ในช่วง 200 – 280 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทางแสงอาทิตย์นี้ จะมีช่วงความยาว



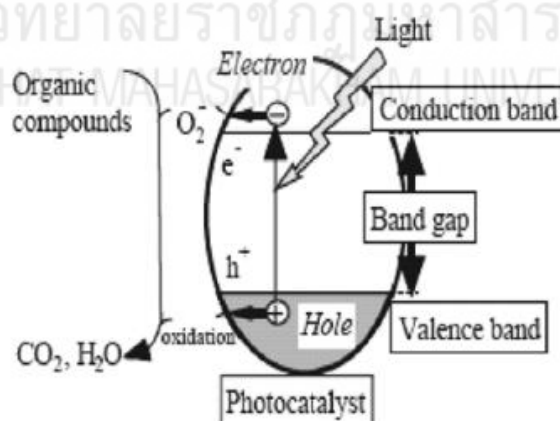
คลื่นที่กว้างมาก และความเข้มข้นของแสงยูวีสูง แต่เมื่อแสงส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศ จากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถูกดูดกลืน โดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่ลงมาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสงยูวีที่ส่องลงมายังพื้นโลกจึงมีจำกัด

2. แคตตาลิสต์ (Catalyst) สารที่นำมาใช้เป็นตัวแคตตาลิสต์ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

ก. โลหะทรานซิชัน (transition metal) เช่น ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล

ข. สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น CdS, TiO<sub>2</sub>, ZnS, ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ SrTiO<sub>3</sub> เนื่องจากในโลหะทรานซิชันอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานกระตุ้นให้อยู่ในระดับสถานะ กระตุ้น (excited state) จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) ได้ง่ายและรวดเร็วกว่าในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงนิยมใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวแคตตาลิสต์ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิดและหนึ่งในจำนวนของสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ มีความเสถียรสูง และทนทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดกลิ่นและเชื้อโรค รวมทั้งเชื้อราที่ขอบขึ้นตามผนังอาคารที่ชื้น และทำให้อากาศสะอาด โดยการกำจัดแก๊สพิษต่างๆ ที่เกิดจากเขม่าควันรถยนต์หรือโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น และยังทำให้น้ำสะอาด และป้องกันคราบสกปรกที่ติดอยู่ตามผนังภายในและภายนอกอาคารได้ (ป๋องเกียรติ ภาแก้ว, 2555)



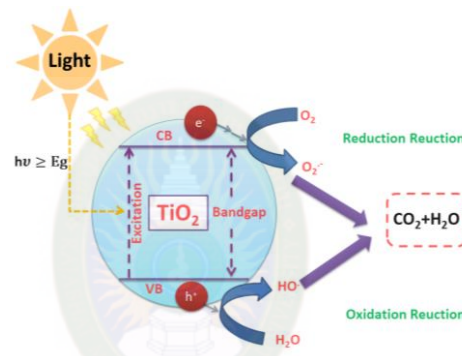
ภาพที่ 2.6 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Mechanism of Photocatalytic)

ที่มา: สรรค์ จิตรไคร์ครวญ, 2557

### 2.7.2 กลไกปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำจะดูดซับบน

บริเวณพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ องค์ประกอบเฟสก็เป็นส่วนที่สำคัญอีกประการหนึ่ง ที่ทำให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี โดยทั่วไปแล้วหลักการและกลไกการย่อยสลายสารที่เป็นมลพิษ ชนิดต่าง ๆ ในน้ำมีปัจจัยที่สำคัญที่จะทำให้กระบวนการการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีนั้น ได้แก่ ความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า หรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเจนน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยหลักการของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ คือ ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ให้เข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานนี้เราเรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยานาโนถูก กระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ



ภาพที่ 2.7 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ดัดแปลงจาก: นัตตา เวชชากุล, 2548

ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งมีโฮลอยู่นั้น อธิบายได้ว่า อิเล็กตรอนจากสารละลายหรือเรียกว่า ตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) จะเคลื่อนที่ไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ( $H_2O$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical,  $OH\cdot$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้ อีกทางด้านหนึ่งปฏิกิริยา ที่เกิดที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band) คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อน จากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชันออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ถูกดูดซับจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดเป็นไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $O_2\cdot^-$ ) และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $HO_2\cdot^-$ ) ในน้ำ ถ้า  $HO_2\cdot^-$  รวมกันผลที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่ง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอน จากแถบการนำหรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และกลายเป็น ไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดย ปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ คือ คาร์บอน ไดออกไซด์และน้ำ (นัตตา เวชชากุล, 2548)

### 2.7.3 ประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ข้อมูลการใช้อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ นั้น มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ประสิทธิภาพของไทเทเนียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ประเภทสารอินทรีย์
Anatase TiO <sub>2</sub>	MethTiO <sub>2</sub> yllic orange
TiO <sub>2</sub> , ZnO <sub>2</sub>	Organicsulfide compounds
TiO <sub>2</sub>	Oxalic acid, maleic acid, 1,2,3-THB
TiO <sub>2</sub>	Benzamide
TiO <sub>2</sub>	Rhodamine B
TiO <sub>2</sub>	Metyl orange
TiO <sub>2</sub> (fiber)	Phenol, formic acid
TiO <sub>2</sub> / Si on black sand	Cationic and anionic dyes
TiO <sub>2</sub> , CuO / TiO <sub>2</sub>	Nitrogen oxide
TiO <sub>2</sub> – coated pellets	Phenol
TiO <sub>2</sub> / CNT	Acridine dye
TiO <sub>2</sub> / NT	Methylene

ที่มา: อติพล สว่างอารมณ์, 2557

## 2.8 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดอันตรกิริยาที่ผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลว และก๊าซ ของแข็งและของเหลว ของเหลวและของเหลว สารที่ผิวเกิดการดูดซับ เรียกว่า วัสดุดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับ อาจเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่มีลักษณะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี เป็นต้น (อภิพงษ์ พุฒคำ, 25547)

### 2.8.1 ประเภทของการดูดซับ

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพขึ้นกับปัจจัยสำคัญได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecule) แรงดึงดูดจะเกิดจากการเรียง

ตัวของโมเลกุล ซึ่งเกิดจาก (Dipole) ของโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งจะดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่วนการดูดซับระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non – polar molecule) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการผลของการกระจายตัว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ในการกระจายของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสของอะตอมนั้นๆเมื่อ Dipole ที่เกิดการสั่นทั้งสองมาอยู่ใกล้กัน พลังงานทั้งหมดจะลดลง ทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ส่วนแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วและไม่มีขั้วเกิดจากการผลของการเหนี่ยวนำ โดยโมเลกุลที่มีขั้วจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดมีขั้วขึ้นมาอยู่ใกล้กันการเหนี่ยวนำจะมีขนาดน้อยเมื่อเทียบกับผลของทิศทางและการกระจายตัว ซึ่งการดูดซับทางกายภาพมี 2 ลักษณะ คือ การดูดซับกันทางไฟฟ้าสถิต และการดูดซับด้วยแรง Van der Waals force

1.1 การดูดซับทางไฟฟ้าสถิต ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ Molecular orientation, Dispersion และ Induction

1.1.1 แรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (การดูดซับระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว)

1.1.2 การกระจายตัวของอิเล็กตรอนอย่างสม่ำเสมอ (การดูดซับระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว)

1.1.3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ทำให้เกิดจากการเหนี่ยวนำ (การดูดซับระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วและไม่มีขั้ว)

1.2 การดูดซับด้วยแรง Van der Waals force เป็นการดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย

## 2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับนี้เกิดจากแรงกระทำทางเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับ กล่าวคือ ตัวถูกดูดซับจะดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับโดยพันธะทางเคมี การดูดซับทางกายภาพและเคมีนั้นจะมีการคายความร้อนออกมา (Exothermic) เนื่องจากระหว่างกระบวนการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะส่งผ่านจาก Bulk phase ไปยังผิวของตัวถูกดูดซับการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว จะทำให้โมเลกุลเสียพลังงานจนทำให้ตัวถูกดูดซับในรูปของความร้อน สำหรับการดูดซับทางเคมีความร้อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพ จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนที่เกิดจากการควบแน่น (Heat of condensation)

### 2.8.2 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

1. การขจัดโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับทำได้ยาก ขณะที่ทางกายภาพขจัดได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน

2. สำหรับทางการดูดซับทางเคมี โมเลกุลตัวดูดซับส่วนการดูดซับทางกายภาพเกิดจากผลของขั้วของโมเลกุลของสารทั้งสอง

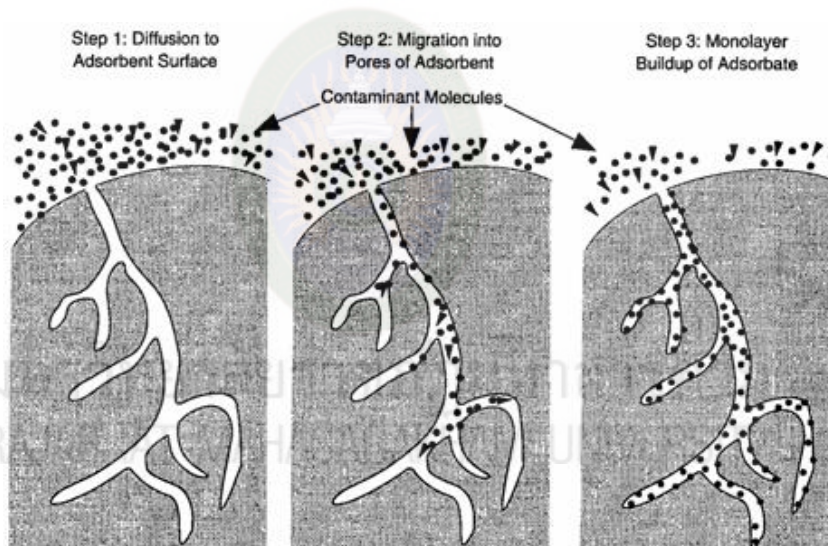
3. การดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวดูดซับจะยึดเกาะกับผิวตัวดูดซับชั้นเดียว และปฏิกิริยาจะหยุดลงเมื่อ Reactive site หมดลง ส่วนการดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรง Van der Waals force ทำให้สารยึดติดผิวตัวดูดซับได้หลายชั้น

4. อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการดูดซับทางเคมีเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราการดูดซับทางกายภาพจะลดลง  
(อภิพงษ์ พุฒคำ, 25547)

### 2.8.3 กลไกการดูดซับ

โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

- 1) โมเลกุลตัวดูดซับแพร่ผ่านจาก bulk phase ไปยังด้านนอกของอนุภาคตัวดูดซับ (Step 1)
- 2) โมเลกุลตัวดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอกไปยังรูพรุนภายในอนุภาค และการดูดซับเกือบทั้งหมดก็จะเกิดภายในรูพรุนนี้ (Step 2)
- 3) โมเลกุลตัวดูดซับจะยึดติดที่ผิวภายในรูพรุน (Step 3)  
ซึ่งกลไกการดูดซับทั้ง 3 ขั้นตอนนั้นจะแสดงได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กลไกการดูดซับ

ที่มา : นภาพร พานิช และคณะ, 2547

### 2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุนซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงกรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

## 2. ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดของการดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดตัวดูดซับ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราเร็วของการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ นั่นคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

## 3. ค่าพีเอช (pH)

ค่า pH มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออนเนื่องจากที่มีค่า pH ต่ำๆจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่มี pH สูงๆซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ กล่าวคือ กรณีที่มีตัวดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุลบ ถ้าสารละลายมีค่า pH ต่ำๆจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนของการละลายแต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกันเมื่อสารดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูงๆเนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้าม

## 4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลง หรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยสร้างการร่งพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น

## 5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลตัวถูกดึงออกจากน้ำก่อนแล้ว จึงไปเกาะติดบนผิวของแข็งสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าจึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้ มีสารละลายได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของสารดูดซับได้ยาก จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับ และการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

## 6. ขนาดสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์จะพบว่าถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอรั่มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ ขนาดของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อ การละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะดูดซับได้มากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นผิวภายนอกที่จะถูกดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากมีพื้นผิวภายนอกเป็นรูพรุน

