

สำนักวิทยบริการฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

วิทยานิพนธ์ งานวิจัย

MTA 197026

วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์
จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์

นางสาวอาภาพร กวพรรณ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

พ.ศ. 2562

สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

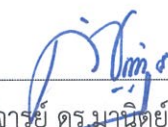



ใบอนุญาตวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

เรื่อง : วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอม
ในมอนต์มอริลโลไนต์

ผู้วิจัย : นางสาวอาภาพร ก้าวพรหม

ได้รับอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีศึกษา



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานิตย์ อัญญะโพธิ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล วรรณคำ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(อาจารย์ ดร.นุกูล กุดแกลง) ประธานกรรมการ


(อาจารย์ ดร.อารีพร เป้าอุฬาล) กรรมการ


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชราภรณ์ พิมพ์จันทร์) กรรมการ


(อาจารย์ ดร.พรพิมล พลคำ) กรรมการ

ชื่อเรื่อง : วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์
จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์

ผู้วิจัย : นางสาวอาภาพร ก้วพรหม

ปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีศึกษา)
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรภรณ์ พิมพ์จันทร์
ดร.พรพิมล พลคำ

ปีการศึกษา : 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ($\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$) อัตราส่วน TiO_2 ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy จากการวิเคราะห์คุณลักษณะ พบว่า TiO_2 มีโครงสร้างเป็นแบบอะนาเทส กระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของมอนต์มอริลโลไนต์ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู พบว่า วัสดุผสม $40\%\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้สูงสุดร้อยละ 99.95 ที่เวลา 240 นาที ซึ่งสูงกว่า TiO_2 แสดงให้เห็นว่า วัสดุผสม $40\%\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

คำสำคัญ : ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก การย่อยสลายเชิงแสง และวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Title : The Composite of Titaniumdioxide and Flavonoid extraction from
Banana peel into Montmorillonite

Author : Miss Arpaphon Kuaprom

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

Advisors : Assistant Professor Dr.Patcharaporn Pimchan
Dr.Phonpimon Ponkham

Year : 2019

ABSTRACT

In this research, the composites of titaniumdioxide and flavonoid extraction from banana peel into montmorillonite ($\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$) with varies the ratio of TiO_2 at 40, 50 and 60% by weight (40%, 50% and 60% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$) were synthesized by an easily-operated solid diffusion process. The composites were characterized and analyzed by X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), The characteristic analyzed reveal TiO_2 existence of anatase phases and distributed on the surface and in the interlayer of MMT. The photodegradation efficiencies of methyleneblue was found to the 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ composite can be decolourized of 99.95% at 240 min to exhibited higher photocatalytic than pure TiO_2 . From the observation indicating that the 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ composite has optimal photodegradation composite can be application to photocatalytic material

Keywords: Photocatalytic, Photodegradation and TiO_2/MMT nanocomposite

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชราภรณ์ พิมพ์จันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.พรพิมล พลคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.นุกูล กุดแกลง ประธานกรรมการสอบและอาจารย์ ดร.อารีพร เบ้าอุฬาล กรรมการสอบ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ และสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่คอยให้คำแนะนำ และการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน เมตตาอบรมสั่งสอน ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



นางสาวอาภาพร กั้วพรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

สารบัญ

หัวเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ค
ABSTRACT	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)	5
2.2 วัสดุนาโน (Nanomaterials)	7
2.3 วัสดุรูพรุน (Mesoporous material)	10
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	12
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorbtion)	15
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)	16
2.7 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic process)	21
2.8 เมทิลีนบลู (Methylene blue)	30
2.9 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	44
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	44
3.2 วัสดุและสารเคมี	45
3.3 การเตรียมสารละลาย	45

หัวเรื่อง	หน้า
3.4 วิธีการทดลอง	45
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุผสม	47
3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันเมทิลีนบลู	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	49
4.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)	49
4.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)	52
4.3 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	56
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลู	58
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก การเตรียมสารและการคำนวณ	82
ภาคผนวก ข ภาพการดำเนินกิจกรรม	85
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู	89
ประวัติผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดแบ่งประเภทของวัสดุพูนตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ	11
2.2 ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู	31
2.3 ความยาวคลื่นของฟลาโวนอยด์แต่ละชนิด	38
4.1 ตำแหน่งมุมของพีคและระนาบผลึกของ MMT, TiO ₂ , วัสดุผสม TiO ₂ /MMT และวัสดุผสม TiO ₂ &Fla/MMT โดยเทคนิค XRD	52
4.2 ความถี่และชนิดการสั่นพันธะของ MMT, TiO ₂ , วัสดุผสม TiO ₂ /MMT และวัสดุผสม TiO ₂ &Fla/MMT โดยเทคนิค FT-IR	56
4.3 ร้อยละการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO ₂ , MMT, วัสดุผสม TiO ₂ /MMT และวัสดุผสม TiO ₂ &Fla/MMT ภายในที่มีด	61
4.4 ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO ₂ , MMT, วัสดุผสม TiO ₂ /MMT และวัสดุผสม TiO ₂ &Fla/MMT ภายในแสงจากธรรมชาติ	64
4.5 ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO ₂ , MMT, วัสดุผสม TiO ₂ /MMT และวัสดุผสม TiO ₂ &Fla/MMT ภายในแสงยูวี	70

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ 13
2.2	การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแคทไอออนในดินกับแคทไอออนอื่น 14
2.3	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์: อนุภาค (ก) รูไทล์ (ข) และบรูคไคท์ (ค) 18
2.4	กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง 20
2.5	กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 23
2.6	สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู 30
2.7	กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิลีนบลู 32
2.8	โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์ 32
2.9	การสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์ 33
2.10	สูตรโครงสร้างของสาร Flavonoids 37
4.1	XRD patterns ของ MMT(a), TiO ₂ (b), 40%TiO ₂ /MMT(c), 50%TiO ₂ /MMT(d) และ 60%TiO ₂ /MMT(e) 50
4.2	XRD patterns ของ MMT(a), TiO ₂ (b), 40%TiO ₂ &Fla/MMT(c), 50%TiO ₂ &Fla/MMT(d) และ 60%TiO ₂ &Fla/MMT(e) 51
4.3	FT-IR patterns ของ MMT(a), TiO ₂ (b), 40%TiO ₂ /MMT(c), 50%TiO ₂ /MMT(d) และ 60%TiO ₂ /MMT(e) 54
4.4	FT-IR patterns (A) ช่วง 600 – 4000 cm ⁻¹ และ (B) ขยายช่วง 1200 – 1800 cm ⁻¹ ของ MMT(a), TiO ₂ (b), 40%TiO ₂ &Fla/MMT(c), 50%TiO ₂ &Fla/MMT(d) และ 60%TiO ₂ &Fla/MMT(e) 55
4.5	SEM แสดงลักษณะ MMT(a), TiO ₂ (b), 40%TiO ₂ /MMT(c), 50%TiO ₂ /MMT(d), 60%TiO ₂ /MMT(e), 40%TiO ₂ &Fla/MMT(f), 50%TiO ₂ &Fla/MMT(g), 60%TiO ₂ &Fla/MMT(h) 57
4.6	การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40%TiO ₂ /MMT(a), 50%TiO ₂ /MMT(b) และ 60%TiO ₂ /MMT(c) ภายในที่มีด 58
4.7	การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40%TiO ₂ &Fla/MMT(a), 50%TiO ₂ &Fla/MMT(b) และ 60%TiO ₂ &Fla/MMT(c) ภายในที่มีด 59