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เชาว์ ศรีเพชรดี (2553) แกลบข้าวเป็นของเหลือจากภาคการเกษตรที่อุดมไปด้วยซิลิกาซึ่งเป็นสารเสริมแรงสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ซิลิกาจากเถ้าแกลบสามารถสกัดให้อยู่ในรูปของสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การปรับค่า pH ให้เป็นกลางส่งผลให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ได้กลายเป็นซิลิกาเจล ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเตรียมซิลิกาเจลที่มีรูพรุน โดยกระบวนการโซลเจล ซึ่งกระบวนการโซลเจลนี้เกิดพร้อมกับการจับตัวเป็นก้อนของเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติ ยางแห้งที่ได้จะมีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลซึ่งอยู่ในลักษณะของยางธรรมชาติที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของซิลิกาเจล ผลคือยางที่ได้จะมีสมบัติพิเศษในเรื่องคุณสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาในส่วนของงานนำยางที่มีการเสริมแรงด้วยซิลิกาเจลมาทำการเติมสารเสริมแรงร่วมอีก 2 ชนิดคือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและเถ้าลอย ปริมาณสารคู่ควบโซเลนที่มากเกินไปจะถูกใช้เป็นสารปรับปรุงพื้นผิวแก่ซิลิกาแบบตกตะกอนและเถ้าลอย เอกลักษณะการบ่ม สมบัติเชิงกล โครงสร้างสัณฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพ จะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่าเวลาสก็อช เวลาในการบ่ม แรงบิดต่ำสุดและสูงสุดมีค่าลดลง ค่าดูลัสที่ร้อยละ 100 และ 200 การดิ่งยึดของทั้งสองระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่วนในกรณีที่มีการเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงส่วนค่าความต้านทานต่อแรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเถ้าเป็น 10 phr อย่างไรก็ตามค่าความยาว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลของปริมาณซิลิกาและเถ้าลอย ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของซิลิกาในเมทริกซ์ของยาง และความเข้ากันกับเมทริกซ์ยางของเถ้าลอยที่ได้รับการปรับปรุงผิว

กาญจนา ลือพงษ์และนงนุช ศศิธร (2553) การบำบัดเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตะไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยศึกษาผลของกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัดได้แก่ น้ำย้อมสีเดเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีดิสเพิร์ส และสีเบสิค ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อม คือ 1%owf น้ำสีที่ใช้ในการบำบัดเป็นน้ำสีที่ผ่านกระบวนการย้อมบนวัสดุสิ่งทอตามกระบวนการที่สมบูรณ์สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมีโครงสร้างอะโซ (Azo) จากการศึกษาพบว่าสีเดเร็กซ์และสีรีแอคทีฟให้ผลการบำบัดในกระบวนการต่อเนื่องจากเทคนิคโฟโตแคตะไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับได้ดี ส่วนสีดิสเพิร์สควรใช้กระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียวสำหรับสีแอซิดและสีเบสิคมีความเข้มข้นของน้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการน้อยจึงไม่นำมาทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีเดเร็กซ์คือใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง ส่วนสีดิสเพิร์สใช้ถ่านกัมมันต์ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมงดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตแคตะไลติคร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก

นันทพร คงคะจันทร์ และคณะ (2556) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดและการเผาแคลไซน์ต่อเปอร์เซ็นต์ซิลิกา เฟส ความขาว พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของเถ้าแกลบ สมบัติของเถ้าแกลบดีขึ้นเมื่อแกลบได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกรด ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG/DTA แสดงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์แกลบดิบต้องสูงกว่า 600 °C ผลวิเคราะห์เทคนิค XRD และ XRF แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดและตามด้วยการเผาแคลไซน์ที่ 700-900 องศาเซลเซียส มีสีขาว มีซิลิกาที่เป็นเฟสออสตราณปริมาณสูง ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET พบว่าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง สำหรับแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดเมื่อผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบการเปลี่ยนเฟสออสตราณเป็นคริสโตบาไลต์

ณัฐกฤตา บุณณ์ประกอบ (2557) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานาโนบิสมีออกไซด์ไอโอไดด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์คอมพอสิตถูกเตรียมขึ้นโดย วิธีซอล-เจลร่วมกับวิธีการตกตะกอนร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนี้จะสามารถดูดซับแสงในช่วงวิชิเบิล ได้ดีมาก เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงวิชิเบิลหรือแสงที่ช่วงตามองเห็นได้ กระบวนการคอมพอสิตจะทำการ เปลี่ยนแปลงปริมาณของบิสมีออกไซด์ไอโอไดด์ตั้งแต่ 2.5-12.5 โมลเปอร์เซ็นต์ การบำบัดน้ำเสียจากสี ย้อมที่มีสารละลายเมทิลออเรนจ์และเมทิลีนบลู ซึ่งทั้งสองเป็นสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีสีที่ ชัดเจน จากการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยน้ำเสียจากสีย้อมพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 10.0 โมลเปอร์เซ็นต์ นาโนบิสมีออกไซด์ไอโอไดด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์คอมพอสิต ให้ประสิทธิภาพการย่อย เมทิลออเรนจ์และเมทิลีนบลูสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 44.9 และร้อยละ 42.80 ภายใต้การฉายแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับบิสมีออกไซด์ไอโอไดด์เป็นแบบเตตระโกนอลที่มีความเป็นผลึกสูง มีสัณฐานวิทยาที่มีการรวมตัวกันระหว่างสารทั้งสอง กันอย่างลงตัวและมีขนาดอยู่ในช่วง 25-50 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวสูง 69.30 ตารางเมตร/กรัม ซึ่งส่งผลดีทำให้มีบริเวณแอคทีฟไซต์ระหว่างโมเลกุลของสีย้อมเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาและถูกย่อยสลายได้ ปัจจัยที่สำคัญอีกหนึ่งประการคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีการดูดซับแสงในช่วง 610 นาโนเมตร และสามารถลดแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์จาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์เหลือเพียง 2.12 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งส่งผลให้ตัวเร่งสามารถใช้พลังงานโฟตอนจากแสงอาทิตย์ได้ และผลโฟโตลิวมิเนสเซนซ์ยังเป็นการยืนยันอีกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่คอมพอสิตทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการป้องกันการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลได้อย่างชัดเจน ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนไปเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ส่งผลดีต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสอย่างมีประสิทธิภาพ

จตุพร วิทยาคุณ (2558) วิจัยฉบับนี้ได้ศึกษา ซิลิกาจากแกลบข้าวถูกเตรียมโดยการปรับสภาพแกลบด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาจากแกลบข้าวในรูปของออสตราณซิลิกามีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 97 โดยน้ำหนัก ถูกใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับการเตรียมพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต ผลของปริมาณซิลิกาจากแกลบข้าวต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต ซิลิกาจากแกลบข้าวที่ปริมาณต่างๆ (ร้อยละ 10-60 โดยน้ำหนัก) ถูกนำไปผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรบทาเลทในเครื่องบดผสม การใส่ซิลิกาจากแกลบข้าวในพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึก ความหนืด



ความแข็งแรงต่อแรงดึง ณ จุดครากและ มอดูลัสของการดึงของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต อย่างไรก็ตามการยึดตัว ณ จุดแตกหักและค่าความแข็งแรงต่อการกระแทกลดลง นอกจากนี้ สันฐานวิทยาจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างซิลิกาจากแกลบข้าวและพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ เพิ่มสมบัติต่างๆของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต ผิวหน้าซิลิกาจากแกลบข้าวถูกปรับเปลี่ยนด้วย  $\gamma$ -เมทาคริลอิกซีโพลีฟอสเฟตไตรเมทอกซีไฮดรอกไซด์ (MPS) ซิลิกาจากแกลบข้าวที่ไม่ได้ถูกปรับเปลี่ยนพื้นผิวและถูกปรับเปลี่ยนพื้นผิว เรียกว่า U-RHS และ MPS-RHS ตามลำดับ พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตถูกเตรียมโดยใช้ซิลิกาจากแกลบข้าวที่ปริมาณคงที่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก MPS-RHS ที่ MPS ปริมาณต่างๆ (ร้อยละ 0.5-5 โดยน้ำหนัก) สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลต่างๆของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตและเปลี่ยนอุณหภูมิการสลายตัวและ ความหนืดของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตเล็กน้อย ความแข็งแรงต่อแรงดึงค่าแข็งแรงต่อการกระแทกและอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิตเสริมแรงด้วยซิลิกาจากแกลบข้าวที่ถูกปรับปรุงผิวหน้าด้วย MPS2-RHS ให้ค่ามากที่สุดยิ่งกว่านั้น สันฐานวิทยาจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการยึดติดระหว่าง MPS-RHS และ พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ที่ดีกว่าการยึดติดระหว่าง U-RHS และ พอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทเมทริกซ์ ศึกษาดูดซึมน้ำและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทและพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต พบว่าการเติม U-RHS ในพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทเพิ่มการดูดซึมน้ำและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนผิวหน้าของ U-RHS ด้วย MPS จะลดการดูดซึมน้ำและการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนอะดิเปทโคเทอเรบทาเลทคอมโพสิต

ฉัตรรัตน์ จิตเจนสุวรรณ (2558) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการสลายตัวเชิงแสงของ ทู-คลอโรฟีนอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวานาเดียม และ คอปเปอร์ซัลเฟต ที่เตรียมโดยวิธีโซลเจล การทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการสลายตัวเชิงแสงของทู-คลอโรฟีนอล โดยศึกษาปัจจัยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมวล 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นของ สอง-คลอโรฟีนอล 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตรในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณวานาเดียมที่อัตราส่วนอะตอมของ Ti : V และ Ti : Cu เท่ากับ 0.07, 0.14, 0.21, 0.28 และ 0.35 %mol ที่เจือบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ และผลกระทบของ pH ที่แตกต่างกัน จาก 2, 3, 5.5, 7 และ 9 นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา 200, 300, 400, 500, และ 600 องศาเซลเซียส การทดลองใช้ HPLC เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ สอง-คลอโรฟีนอล ที่สลายตัวเชิงแสงและวิเคราะห์สันฐานพื้นผิว ขนาดอนุภาค ที่เตรียมด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM) และ X-ray Diffraction (XRD) Ultraviolet ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า สำหรับอิทธิพลของการเจือ ทู-คลอโรฟีนอลบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีอัตราส่วนอะตอมของ Ti : Cu เท่ากับ 0.07, 0.14, 0.21, 0.28 และ 0.35 %mol โดยใช้แสงวิซิเบิล พบว่าทำให้ทู-คลอโรฟีนอลสลายตัวเชิงแสงเท่ากับร้อยละ 88.01, 98.87, 98.92, 95.14 และ 90.48 ตามลำดับ เพราะว่าการเจือคอปเปอร์ซัลเฟต ทำให้ขนาดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เปลี่ยนแปลง แต่ไม่เปลี่ยนสันฐานของผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สรุปว่าการเจือ

คอปเปอร์ซัลเฟตบนผิว ไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยเพิ่มการสลายตัวเชิงแสงของแคทาคอลได้ที่ 0.28 %mol ในสภาวะการเผา 300 องศาเซลเซียส ปริมาณ 3 กรัม โดยใช้ ทู-คลอโรฟินอล 20 ppm ร่วมกับ pH เท่ากับ 5.5 โดยให้ อัตราการสลายตัวเชิงแสงเท่ากับ 98.87% ที่เวลา 6 ชั่วโมง การศึกษา จลนพลศาสตร์การย่อยสลาย ทู-คลอโรฟินอล ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือ คอปเปอร์ซัลเฟต 0.21 %mol ภายใต้การฉายแสงสีฟ้า สามารถอธิบายได้ด้วย แบบจำลองของ แลงเมียร์-อินเซลวูด พบว่าได้ค่าคงของปฏิกิริยา (kr) เท่ากับ  $0.148 \times 10^{-3}$  มิลลิโมลาร์/นาที่ และ ค่าคงที่การดูดซับของ แลงเมียร์ (K) เท่ากับ 6.4 ต่อ มิลลิโมลาร์

เทียนันท์ เจือแก้ว และคณะ (2558) ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดซัลฟูริกผสมกรดไนตริกต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไททาเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ โดยการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและไททาเนียมไดออกไซด์ (CNT/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีโซล-เจลในอัตราส่วน 1 CNT:20 TiO<sub>2</sub> โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงให้เห็นว่าการมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น ส่งผลดีในการเกิดปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ผลการศึกษากลไกของคอมโพสิต CNT/TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน แสดงให้เห็นว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เป็นผลึกอนาเทสลักษณะสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ผลทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยแสงที่มองเห็นได้พบว่าคอมโพสิต CNT/TiO<sub>2</sub> สามารถสลายสีเมทิลีนบลูได้ถึงร้อยละ 80

พินิจ เอี่ยมสะอาด และคณะ (2559) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล ซึ่งศึกษาชนิดของเบสที่ใช้ในการสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ NaOH Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> และ NH<sub>4</sub>OH รวมทั้งยังนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น X-Ray diffractometry (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier-transformed Infrared Spectrophotometry (FT-IR), Diffused reflectance Ultravioletvisible Spectroscopy (DRS) และหาปริมาณของไฮดรอกซิล (-OH) ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนซ์จากผล XRD พบว่าเป็นผง TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกน้อยมากเป็นอสัณฐาน ส่วนสัณฐานวิทยาของผง TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้เป็นทรงกลมขนาดนาโนเมตรที่มีการรวมตัวเป็นก้อนใหญ่ จากผล FT-IR พบลักษณะเฉพาะที่แสดงแถบการยึดของพันธะ Ti-O และพื้นผิวมีหมู่ไฮดรอกซิลมาก สำหรับการศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาโดยใช้แสงในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี พบว่า TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมด้วย NaOH มีประสิทธิภาพ ในการสลายเมทิลีนบลูต่ำกว่า TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมด้วยเบสตัวอื่น เนื่องจากผลิต OH น้อยกว่าสภาวะอื่น นอกจากนี้ ศึกษาความคงทนแสงของผงสีธรรมชาติโดยใช้ผง TiO<sub>2</sub> เป็นสารดูดกลืนรังสียูวี พบว่า TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมด้วย NaOH ช่วยเพิ่มความคงทนแสงของผงสีธรรมชาติได้ดีที่สุด

วีระชัย แสงฉาย (2559) จุดประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้บดด้วยเหล็ก (0 1 3 และ 5 % mol) ด้วยกระบวนการโซลเจล แล้วนำไปเคลือบบนใยแก้ว ด้วยวิธีการแบบจุ่มเคลือบ หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ลักษณะโครงสร้างต่าง ๆ ของฟิล์มที่สังเคราะห์จะใช้เทคนิค XRD และ SEM ในการวิเคราะห์ พร้อมทั้งทดสอบสมบัติโฟโต

คะตะไลติกในการย่อย สลายสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณเหล็ก ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี และแสงฟลูออเรสเซนซ์เพิ่มสูงขึ้น โดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ด้วยเหล็ก เท่ากับ 5 %mol ให้ค่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 71.82 และ 48.83 ตามลำดับ

อรสา อินทร์น้อย (2559) วิทยุฉบับนี้ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการดูดซับเหล็ก (II) ในน้ำและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้ซิลิกาที่สกัดจากแกลบของข้าว 2 ชนิด คือข้าวเหนียว (พันธุ์ กข 6) และข้าวเจ้าหอมมะลิ (พันธุ์หอมมะลิ 105) ทำการสกัดซิลิกาจากแกลบโดยการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นผงสีขาว พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ศึกษารูปร่างภายนอกและพื้นผิวด้วย SEM และวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์พบว่าแพทเทิร์นเอกซเรย์ดีฟแฟกชัน ของตัวอย่างทั้งสองปรากฏพีกกว้างอยู่ในช่วงประมาณ 22 ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของซิลิกาอสัณฐาน และมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ประมาณร้อยละ 99 นำซิลิกาที่เตรียมได้นำมาศึกษาการดูดซับเหล็ก โดยศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ค่า พีเอช เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น โดยวิเคราะห์ปริมาณเหล็กด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

นฤตล สายใจอุป (2560) การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์รูปลูก้อนนาโน ( $\text{TiO}_2$ ) ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอนอดิซเซชัน (anodization) ให้ตอบสนองต่อแสงวิซิเบิลโดยการประติดด้วยแอนติโมนีไครซัลไฟด์ ( $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) ด้วยวิธีโฟโตเคปโพสิชัน (photodeposition) แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วย กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis) ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FE-SEM พบว่า  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  มีลักษณะพื้นผิวเห็นเป็นท่อขดเจิน มีกระจายตัวของท่ออย่างสม่ำเสมอ การใช้เทคนิค EDX และ XRF ทำให้พบว่าบน  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  มีธาตุของ Sb และ S กระจายอยู่ทั่วผิวของตัวเร่ง ปฏิกิริยาและปริมาณธาตุ Sb และ S จะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการฉายแสงลงบนตัวเร่ง ปฏิกิริยา การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถบอกได้ว่า  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  เกิดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส และ เกิดเป็นโครงสร้างผลึกของแอนติโมนีไครซัลไฟด์ การใช้เทคนิค DRS พบว่า  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  สามารถดูดกลืนแสงได้มากกว่า  $\text{TiO}_2$  และการดูดกลืนแสงของ  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  จะใกล้เคียงกันตั้งแต่ระยะเวลาการฉายแสงที่ 15 นาที การศึกษาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสพบว่า ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า  $\text{TiO}_2$  ทั้งในการศึกษากับเชื้อ E.coli และ Focal Streptococcus ในการศึกษาพื้นที่ผิวของ  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  ในช่วง 0-75 ตารางเซนติเมตร พบว่ายังมีปริมาณของพื้นที่ผิวมาก ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน Ti, Sb, S ในช่วง 0.50 มิลลิลิตร/นาที พบว่ายิ่งใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (E.coli) ในน้ำก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และยังพบว่า  $\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$  สามารถใช้ซ้ำได้เป็นระยะเวลาาน ใช้ซ้ำได้หลายรอบ โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมดสภาพการใช้งาน และไม่มีการหลุดของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวอด พบว่า  $k$  เท่ากับ  $2.5 \times 10$  เซล/100 มิลลิลิตร-นาท

วัชรพล นันทอุปกการ และ ญัฐญา คุ่มทรัพย์ (2561) สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนที่เจือด้วยไนโตรเจนโดยวิธีการเคลือบฝังแบบใช้อัลตราโซนิกพร้อมกับการเจือโดยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะถูกใช้ในการอธิบายผลของระยะเวลาการใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีต่อความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพื่อย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล คลื่นอัลตราโซนิกมีบทบาทสำคัญต่อการเข้าไปในโครงผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ไนโตรเจนสามารถเข้าไปในโครงผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ได้ทั้งในลักษณะของการแทนที่อะตอมและการแทรกตัวใน โครงสร้างผลึก การที่ไนโตรเจนเข้าไปในโครงผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์นั้น นอกจากจะส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจนลดลงแล้ว ยังช่วยให้การดูดซับแสงวิสิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจนเพิ่มขึ้นด้วย การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ระยะเวลาในการเจือด้วยอัลตราโซนิกนาน 30 และ 60 นาที ( $N/TiO_2$  -30 และ  $N/TiO_2$  -60) พบว่ามีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาสูงที่สุด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานต่ำนั้น จะช่วยให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลจำนวนมากได้เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงวิสิเบิล การเพิ่มระยะเวลาการเจือด้วยอัลตราโซนิกนานถึง 90 นาที ดังกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา  $N/TiO_2$  -90 นั้นจะช่วยทำให้อะตอมของไนโตรเจนเข้าไปแทรกตัวในโครงผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ได้มากยิ่งขึ้นซึ่งการเข้าไปของไนโตรเจนแบบแทรกตัวนี้ส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $N/TiO_2$  -90 กว้างกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $N/TiO_2$  -30 และ  $N/TiO_2$  -60 นอกจากนี้ปริมาณของ Oxygen vacancy ที่มีอยู่ภายในผลึกของตัวเร่ง ปฏิกิริยา  $N/TiO_2$  -90 จำนวนมาก ยังทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล และทำให้ ความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงวิสิเบิลลดลง

Nakamura et al. (2011) ได้ทำการวิจัยสังเคราะห์วัสดุเมโซพอร์ (Mesopore) ซิลิกาเคลือบไทเทเนียม พบว่าวัสดุเมโซพอร์ (Mesopore) ซิลิกาเคลือบไทเทเนียมเกิดปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงย่อยสลาย 4-nonylphenol และ ฟีนอล ในขณะที่ไม่เกิดการย่อยสลาย nonane โดยการฉายรังสียูวี

Kim et al. (2013) ได้สังเคราะห์วัสดุผสมระหว่างซิลิกากับไทเทเนียม  $TiO_2-SiO_2$  เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการสลายตัวของสารปนเปื้อนอินทรีย์ภายใต้รังสียูวี โดยการวิจัยครั้งนี้ได้สังเคราะห์วัสดุผสม  $TiO_2-SiO_2$  ที่มีอัตราส่วนระหว่าง Si และ Ti ที่แตกต่างกันไปซึ่งเหมาะสำหรับการลดสีของสารอินทรีย์ โดยใช้ซิลิกา (ไซเดียมซิลิเกต) ที่มีราคาไม่แพงและไทเทเนียมจากไทเทเนียมออกไซด์คลอไรด์ ( $TiOCl_2$ ) เป็นสารตั้งต้น โดยตัวอย่างที่เตรียมได้จะเผาในอุณหภูมิที่ต่างกันตั้งแต่ 200-1000 องศาเซลเซียส เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการรักษาความร้อนของโมเลกุลของวัสดุผสม คุณสมบัติของวัสดุผสมถูกตรวจสอบโดย XRD, FTIR, XRF, TEM, SEM, การศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจน  $N_2$ , TGA/DTA และการวิเคราะห์สเปกโตรมิเตอร์ พบว่าอุณหภูมิของการเผาเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงความพรุนและผลึกของวัสดุผสม วัสดุผสมที่ได้มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกและมีประสิทธิภาพในการลดสีเมทิลีนบลู หลังจากได้ผ่านการเผาที่มีอุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส

Shao et al. (2013) ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของการผสมกันระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์โดยโซลเจล 3 ขั้นตอนคือ 1. ล้างไฮโดรเจลด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน 2. การลดแรงตึงผิว 3. การขึ้นรูปไทเทเนียมโซลในเอทานอล ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการโซลเจลในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตโดยใช้สารตั้งต้นที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่า ขั้นแรก ไฮโดรเจลที่ตกตะกอนถูกชะล้างด้วยน้ำหรือแอลกอฮอล์ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการชะล้างของไฮโดรเจล จากนั้นวัสดุผสมจะถูกทำเป็นคอมโพสิตที่แตกต่างกันในสเตรียริกแอซิด ซึ่งเป็นตัวลดแรงตึงผิวช่วยลดการก่อตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์โซลในเอทานอลก่อนจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา วัสดุผสมที่เตรียมได้ถูกตรวจสอบโดย XRD, FTIR, TGA, SEM, XRF และ HRTEM และตรวจสอบการดูดซับโดยใช้  $N_2$  วัสดุผสมที่ได้จากการใช้สเตรียริกเป็นสารลดแรงตึงผิว มีพื้นที่ผิว  $0.96 \text{ cm}^2/\text{g}$  และเมื่อใช้ เอทานอลเป็นตัวกลางในการสังเคราะห์  $TiO_2\text{-Sol}$  มีพื้นที่ผิว  $1.85 \text{ เซลติเมตร/กรัม}$  การเกิดโฟโตแคทตะไลต์ติงโดยการดูดซับเมทิลีนบลู ด้วยวัสดุคอมโพสิตที่เผาที่อุณหภูมิ  $800$  องศาเซลเซียสพบว่ามีคุณสมบัติสูงสุดจากวัสดุรูปทรงทั้งหมด