ภาพที่	หน้า
4.8	เปรียบเทียบการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2 /MMT(c) และ 40% TiO_2 &Fla/MMT(d) ภายในที่มีด 60
4.9	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40% TiO_2 /MMT(a), 50% TiO_2 /MMT(b) และ 60% TiO_2 /MMT(c) ภายในแสงจากธรรมชาติ 62
4.10	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40% TiO_2 &Fla/MMT(a), 50% TiO_2 &Fla/MMT(b) และ 60% TiO_2 &Fla/MMT(c) ภายในแสงจากธรรมชาติ 62
4.11	เปรียบเทียบการย่อยสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2 /MMT(c) และ 40% TiO_2 &Fla/MMT(d) ภายในแสงจากธรรมชาติ 63
4.12	การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย MMT ก่อนทำปฏิกิริยา(a), MMT หลังทำปฏิกิริยา(b), TiO_2 /MMT ก่อนทำปฏิกิริยา(c), TiO_2 /MMT หลังทำปฏิกิริยา (d), TiO_2 &Fla/MMT ก่อนทำปฏิกิริยา(e) และ TiO_2 &Fla/MMT หลังทำปฏิกิริยา(f) 65
4.13	กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 &Fla/MMT 67
4.14	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40% TiO_2 /MMT(a), 50% TiO_2 /MMT(b) และ 60% TiO_2 /MMT(c) ภายในแสงยูวี 68
4.15	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40% TiO_2 &Fla/MMT(a), 50% TiO_2 &Fla/MMT(b) และ 60% TiO_2 &Fla/MMT(c) ภายในแสงยูวี 69
4.16	เปรียบเทียบการย่อยสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2 /MMT(c) และ 40% TiO_2 &Fla/MMT(d) ภายในแสงยูวี 70
ข.1	ซังไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัม นำไปอบไล่ความชื้น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 86
ข.2	เผาไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 86
ข.3	จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน เฟสอานาเทส 86
ข.4	กวนวัสดุผสม TiO_2 /MMT เป็นเวลา 30 นาที 87
ข.5	เผาวัสดุผสม TiO_2 /MMT ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 87
ข.6	วัสดุผสม TiO_2 /MMT มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อน 87
ข.7	กวนวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 88
ข.8	เผาวัสดุผสม TiO_2 /MMT ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 88
ข.9	วัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม 88
ค.1	การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในแสงธรรมชาติ 90

ภาพที่	หน้า
ค.2 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในที่มีด	90
ค.3 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในแสงธรรมชาติ	90
ค.4 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในที่มีด	91
ค.5 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 /MMT ในแสงธรรมชาติ	91
ค.6 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 /MMT ในที่มีด	91
ค.7 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2 /MMT ในแสงธรรมชาติ	92
ค.8 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2 /MMT ในที่มีด	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้สีย้อมมีแนวโน้มในการขยายตัวมากขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และกรรมวิธีต่าง ๆ ในเชิงอุตสาหกรรม การขยายตัวของเมืองและการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดมลพิษอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญ ได้แก่ ของเสียที่ปล่อยออกมานั้นมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และสีย้อม ซึ่งจัดเป็นของเสียที่อันตรายและเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ต่อผู้พบเห็น หากไม่มีการกำจัดที่ถูกต้อง อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายของการลงทุนในการบำบัดน้ำเสียมีราคาค่อนข้างสูง เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษซึ่งจะต้องใช้เงินลงทุนสูงมากถึง 500 ล้านบาท (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539)

สีย้อมส่วนใหญ่จะไม่สลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีชีวภาพยังไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเกิดเป็นปัญหาภาวะมลพิษทางน้ำซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ปัจจุบันมีการรายงานวิธีการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโดยอาศัยหลักการดูดซับของสาร (adsorption) การเตรียมออร์แกนอมอนต์มอริลโลไนต์โดยดัดแปลงมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโคซาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับย้อมประเภทสีรีแอคทีฟเรด และอาศัยหลักการการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalytic degradation) โดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

แร่ดินเหนียว (clay mineral) จัดเป็นวัสดุอนินทรีย์และมีลักษณะเป็นแผ่นวางเรียงซ้อนกัน โดยมีขนาดต่ำกว่า 2 ไมครอน จึงทำให้วัสดุกลุ่มนี้มีพื้นที่ผิวสูงมากเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์, นันทนา จิรธรรมนุกุลและนริศรา กุลปรีชานันท์, 2550) โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวประกอบด้วยไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminium silicate) เหล็ก (iron) แมกนีเซียม (magnesium) และไอออนของโลหะอัลคาไลน์ (alkali cation ; Na^+ , Li^+ และ Ca^{2+}) แร่ดินเหนียวสามารถดูดซับน้ำได้สูง (อัญชลี สุทธิประการ, เอิบ เขียวรีนรมย์และสมศรี วัชรสินธุ์, 2534) แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) เป็นแร่ดินเหนียวซึ่งได้รับความนิยมในการนำมาใช้ทำวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตมากที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้างพิเศษกว่าแร่ชนิดอื่น โดยมีลักษณะ