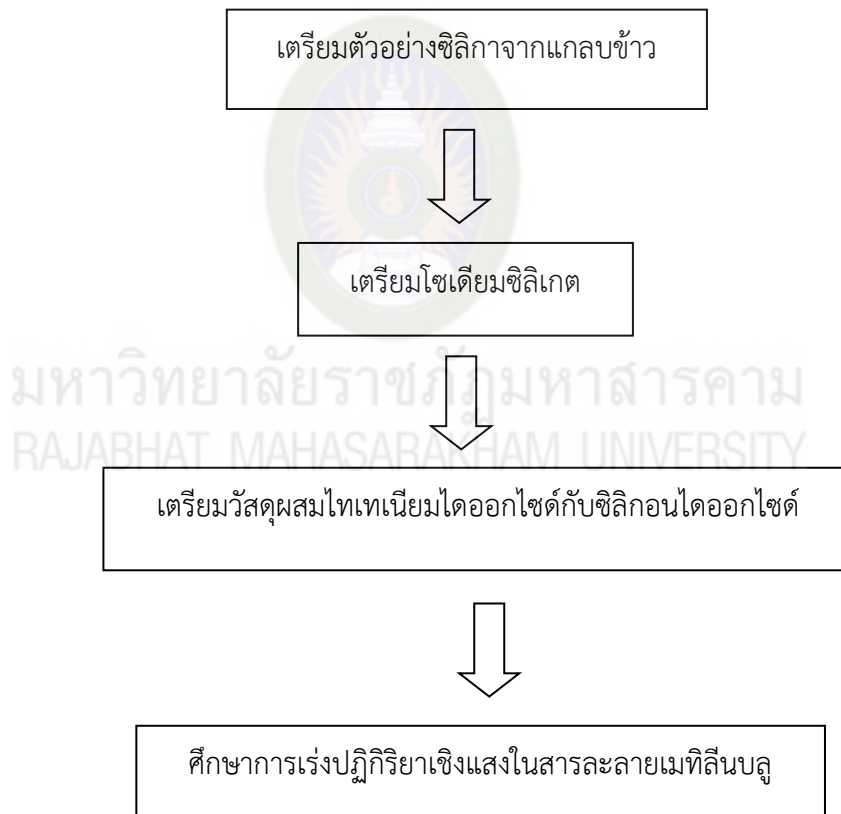
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง การเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากกลบข้าว มีขั้นตอนการวิจัย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่างซิลิกาจากกลบข้าว
2. การเตรียมโซเดียมซิลิเกต โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์
3. การเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์
4. การศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลู ที่เวลาต่างๆ

จากแผนการดำเนินการวิจัยข้างต้นสามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมกลบข้าว

นำกลบข้าวจากโรงสีข้าวที่เก็บมาแยกเอาเฉพาะกลบข้าวแยกดอกหญ้าหรือเม็ดข้าวที่ติดมาด้วยออก และนำกลบข้าวที่แยกแล้วมาล้างด้วยน้ำประปาจนสะอาด จากนั้นไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บไว้ในถุงซิปล็อค

### 3.2 การเตรียมซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จากแกลบข้าว

- 1) นำแกลบข้าวที่เตรียมไว้จากข้อ 3.3.1 ไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง 25 กรัม ใส่ในขวดก้นกลม ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ปริมาตร 125 มิลลิลิตร
- 3) นำไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ เมื่อทำการรีฟลักซ์เสร็จให้นำแกลบข้าวมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนแกลบข้าวมีสภาพเป็นกลาง
- 4) นำแกลบข้าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 5) นำไปเผา โดยนำแกลบข้าวใส่ลงในถ้วยเผาประมาณ 1 ใน 3 ของถ้วยเผา และเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก็จะได้ซิลิกาจากแกลบข้าวที่มีลักษณะเป็นสีขาว และนำซิลิกาจากแกลบข้าวเก็บใส่ถุงซิปล็อค

### 3.3 การเตรียมโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ ) จากแกลบข้าว

- 1) นำซิลิกาจากแกลบข้าวที่เตรียมไว้จากข้อ 3.2 จากชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร นำไปกวนและควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 80-90 องศาเซลเซียส และกวนไปเรื่อยๆ จนสารละลายโซเดียมซิลิเกตใส (กวนไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง)

### 3.4 การเตรียมวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์

( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ) (Kazuyuki et al., 2011)

- 1) ชั่ง CTAB 1.7 กรัม และไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2) เติมเมทานอล 200 มิลลิลิตร แอมโมเนีย 7.2 มิลลิลิตร และเติมน้ำ DI 17.2 มิลลิลิตร ตามลำดับ
- 3) นำไปกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) ชั่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เตรียมไว้จากข้อ 3.3.3 มาชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 0.5 กรัม เติมลงไปนสารละลาย (เขย่า 15 ครั้ง)
- 5) นำไปแช่ไว้ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบ 3 ชั่วโมง นำออกมาตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน
- 6) จากนั้นนำไปกรองเอาตะกอน และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 7) นำไปเผาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ก็จะได้วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ )

### 3.5 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

#### 3.5.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู สำหรับทดสอบการสลายสี

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู เข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 ppm โดยการเจือจางจาก สารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู เข้มข้น 1000 ppm
- 2) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย เมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร
- 3) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู กับค่าการดูดกลืนแสง

#### 3.5.2 การศึกษาการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู

##### 1) การศึกษาการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูในที่มืด

1.1) ชั่งวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ) ที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลองและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

1.2) ชั่งไทเทเนียม 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

1.3) ชั่งซิลิกาที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

1.4) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู 100 มิลลิลิตร เข้มข้น 60 ppm ใส่ในหลอดเซนติฟิวหลอดละ 5 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

1.5) ตัวอย่างสารละลายข้อ 1, 2, 3, และ 4 ต้องเตรียมในเวลาเดียวกันเพื่อจะนำมาเปรียบเทียบกันและทำการทดลองซ้ำอีกสามครั้งจากตัวอย่างเดิม

##### 2) การศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์

2.1) ชั่งวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ) ที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 10, 30,



60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

2.2) ชั่งไทเทเนียม 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

2.3) ชั่งซิลิกาที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 mL. เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

2.4) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู 100 มิลลิลิตร เข้มข้น 60 ppm ใส่ในหลอดเซนติฟิวหลอดละ 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

2.5) ตัวอย่างสารละลายข้อ 1, 2, 3 และ 4 ต้องเตรียมในเวลาเดียวกันเพื่อจะนำมาเปรียบเทียบกันและทำการทดลองซ้ำอีกสามครั้งจากตัวอย่างเดิม

### 3) การศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวี

3.1) ชั่งวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ ) ที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงยูวีเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

3.2) ชั่งไทเทเนียม 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงUVเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180 นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

3.3) ชั่งซิลิกาที่เตรียมไว้ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดเซนติฟิวและเติมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 60 ppm หลอดละ 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสงUVเป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180, นาที เพื่อดูอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

3.4) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู 100 มิลลิลิตร เข้มข้น 60 ppm ใส่ในหลอดเซนติฟิวหลอดละ 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ภายใต้แสง UV เป็นเวลา 10, 30, 60, 120, 180 นาที

เพื่อดูอัตราการสลายตัวไปของเมทิลีนบลูโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (ก่อนนำไปวัดต้องนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนทุกครั้ง)

3.5) ตัวอย่างสารละลายข้อ 1, 2, 3 และ 4 ต้องเตรียมในเวลาเดียวกันเพื่อจะนำมาเปรียบเทียบกันและทำการทดลองซ้ำอีกสามครั้งจากตัวอย่างเดิม



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง การเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากแกลบข้าว มีผลการวิจัยตามลำดับดังนี้

### 4.1 การเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าว

#### 4.1.1 การเตรียมแกลบข้าว

นำแกลบข้าวจากโรงสีมาทำความสะอาดโดยแยกเอาเฉพาะแกลบข้าว แยกดอกหญ้าหรือเม็ดข้าวออก แล้วล้างด้วยน้ำ อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้แกลบดังแสดงแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แกลบข้าว

#### 4.1.2 การเตรียมซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จากแกลบข้าว

หลังจากทำความสะอาดแกลบข้าว แล้วนำไปรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 3 ชั่วโมงจากนั้นล้างด้วยน้ำจนมีค่า pH เป็น 7 ทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ซิลิกา ซึ่งเป็นผงสีขาว ดังภาพที่ 4.2 โดยใช้แกลบ 10 กรัม หลังการเผาได้ผงสีขาวของซิลิกา 0.6854 กรัม เมื่อคำนวณหาร้อยละน้ำหนักซิลิกาที่ได้

$$\begin{aligned}\% \text{ LOI} &= \frac{0.6854 \text{ กรัม}}{10.3459 \text{ กรัม}} \times 100 \\ &= 6.62 \%\end{aligned}$$

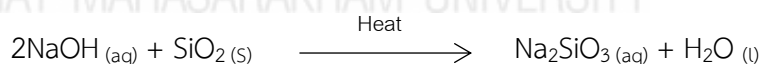


ภาพที่ 4.2 ซิลิกาจากแกลบข้าว

จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้สามารถเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวคิดเป็นร้อยละ 6.62 ซึ่งมีการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ซิลิกาในแกลบข้าวคิดเป็นร้อยละ 12.1 และใบไม้คิดเป็นร้อยละ 19.3 (Kien-Woh Kow et al., 2014) ในซังข้าวโพด คิดเป็น 52.2 เปอร์เซ็นต์ ในขานอ้อยคิดเป็น 53.10 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกาจากฟางข้าวสาลีคิดเป็น 55 เปอร์เซ็นต์ (Norsuraya et al, 2016) แสดงว่าในแกลบข้าว สามารถเตรียมซิลิกาได้ปริมาณน้อย แต่อย่างไรก็ตามแกลบข้าวส่วนใหญ่ก็มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นไม่มาก จึงเป็นทางเลือกในการใช้เป็นแหล่งซิลิกาได้ สามารถคำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้ดังนี้

#### 4.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ให้ความร้อนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตรกับซิลิกาจากแกลบข้าว 1 กรัม จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายใสไม่มีสีและสามารถทดสอบได้โดยการไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์จะได้เจลสีขาวขุ่น



สามารถทดสอบสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้ดังวิธีการต่อไปนี้

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต 5 มิลลิลิตรไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ซึ่งแสดงปฏิกิริยาเคมี ดังสมการ



จากการทดลอง ใช้กรดไฮโดรคลอริกในการไทเทรต 1.8 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad N_1V_1 &= N_2V_2 \\ (N_1)(5 \text{ mL}) &= \frac{(2\text{M})(1.80\text{mL})}{2} \\ N_1 &= 0.36 \text{ M} \end{aligned}$$

สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความเข้มข้น 0.36 โมลาร์  
สามารถคำนวณปริมาณโซเดียมซิลิเกต ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{CV}{1000} &= \frac{g}{MW} \\ \frac{0.36 \text{ โมลาร์} \times 5 \text{ มิลลิลิตร}}{1000 \text{ มิลลิลิตร}} &= \frac{g}{60.08} \\ g &= 0.12 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น มีโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.12 กรัม

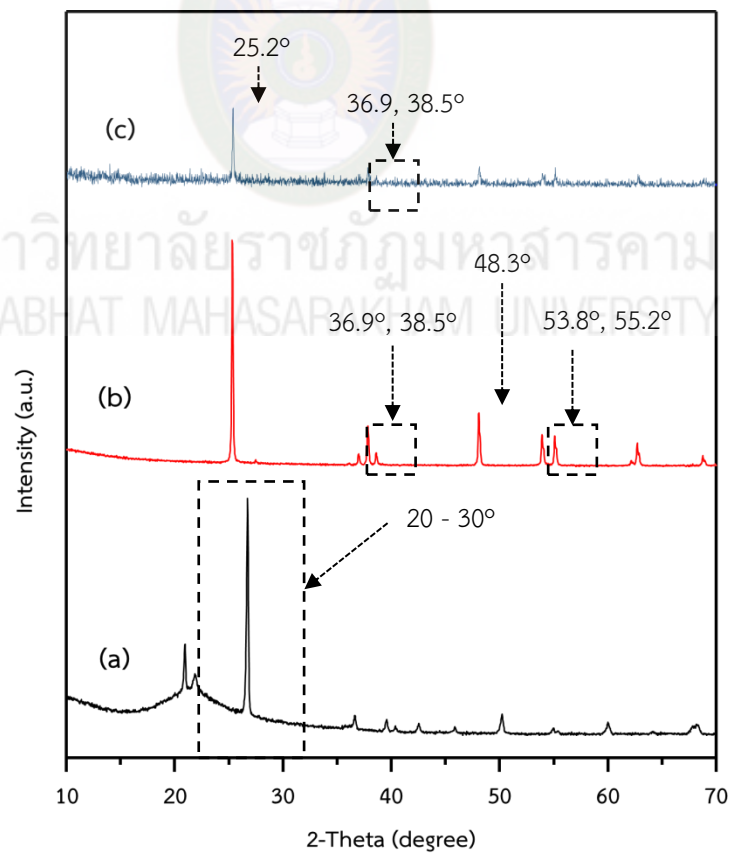
คำนวณหาร้อยละโซเดียมซิลิเกต ดังแสดง

$$\begin{aligned} \% \text{ LOI} &= \frac{0.12 \text{ กรัม}}{1 \text{ กรัม}} \times 100 \\ &= 12 \% \end{aligned}$$