โครงสร้างเป็นชั้นเรียงซ้อนกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของซิลิกาและชั้นของอะลูมินาที่เรียงซ้อนทับกัน มีลักษณะคล้ายแซนวิช (sandwich) และเนื่องจากชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์มีความหนาเพียง 1 นาโนเมตร และความกว้างประมาณ 1000 เท่าของความหนา จึงมีอัตราส่วนของชั้นระหว่างความกว้างต่อความหนา (aspect ratio) สูงมากจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ชัดเจน พื้นที่ผิวจำเพาะสูง ดูดซับได้ดี ราคาถูก และพบในประเทศไทย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นหนึ่งในบรรดาวัสดุที่สามารถสังเคราะห์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ และจัดเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเด่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalysts) ถูกนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม (ฉลาด บรรเทาและชุสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม, 2548) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีคุณสมบัติที่ตีเยียม (นัตดา เวชชากุล, 2555) มีเสถียรภาพทางเคมีสูง ไม่สลายตัวในสภาวะแสง ไม่เป็นพิษและมีราคาถูก ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการบำบัดน้ำเสีย (ศศิมา จันสุ, 2556) อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากสารเกิดการรวมตัวกันและพบปัญหาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ การพัฒนาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง TiO_2 ในรูปของแร่ดินจึงเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากแร่ดินมีโครงสร้างเป็นชั้นซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับ (จักรกฤษณ์ อัมพูช, 2548) สามารถช่วยในการกระจายตัวและควบคุมขนาดของอนุภาค TiO_2 ได้ ดังนั้น การสังเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดี เนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ (Kameshima, Tamura, Nakajima, and Okada, 2009)

ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) คือสารประกอบกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenolic compounds) ออกฤทธิ์ทางชีวภาพถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดรักษาทางการแพทย์ในด้านต่างๆ มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (reactive oxygen species : ROS) สารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์สามารถพบและสกัดแยกได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น เปลือกกล้วยหอม (พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์และลัดดาวัลย์ จำเริญพัฒน์, 2547) ซึ่งเป็นพืชที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี โดยทำหน้าที่เป็นสารรีดอกซ์ให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้สารฟลาโวนอยด์จึงได้รับความสนใจนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

งานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง (Hui Liang et al., 2017) ร่วมกับสารประกอบฟลาโวนอยด์ที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอม เพื่อประยุกต์ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเชิงแสง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์เตรียมได้ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็งได้

1.3.2 วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูแตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 เตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเทคนิค XRD, FT-IR และ SEM

1.4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ (ช่วงเวลา 09.00 -16.00 น.) ที่มีเม็ดและแสงยูวี ด้วยเทคนิค UV-vis spectrophotometry

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 สามารถเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์

1.5.2 พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลินบลูเชิงแสง



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับหัวข้อ ดังนี้

1. นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology)
2. วัสดุนาโน (nanomaterials)
3. วัสดุรูพรุน (mesoporous material)
4. มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)
5. กระบวนการดูดซับ (adsorbtion)
6. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide)
7. กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalytic process)
8. เมทิลีนบลู (methylene blue)
9. ฟลาโวนอยด์ (flavonoids)
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

ความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นำมาซึ่งความสะดวกสบาย และความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นของมนุษย์ในหลายด้าน เช่น การใช้ประโยชน์ในการขนส่ง การเดินทาง หรือการติดต่อสื่อสาร เป็นผลมาจากการคิดค้น และพัฒนาของมนุษย์ทั้งสิ้น ทำให้สังคมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากสังคมเกษตรกรรมสู่สังคมอุตสาหกรรม จากการผลิตเพียงเพื่อการดำรงชีพ มุ่งสู่การผลิตเพื่อการค้า และจากยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม สู่ยุคของนาโนเทคโนโลยี ในปัจจุบัน ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ เป็นหน่วยงานส่งเสริมการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทย ให้นิยามที่ครอบคลุมว่า นาโนเทคโนโลยี คือเทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งนำเอาองค์ความรู้เกี่ยวกับวิทยาการมาใช้สำหรับสร้างควมคุม หรือสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร และผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กมากหรือเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ส่งผลให้