สามารถเตรียมโซเดียมซิลิเกตจากซิลิกาคิดเป็นร้อยละ 12

#### 4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกา $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

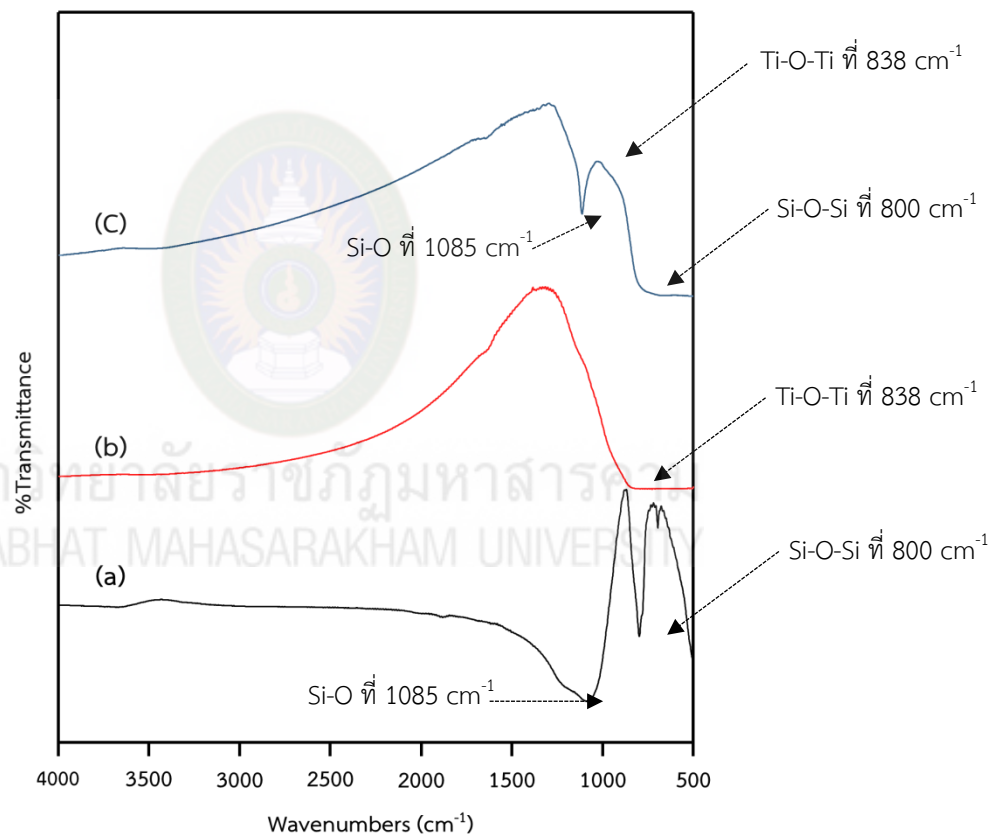
##### 4.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



ภาพที่ 4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $\text{TiO}_2$  (b) และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (c)

จากการศึกษาลักษณะผลึกของผงสีขาวที่เตรียม จากแกลบ (ภาพที่ 4.3 (a)) พบตำแหน่งพีก  $2\theta$  ที่ตำแหน่ง  $20-30^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  (Hui Liu et al., 2015) ยืนยันได้ว่าผงสีขาวที่เตรียมได้จากแกลบเป็น  $\text{SiO}_2$  และเมื่อทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่าง  $\text{TiO}_2$  ซึ่งได้จาก (Carlo Erba Reagents) กับซิลิกาจากแกลบ พบตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $36.9, 38.5, 48.3, 53.8, 55.2$  ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างของ  $\text{TiO}_2$  และพบพีกลักษณะของโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  ที่ตำแหน่ง  $25.2$  ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  อย่างไรก็ตาม พีกตำแหน่ง  $36.9$  และ  $38.5$  จะมีตำแหน่งพีกที่อ่อนลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่เตรียมได้ผสมระหว่างสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับซิลิกา (Łukasz Klapiszewski et al., 2017)

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR



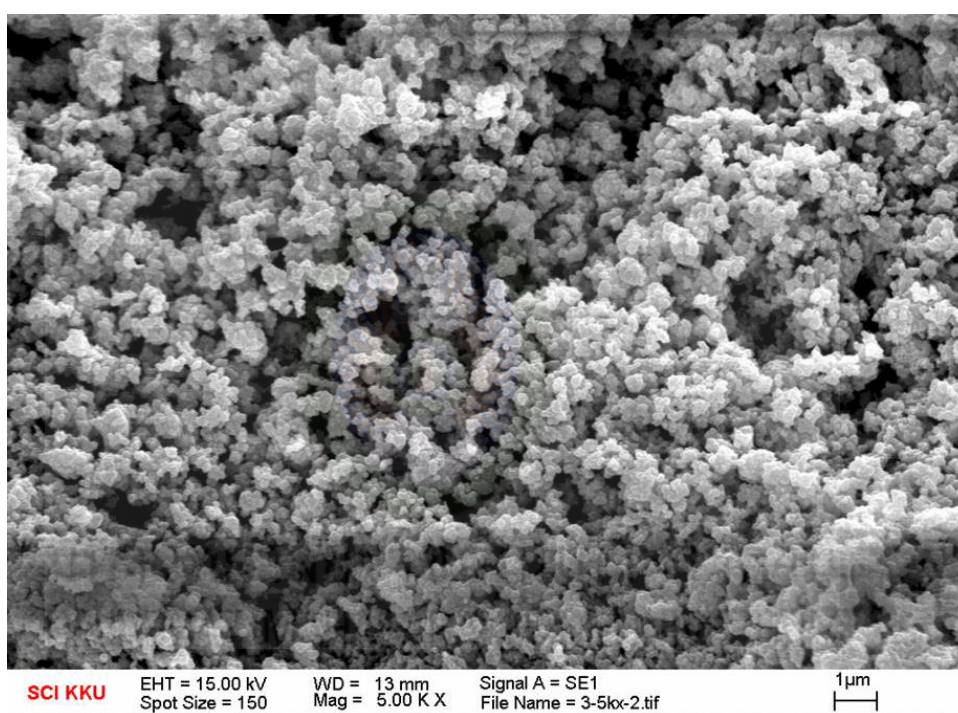
ภาพที่ 4.4 กราฟการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ของ  $\text{SiO}_2$  (a),  $\text{TiO}_2$  (b) และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (c)

จากการศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า  $\text{SiO}_2$  จากแกลบ (ภาพที่ 4.4 (a)) พบการสั่นของ Si-O-Si ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $800 \text{ cm}^{-1}$  และพบการสั่นของ Si-O ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1085 \text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของ Si-O และที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $800 \text{ cm}^{-1}$  และ  $460 \text{ cm}^{-1}$  (Catauro et al., 2015) จะพบ Si-O-Si ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  และสเปกตรัมของ  $\text{TiO}_2$  (ภาพที่ 4.4 (b)) พบการสั่นของ Ti-O-Ti ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $838 \text{ cm}^{-1}$  (Haroum et al., 2011) และในสเปกตรัมของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (ภาพที่ 4.4 (c)) พบการสั่นของ Si-O-Si ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $800 \text{ cm}^{-1}$  พบ Si-O ที่ตำแหน่งเลข

คลื่น  $1085\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$  และพบการสั่นของ Ti-O-Ti ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $838\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าการเตรียมวัสดุผสมเตรียมได้สารผสมระหว่าง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

หลังจากการเตรียมวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  โดยการเติม  $\text{TiO}_2 : \text{SiO}_2 : \text{CTAB} : \text{H}_2\text{O} : \text{NH}_3 : \text{MeOH}$  ในอัตราส่วนโมล 1:1:0.4:596:72:2993 (Nakamura et al., 2011) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงสีขาว และนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วย SEM ได้ผลดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 SEM ของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

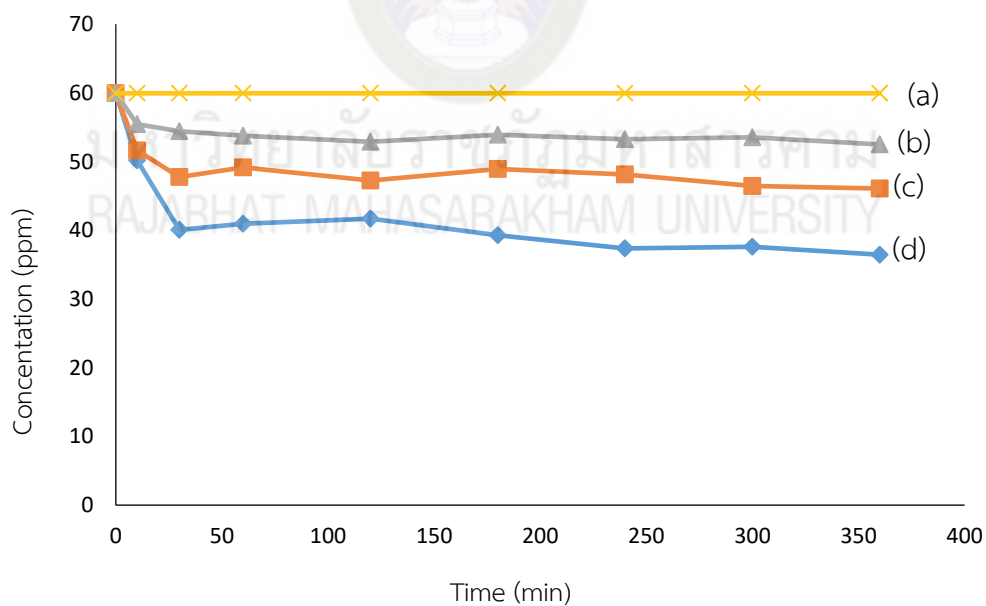
เมื่อนำวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  วัตต์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ได้ผลดังภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของวัสดุผสมมีลักษณะเป็นทรงกลม เรียงชิดติดเป็นจำนวนมาก วัสดุผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ไมโครเมตร ยืนยันได้ว่าสามารถเตรียมวัสดุรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ไมโครเมตร ด้วย  $\text{SiO}_2$  จากแคลบผสม  $\text{TiO}_2$  ได้ (kim et al., 2013)

#### 4.4 การศึกษาการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู

ทำการศึกษาดูดซับสีเมทิลีนบลูที่เข้มข้น 60 ppm ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ดังตารางที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.6 และ 4.7

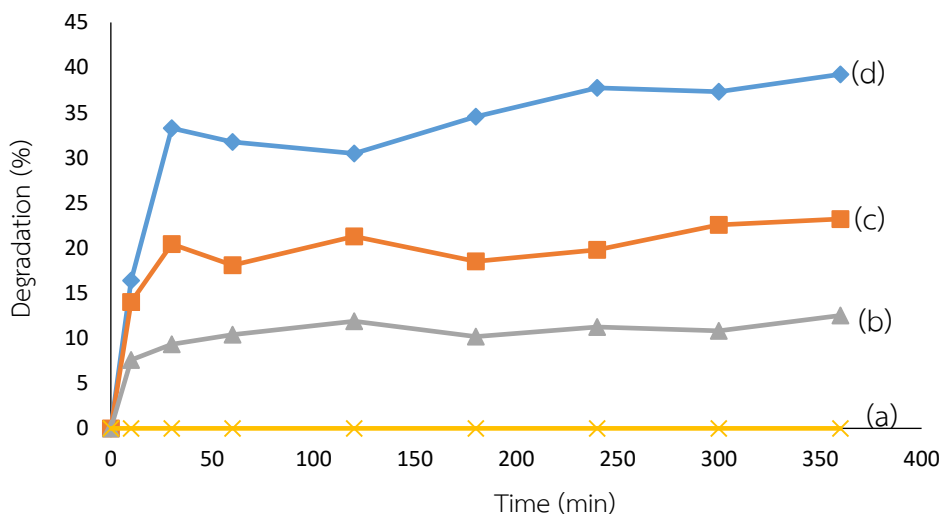
ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู ของ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ในที่มีด

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (ppm)				ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู (เปอร์เซ็นต์)		
	MB	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	59.93	59.93	59.93	59.93	0	0	0
10	59.93	55.44	51.59	50.17	14.01	7.59	16.36
30	59.93	54.41	47.74	40.04	20.43	9.30	33.26
60	59.93	53.77	49.15	40.93	18.07	10.37	31.76
120	59.93	52.87	47.22	41.70	21.28	11.87	30.48
180	59.93	53.90	48.89	39.27	18.50	10.16	34.54
240	59.93	53.25	48.12	37.34	19.78	11.23	37.75
300	59.93	53.51	46.45	37.60	22.57	10.80	37.32
360	59.93	52.48	46.07	36.44	23.21	12.51	39.25



ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  (b),  $\text{TiO}_2$  (c) และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (d) ในที่มีด





ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  (b),  $\text{TiO}_2$  (c) และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (d) ในที่มีด

การดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm จากการทดลองพบว่า สารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่เตรียมมีความเข้มข้น 59.93 ppm เมื่อทำการทดลองในที่มีดสารละลายเมทิลีนบลูที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นคงที่ที่ 59.93 ppm ภาพที่ 4.6 (a) แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและอยู่ในที่มีด เป็นเวลา 360 นาที เมทิลีนบลูไม่มีการสลายตัว

การทดสอบการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm โดยใช้  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  0.01 กรัม ในสภาวะที่มีด ทำการทดลองที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การสลายสีเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ที่เวลา 240 นาที โดย  $\text{SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู สูงสุดที่ร้อยละ 12.51 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 52.48 ppm  $\text{TiO}_2$  มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่ 23.21 เปอร์เซ็นต์ สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 46.07 ppm และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่ร้อยละ 39.25 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 36.44 ppm ที่เวลา 360 นาที จะเห็นได้ว่าวัสดุผสมสามารถดูดซับสีของเมทิลีนได้สูงสุดแสดงว่าการเตรียมวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  สามารถเพิ่มพื้นที่ของวัสดุได้สามารถดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูได้ ดังนั้นการเตรียมวัสดุผสมระหว่าง  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของ  $\text{SiO}_2$  ได้

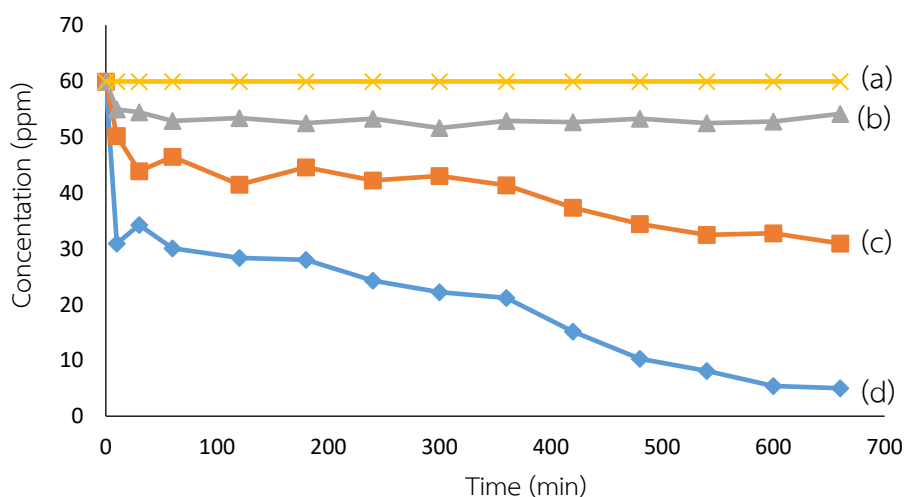
#### 4.5 ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู

##### 4.5.1 ทดลองภายใต้แสงอาทิตย์

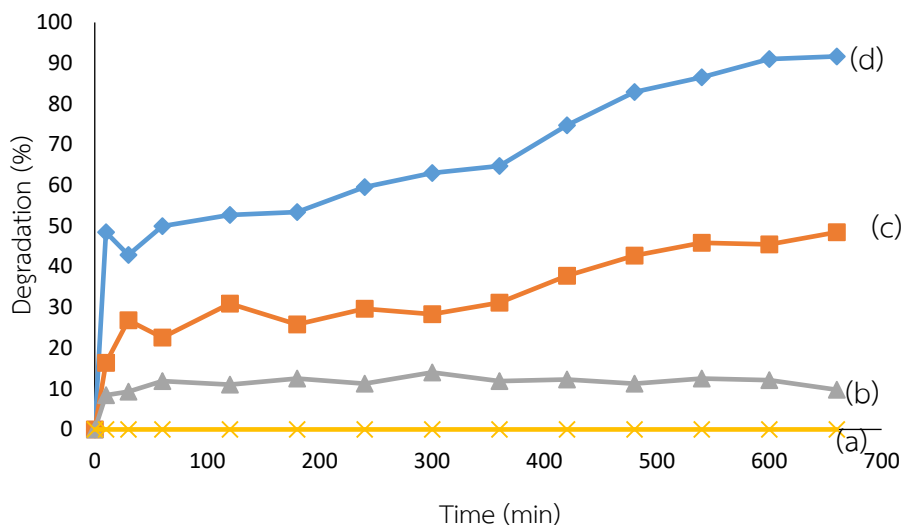
ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูที่เข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, และ 660 นาที ภายใต้แสงอาทิตย์ ได้ผลดังตารางที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ของ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ภายใต้แสงอาทิตย์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (ppm)				ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู (เปอร์เซ็นต์)		
	MB	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	59.93	59.93	59.93	59.93	0	0	0
10	59.93	54.92	50.17	30.92	16.36	8.45	48.45
30	59.93	54.41	43.89	34.26	26.84	9.30	42.89
60	59.93	52.87	46.45	30.03	22.57	11.87	49.94
120	59.93	53.38	41.45	28.36	30.91	11.01	52.72
180	59.93	52.48	44.53	27.97	25.77	12.51	53.37
240	59.93	53.25	42.22	24.25	29.62	11.23	59.57
300	59.93	51.59	42.99	22.20	28.34	14.01	62.99
360	59.93	52.87	41.32	21.17	31.12	11.87	64.70
420	59.93	52.61	37.34	15.14	37.75	12.30	74.76
480	59.93	53.25	34.39	10.26	42.67	11.23	82.88
540	59.93	52.48	32.46	8.08	45.88	12.51	86.52
600	59.93	52.74	32.72	5.39	45.45	12.08	91.01
660	59.93	54.15	30.929	5.00	48.45	9.73	91.65



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้แสงอาทิตย์เมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  (b),  $\text{TiO}_2$  (c), และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (d)



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลินบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆเมื่อเติม SiO<sub>2</sub> (b), TiO<sub>2</sub> (c) และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (d) ภายใต้แสงอาทิตย์

การทดลองเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm พบว่า สารละลายเมทิลินบลูเริ่มต้นที่เตรียมมีความเข้มข้นจริง 59.93 ppm เมื่อทำการทดลองภายใต้แสงอาทิตย์ สารละลายเมทิลินบลูที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นคงที่ที่ 59.93 ppm ดังภาพที่ 4.8 (a) แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและอยู่ภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 360 นาที เมทิลินบลูไม่มีการสลายตัว

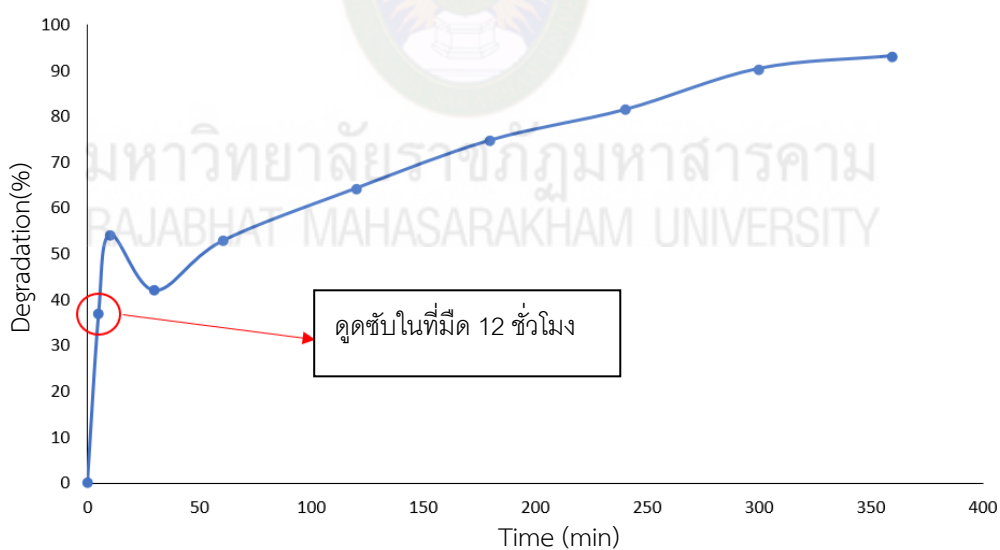
การทดสอบการสลายสีของสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm โดยใช้ SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 0.01 กรัม ทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600 และ 660 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การสลายสีเมทิลินบลูเริ่มคงที่ที่เวลา 660 นาที และ SiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลินบลู สูงสุดที่ร้อยละ 14.01 สารละลายสีเมทิลินบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 51.59 ppm ที่เวลา 300 นาที และ TiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลินบลูสูงสุดที่ร้อยละ 48.45 สารละลายสีเมทิลินบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 30.92 ppm และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลินบลูสูงสุดที่ 91.65 เปอร์เซ็นต์ สารละลายสีเมทิลินบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 5.00 ppm ที่เวลา 660 นาที ดังภาพ 4.8 และ 4.9 จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารละลายสีเมทิลินบลูในตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆที่ทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> สามารถสลายสีเมทิลินบลูได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าการสลายสารละลายสีเมทิลินบลูในช่วงเวลาเดียวกันกับในที่มืด ที่เวลา 360 นาที พบว่าวัสดุมีประสิทธิภาพในการสลายสีเมทิลินบลูได้มากขึ้นถึงร้อยละ 25.45 ดังภาพ 4.7 และ 4.9

#### 4.5.2 การดูดซับและทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์

ทำการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลินบลูที่เข้มข้น 60 ppm ของวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 0.01 กรัม โดยทำการดูดซับไว้ในที่มืดก่อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาศึกษาต่อภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู หลังดูดซับของ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลู(ppm)	ประสิทธิภาพการสลายสี เมทิลีนบลู(เปอร์เซ็นต์)
	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	59.93	0.11
ดูดซับในที่มีด 12 ชม.	37.98	36.68
10	27.46	54.22
30	34.77	42.03
60	28.36	52.72
120	21.43	64.27
180	15.14	74.76
240	11.16	81.39
300	5.77	90.37
360	4.10	93.15



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูที่เวลาต่างๆของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

การทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm โดยใช้  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  0.01 กรัม ทำการดูดซับในที่มีด 12 ชั่วโมงก่อนนำมาทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การสลายสีเมทิลีนบลูที่เวลา 360 นาที มีการสลายสีเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 93.15 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 4.10 ppm ดังภาพ 4.10 และ ตารางที่ 4.3 จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารละลายสี

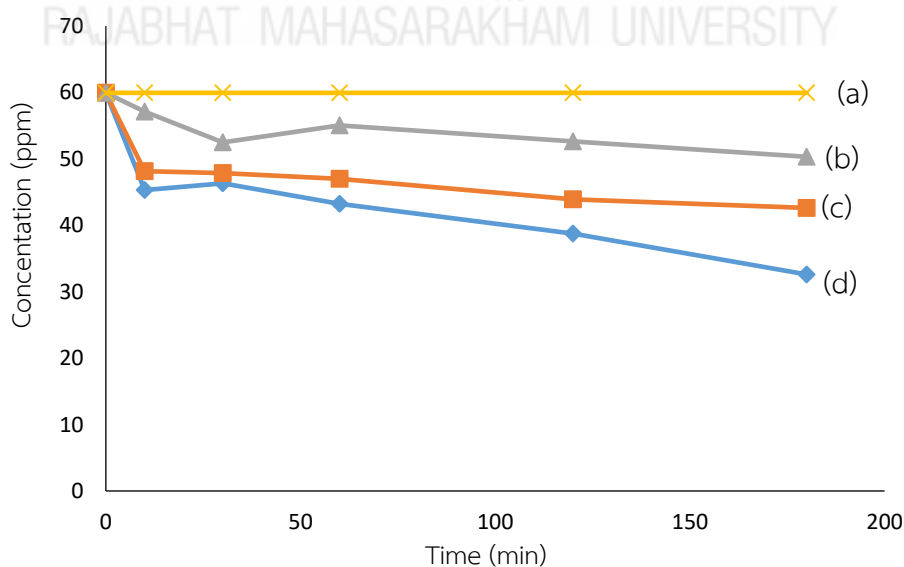
เมทิลีนบลูในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการดูดซับในที่มีด 12 ชั่วโมงก่อนมาทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  สามารถดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูได้เร็วขึ้น เมื่อเทียบเวลากับ เปอร์เซนต์การสลายตัวของสีเมทิลีนบลูภายใต้แสงอาทิตย์ ซึ่งจากผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การดูดซับของวัสดุผสมมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสง (binacian et al, 2017)

#### 4.5.3 ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้รังสียูวี

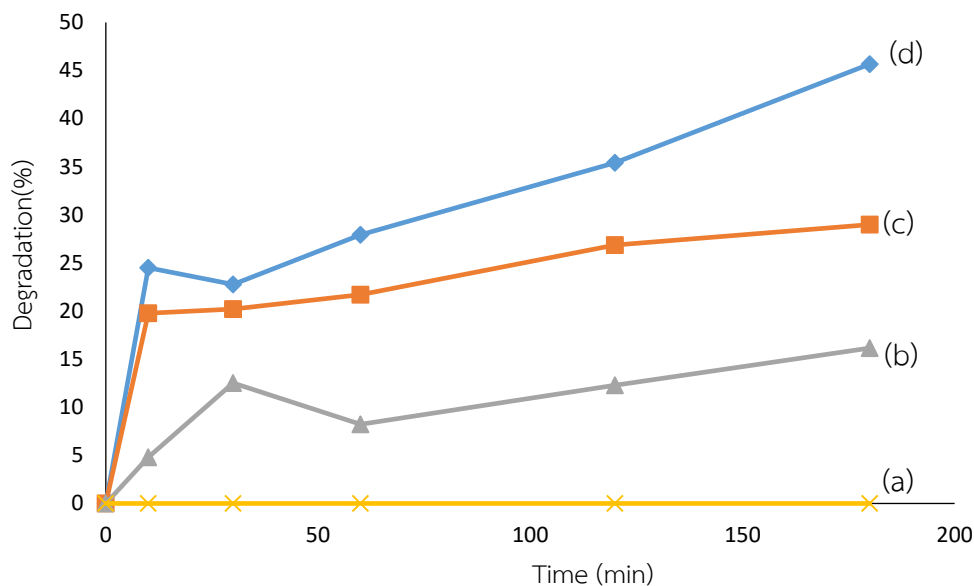
ทำการศึกษากการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูที่เข้มข้น 60 ppm ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ภายใต้รังสียูวี ดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู ของ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ภายใต้รังสียูวี

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (ppm)				ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู (เปอร์เซ็นต์)		
	MB	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$
0	59.93	59.93	59.93	59.93	0	0	0
10	59.93	57.11	48.13	45.30	19.79	4.82	24.50
30	59.93	52.49	47.87	46.33	20.22	12.52	22.78
60	59.93	55.06	46.97	43.25	21.71	8.24	27.92
120	59.93	52.62	43.89	38.76	26.85	12.30	35.40
180	59.93	50.31	42.61	32.60	28.99	16.15	45.67



ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้รังสียูวีเมื่อเติม  $\text{SiO}_2$  (b),  $\text{TiO}_2$  (c), และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (d)



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการสลายของสารละลายเมทิลีนบลู (MB) (a) ที่เวลาต่างๆภายใต้รังสียูวี เมื่อเติม SiO<sub>2</sub> (b), TiO<sub>2</sub> (c), และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (d)

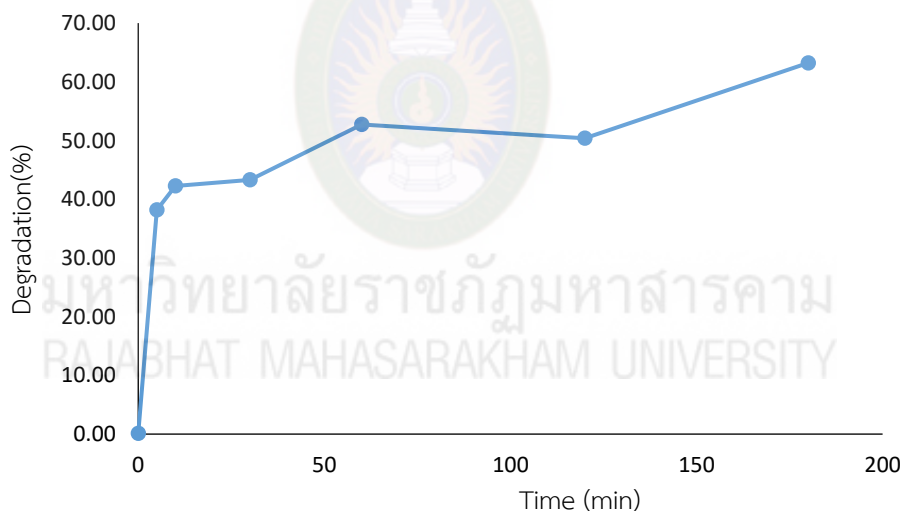
การทดสอบการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm โดยใช้ SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 0.01 กรัม ทำปฏิกิริยาภายใต้รังสียูวี ทำการทดลองที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที พบว่าร้อยละการสลายสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่เวลาทำการทดลองเวลา 180 นาที และ SiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู สูงสุดที่ร้อยละ 16.15 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 50.31 ppm TiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่ร้อยละ 28.99 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 42.61 ppm และ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูสูงสุดที่ร้อยละ 45.67 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 32.60 ppm ดังภาพ 4.11 และ 4.12 จากร้อยละการลดลงของสารละลายสีเมทิลีนบลูในตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่ทำปฏิกิริยาภายใต้รังสียูวี แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> สามารถดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูได้เพิ่มขึ้น โดยจากการเปรียบเทียบค่าการสลายสารละลายสีเมทิลีนบลูในช่วงเวลาเดียวกัน

#### 4.5.4 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ภายใต้รังสียูวี

ทำการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายเมทิลีนบลูที่เข้มข้น 60 ppm ของวัสดุผสม TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 0.01 กรัม โดยดูดซับในที่มืดก่อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำมาศึกษาต่อภายใต้รังสียูวี ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู หลังดูดซับของ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ สารละลาย เมทิลีนบลู(ppm)	ประสิทธิภาพการสลายสี เมทิลีนบลู(เปอร์เซ็นต์)		ค่า pH
		$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$	
0	59.93	0		6.84
ดูดซับในที่มีด 12 ชม.	37.08	38.18		9.20
	10	42.25		9.31
30	34.00	43.32		9.42
60	28.36	52.73		9.71
120	29.77	50.38		9.71
180	22.07	63.21		9.23



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

การทดสอบการสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 ppm โดยใช้  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  0.01 กรัม ที่นำไปสลายสารละลายเมทิลีนบลูและดูดซับในที่มีด 12 ชั่วโมง ก่อนทำปฏิกิริยาภายใต้แสงรังสียูวี ที่เวลา 0, 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที พบว่าร้อยละการสลายสีเมทิลีนบลู มีการสลายสีเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 63.21 สารละลายสีเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นลดลงเป็น 22.07 ppm ดังภาพ 4.13 และ ตารางที่ 4.7 จากร้อยละการลดลงของสารละลายสีเมทิลีนบลูในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดูดซับในที่มีด 12 ชั่วโมงก่อนมาทำปฏิกิริยาภายใต้รังสียูวี แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  สามารถดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูได้เร็วขึ้น เมื่อเทียบเวลากับร้อยละการสลายตัวของสีเมทิลีนบลูภายใต้รังสียูวีที่ไม่ได้ทำการดูดซับในที่มีดก่อน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาการเตรียมวัสดุผสม  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  โดยใช้สารตั้งต้น  $\text{SiO}_2$  จากกลบข้าว เพื่อใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการย่อยสลายเมทิลีนบลู สามารถสรุปผลการทดลองและมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ซิลิกาสามารถเตรียมได้จากการนำไปรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยนำซิลิกาจากกลบข้าวไปให้ความร้อนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ และสามารถนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตไปใช้ในการเตรียมวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกาจากกลบข้าวได้

จากการทดลองการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในที่มืดและภายใต้แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มข้น 60 ppm โดยใช้  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  0.01 กรัม ให้ผลดังนี้

1. ในที่มืดที่ความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลีนบลู 60 ppm พบว่า  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูร้อยละ 12.51, 23.21 และ 39.25 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ดีกว่า  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$

2. ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลีนบลู 60 ppm พบว่า  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูร้อยละ 14.01, 48.45 และ 91.65 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ดีกว่า  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{SiO}_2$  และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ดีกว่าในที่มืด

3. ภายใต้รังสียูวีความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลีนบลู 60 ppm พบว่า  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูร้อยละ 16.15, 28.98 และ 63.21 ตามลำดับ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำกลบข้าวที่เป็นสิ่งเหลือทิ้งมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาผลิตเป็นซิลิกาที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกาทั่วไปที่ขายตามท้องตลาด เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมได้

5.2.2 ซิลิกาจากกลบข้าวมีอนุภาคขนาดเล็กมาก เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย เมื่อเข้าสู่ปอดแล้วไม่สามารถกำจัดออกได้ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ดังนั้นการทำงานวิจัยกับซิลิกาต้องมีอุปกรณ์กันอย่างดี เช่น ต้องสวมหน้ากากที่สามารถในการกรองฝุ่นในขณะทำงานวิจัย

5.2.3 ควรมีการศึกษาปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงของวัสดุผสมในสารละลายสีชนิดอื่นๆที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย



## บรรณานุกรม

- กาญจนา ลือพงษ์. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติก ร่วมกับ กระบวนการดูดซับ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2553.
- เขมมาชาติ ศรีบุญข้า. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคอปเปอร์-นิกเกิล บนตัวรองรับ SBA-15 จาก เถ้าแกลบ เพื่อใช้ในการผลิตไดเมทิลคาร์บอนेट จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ เมทานอล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 2557.
- จตุพร วิทยาคุณ. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของพอลิบิวทิลีนอะดีเปทโคเทอเรบทาเลท คอมโพสิตที่เสริมแรงโดยซิลิกาจากแกลบ. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2558.
- จิตรดา ชูมี. การเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์สูงจากแกลบข้าวเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซีโอไลต์. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, 2554.
- จิรวรรณ พิจารณ์ วาสนา พันชน มิกิ กัณณะ สรรวดี สมนาม สัมพันธ์ วงศ์นาวา. การฟอกสีสารละลาย สีย้อมผสม (เมทิลีนบลูและเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน. วารสาร วิทยาศาสตร์บูรพา. ม.ค.-มิ.ย., หน้า 174 – 185 (2558).
- ชลดา อีรการุณวงศ์. โทเทเนียมไดออกไซด์วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย. สาขาวิชาเคมี ภาควิชา วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 2554.
- เชาวน์ ศรีเพชรดี. การศึกษาซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดรูพรุนที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบเพื่อ เสริมแรงในยางธรรมชาติโดยกระบวนการโซลเจล. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2553.
- ณัฐกฤตา บุญผ่องประกอบ. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไทเทเนียม ไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมี. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์, 2557. JABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์. คลินิกปุ๋ยสั่งตัดเกษตรกรสามารถลดต้นทุนการผลิตข้าวและข้าวโพดได้ด้วย ตนเอง. (ออนไลน์) เข้าถึงจาก [http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/10-clinic/tasnee\\_au/clinic\\_00.html](http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/10-clinic/tasnee_au/clinic_00.html). : 2554. (สืบค้นวันที่ 27 ธันวาคม 2554).
- தியานันท์ เจือกโ้วน. ผลของท่อนานาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดต่อสมบัติโฟโตคะ ตะไลซิสของ ไททาเนียมไดออกไซด์. นำเสนอในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับ บัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 34. วันศุกร์ที่ 27 มีนาคม 2558 ณ อาคารเรียนรวม คณะแพทย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 415-424. 2558.
- ธิดารัตน์ จิตเจเนสุวรรณ. Effect of vanadium addition on TiO<sub>2</sub> photocatalyst for catechol photodegradation. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.
- นงลักษณ์ มีทอง. นาโนซิลิกอนสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2557
- นพภาพร พานิช. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรมโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับศูนย์บริการ วิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.

- นฤตล สายใจอุบล. การวิเคราะห์ซีโอดีด้วยวิธีการโฟโตอิเล็กโทคะตะไลซิสโดยใช้วัสดุกิ่งตัวนำเป็น  
ตัวเร่งปฏิกิริยา. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2560.
- นัตตา เวชชากุล. การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์  
ที่เคลือบแล้วลอย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548
- นันทพร คงคะจันทร์. การหาลักษณะเฉพาะของซิลิกาบริสุทธิ์ จากแกลบที่ผ่านการปรับปรุง  
สมบัติด้วยกรด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. เม.ย.-มิ.ย., หน้า 159-166. 2556.
- นิตส์น ทิพย์โสตนัยนา. นาโนซิลิกาจากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เพล็กซ์โกราฟี  
บนกระดาษคราฟต์ขาว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2557
- นिसافر มุหะมัด. การดูดซับสีย้อมด้วยกากขา. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร  
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 2559.
- ป๋องเกียรติ ถากแก้ว. ผลของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการควบคุม  
โรคแอนแทรกซ์ของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองหลังการเก็บเกี่ยว.  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555
- พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์. การดูดซับสีย้อมด้วยผลิตภัณฑ์แกลบ. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- พินิจ เอี่ยมสะอาด จิตนภา ศิริรักษ์ สุธิณี เกิดเทพ ญัฐวรรณ วรวรรณโณทัย พัฒนาวีศว์ สว่างลาภ  
ฉันทนา วัณนิพิฐพงษ์ พรทิพย์ ชัยมณี สุพรรณณี ฉายะบุตร ชีวิตา สุวรรณชวลิต. การสังเคราะห์  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นสารดูดกลิ่นรังสียูวีเพื่อเพิ่มความคงทนแสงของผงสี  
ธรรมชาติ. วารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร. 3(5). 41-  
52. 2559
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. วัสดุรูปทรงคืออะไร. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- วิรัช เลิศพรหม. Hybrid materials...ยอดวัสดุธรรมชาติ. วารสารเชรามิกส์. ม.ค.-เม.ย., หน้า  
29 – 34. 2559.
- วีระชัย แสงฉาย. ผลของอุณหภูมิการเผาผงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปด้วยเหล็กต่อลักษณะ  
โครงสร้างและการฆ่าเชื้อ *Escherichia Coli*. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย  
ราชภัฏสงขลา, 2559.
- วัชรพล นันทอุบลการ และ ญัฐญา คุ่มทรัพย์. ผลของระยะเวลาการใช้คลื่นอัลตราโซนิกต่อสมบัติของ  
ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโตรเจน. วารสาร  
วิทยาศาสตร์บูรพา. 23(2). 2561.
- สรรรค์ จิตรไคร่คราญ. ทำความสะอาดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์  
วารสารกรมวิทยาศาสตร์, 21-24 (2557)
- สุดาพร ตั้งควนิช. การผลิตซิลิกาจากแกลบเพื่อใช้ในเทคนิคโครมาโทกราฟี.  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. 2550

- สุภาภรณ์ ดอกไม้ศรีจันทร์. การเตรียมซิลิกาเจลจากแกลบข้าวเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิทยาศาสตรและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, 2550.
- เสาวลักษณ์ บุญยอด. ปฏิกริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2558.
- อติพล สว่างอารมณ์. ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจืออนุภาพทองคำเพื่อใช้การย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการย่อยสลายตัวเชิงแสง. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2557
- อติวัฒน์ พรหมจันทร์ และ วัชรินทร์ เมฆลา. สมบัติของวัสดุโครงสร้างนาโนที่มีส่วนประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล. วารสารบัณฑิตวิทยาลัย พิษณุพนธ์ 9(1). 2557. 143-148.
- อภิพงษ์ พุดคำ. การพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนในระดับนาโนเมตร จากแกลบเพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2547
- อรสา อินทร์น้อย. การกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำบาดาลโดยใช้ซิลิกาจากแกลบข้าว. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, 2559.
- Binaeian, E., Tayebi, H-A. Rad, A.S. Paya, P. Surface modification of mesoporous silicate by tannin for immobilization of TiO<sub>2</sub> nanoparticles: Study of photocatalytic performance. Material Chemistry and Physics, 185(1), 14-23. 2018.
- Catauro, M., Bollino, F., Papale, F., Ferrare, C., Mustarelli, P. Silica-polyethylene glycol hybrids synthesized by sol-gel : Biocompatibility improvement of titanium implants by coating. Material Science and Engineering C55, 2015
- Catauro, M., Bollino, F., Papale, F., Ferrare, C., Mustarelli, P. Silica-polyethylene glycol hybrids synthesized by sol-gel : Biocompatibility improvement of titanium implants by coating. Material Science and Engineering C55, 2015.
- Haroun, A.A., Youssef, A.M. Synthesis and electrical conductivity evaluation of novel hybrid poly(methyl methacrylate)/titanium dioxide nanowires. Synthetic Metals 161(19-20), 2063-2069. 2011
- Huang, H., Leung, D.Y.C., Kwong, P.C.W., Xiong, J., Zang, L. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue under vacuum ultraviolet irradiation. Catalysis Today 201(1), 189-194. 2013
- Kim, Y.N., Shao, G.N., Jeon, S.J., Imran, S.M., Sarawade, P.B., Kim, H.T. Sol-gel synthesis of sodium silicate and titanium oxychloride based TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogels and their photocatalytic property under UV irradiation. Chemical Engineering Journal, 231, 502-511. 2013.

- Klapiszewski, Ł., Siwinska-Stefanska, K., Kolodynska, D. **Preparation and characterization of novel TiO<sub>2</sub> lignin and TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> lignin hybrids and their use as functional biosorbents of Pb(II).** Chemical Engineering Journal 314(15), 169-181. 2017
- Nakamura, K.J., Ide, Y., Ogawa, M. **Molecular reognitive photocatalytic decomposition on mesoporous silica coated TiO<sub>2</sub> particle.** Materials Lett. 65, 2011
- Norsuraya, S., Fazlena, H., Norhasyimi, R. **Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15).** Procedia Engineering. 148. 839-846. 2016.
- Patel, M., Karera, A. Prasanna, P. **Effect of Thermal and Chemical Treatment On Carbon and Silica Contents in Rice Husk.** J. Mater. Sci. 22: 2457-2464, 2003.
- Sandoval, A., Hernández-Ventura, C., Klimova, T.E. **Titanate nanotubes for removal of methylene blue dye by combined adsorption and photocatalysis.** Fuel 198, 2017
- Shao, G.N., Kim, Y., Imran, S.M., Jeo, S.J., Sarawade, P.B., Hiloga, A., Kim, J-K., Kim, H.T. **Enhancement of porosity of sodium silicate and titaniumoxychloride based TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> systems synthesized by sol-gel process and their photocatalytic activity.** Microporous and Mesoporous Materials, 179(15), 111-121, 2013.
- Yanyan, L., Kurniawan, T.A., Ying, Z., Albadarin, A.B., Walker, G. **Enhanced photocatalytic degradation of acetaminophen from waste water using WO<sub>3</sub> / TiO<sub>2</sub> / SiO<sub>2</sub> composite under UV-VIS irradiation.** Journal of Molecular Liquids, 243, 761-770. 2017.

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ นางสาวพัชราภรณ์ สกุล พิมพ์จันทร์

2. สังกัด คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

### 3. ประวัติการศึกษา

-ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ. เคมี) มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ. 2548

-ระดับประกาศนียบัตรบัณฑิตวิชาชีพครู (ป.บัณฑิต วิชาชีพครู) มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ. 2549

-ระดับปริญญาตรี นิติศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช พ.ศ. 2549

-ระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม. วิทยาศาสตร์ศึกษา) มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ. 2550

- ศึกษาวิจัยที่ Waseda University, Japan พ.ศ. 2555

-ระดับปริญญาเอก ปรัชญาดุสิตบัณฑิต (ปร.ด. เคมี) มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2557

### 4. ทนุการศึกษา

- 2540-2549 ทนุส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ของสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

- 2549-2552 ทนุ PERCH-CIC ของศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี

- 2553-2554 ทนุระดับปริญญาเอก โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (นาโน)

- 2554-2556 ทนุโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.)

### 5. ผลงานทางวิชาการ

- บรรณาธิการ หนังสือ การคำนวณจากสมการเคมี: ปริมาณสารสัมพันธ์ (พัชรี อินจินดาขจร. การคำนวณจากสมการเคมี: ปริมาณสารสัมพันธ์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2556.)

### 6. งานวิจัย และบทความวิชาการ

#### National publication:

1. P. Pimchan, “ควาร์ก (quark) สิ่งทีเล็กกว่าอะตอม” Rajabhat Maha Sarakham University Journal (2008) 18:351-358.

2. S. Thongthummachat, C. Srichooyong, W. Varin, P. Pimchan, Determination of Heavy Metals in Synthesized Dye following with Natural Colour Producing for Reed, Rajabhat Maha Sarakham University Journal (2012) 18:351-358.

3. Patcharaporn Pimchan, Nittaya Saesim. (2016). Effects of Saline Soils on Culms and Culm Strands of *Cyperus Corymbosus* Rottb. Naresuan University Journal: Science and Technology. 24(3). (TCI ฐาน 1, Thai-Journal Impact Factors 0.025)

4. พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์ (2558). การเพิ่มการติดสีและความคงทนของสีย้อมธรรมชาติ สำหรับเส้นใยจากกก. วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาส์น. 37(2). (TCI ฐาน 2, Thai-Journal Impact Factors 1.564)

#### International publication:

##### 1. Patcharaporn Pimchan, Nithima Khaorapapong and Makoto Ogawa.

Preparation of a series of group XIII metal quinolate complexes in natural and synthetic smectites. *Appl. Clay. Sci.* 2011, 54, 287.

##### 2. Nithima Khaorapapong, Patcharaporn Pimchan and Makoto Ogawa.

Formation of Mixed-Ligand Zinc(II) Complex-Montmorillonite Hybrids by Solid-Solid Reactions. *Dalton Trans.* 2011, 40, 5964.

##### 3. Patcharaporn Pimchan, Nithima Khaorapapong and Makoto Ogawa. 2014. In

situ complexation of 8- hydroxyquinoline and 4,4'- bipyridine with zinc(II) in the interlayer space of montmorillonite. *Appl. Clay. Sci.* 95. 310-316.

##### 4. Patcharaporn Pimchan, Nithima Khaorapapong and Makoto Ogawa. 2014. The

effect of cetyltrimethylammonium ion and type of smectites on the luminescence efficiency of bis(8-hydroxyquinoline)zinc(II) complex. *Appl. Clay. Sci.* 101.223-228.

#### งานวิจัย

- ผู้อำนวยการปี 2549 งานวิจัยการศึกษาสมบัติของดินบริเวณที่พบและไม่พบเห็ดธรรมชาติ บริเวณป่าชุมชนโคกหินลาด อำเภอบึงสามพัน จังหวัดมหาสารคาม

- ผู้ร่วมวิจัยปี 2554 งานวิจัยการศึกษาสมบัติของกกลม และผลิตภัณฑ์จากกกลมที่ปลูกในพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่แปลงสาธิตเกษตรทฤษฎีใหม่ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม

- ผู้ร่วมวิจัยปี 2555 งานวิจัยการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของต้นธูปฤาษีในพื้นที่ดินเค็มเพื่อการผลิตฝืนผ้า

- ผู้อำนวยการปี 2557 งานวิจัย ผลิตและศึกษากระบวนการย้อมกกจากธรรมชาติ

- ผู้อำนวยการปี 2558 งานวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ของการทำบรรจุภัณฑ์จากเยื่อกระดาษ ต้นธูปฤาษีในพื้นที่ดินเค็ม

- ผู้อำนวยการปี 2559 งานวิจัยศึกษาความเป็นไปได้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์โยอาหารเซลล์โลส จากกกและธูปฤาษีในดินเค็มเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

- ผู้อำนวยการปี 2560 งานวิจัยการส่งเสริมการเรียนรู้วิชาปฏิบัติการเคมี 1 เพื่อสร้างห้องเรียน อัจฉริยะสู่มหาวิทยาลัย 4.0