โครงสร้างของวัสดุที่ถูกสร้างมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้น ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ที่ใช้สอยได้ (วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, 2548) นาโนเทคโนโลยีจึงถูกคาดการณ์ว่าเป็นเทคโนโลยีแห่งการผลิตในอนาคต เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทุกอุตสาหกรรม ช่วยให้เกิดการค้นพบวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งเป็นรากฐานของอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ที่ไม่เคยมีมาก่อน ช่วยยกระดับหรือเพิ่มมูลค่าอุตสาหกรรมที่มีอยู่เดิมและริเริ่มอุตสาหกรรมใหม่ (ศุภย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2560) นาโนเทคโนโลยีจึงได้ให้ความสำคัญแก่กระบวนการเตรียมหรือการใช้เทคโนโลยีในช่วงแรก โดยเริ่มจากการควบคุมแต่ละโมเลกุล หรืออะตอม ที่ส่งผลต่อการประกอบหรือการรวมตัวกันเกิดเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ ทำให้นาโนเทคโนโลยีมีความพิเศษ คือ เป็นเทคโนโลยีที่มีความเฉพาะเจาะจง สามารถควบคุมการทำงานของวัสดุหรืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ ทั้งในด้านเคมีและฟิสิกส์อย่างมีประสิทธิภาพ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2561)

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีถูกนำมาพัฒนาควบคู่กับการพัฒนาในด้านอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ และเทคโนโลยีสารสนเทศ จึงอาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ต้องพึ่งพาหรือเติมเต็มซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น การตัดต่อสังเคราะห์โปรตีน การสร้างนวัตกรรมเครื่องจักรนาโนเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับทางชีววิทยา (biosensor) การสังเคราะห์วัสดุเลียนแบบธรรมชาติเพื่อการสร้างเนื้อเยื่อเทียม (biomimetic materials) การสร้างตัวขนส่งยานาโน (nano-drug delivery) วัสดุและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นาโน (nanoelectronics) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำงานและเก็บข้อมูล โดยสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการเก็บข้อมูลและพลังงานน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีเครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ที่มีสมรรถนะสูงและมีขนาดเล็ก การพัฒนาระบบจอภาพสารอินทรีย์เรืองแสง (Organic Light Emitting Diode : OLED) (วรรณพงษ์ เตรียมโพธิ์, 2553)

กล่าวได้ว่า นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีแห่งอนาคตที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมระดับโลก เนื่องจากนาโนเทคโนโลยีทำให้มนุษย์สามารถจัดระเบียบโมเลกุลและอะตอมได้นาโนเทคโนโลยีจึงเปรียบเสมือนเทคโนโลยีที่ช่วยขับเคลื่อนการวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดเป็นอุตสาหกรรมต่างๆ แม้ปัจจุบัน จะมีผลิตภัณฑ์นาโนออกสู่ตลาด แต่ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นเพียงแค่ผลผลิตของการพัฒนานาโนเทคโนโลยีในยุคเริ่มต้นเท่านั้น เป็นเทคโนโลยีในการเติมอนุภาคนาโนลงในผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต เช่น การเคลือบอนุภาคนาโนของเงินเพื่อกำจัดแบคทีเรีย การเติมท่อนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ แต่ในอนาคตอีก 5-10 ปี ข้างหน้าเรา จะเห็นการสังเคราะห์และการประกอบวัสดุโครงสร้างระดับนาโนที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยอาศัยหลักการเทคโนโลยีตรวจวัด (sensor) และเทคโนโลยีหุ่นยนต์ (robotics) รวมถึงการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เข้ากับโครงข่ายประสาทและในอนาคตข้างหน้านักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่าจะมีการ

พัฒนาหุ่นยนต์นาโนที่มีความสามารถประกอบตัวเองได้ (self-assembly) และมีความสามารถจำลองตัวเองได้ (replication) (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553)

2.2 วัสดุนาโน (Nanomaterials)

วัสดุนาโน เป็นวัสดุที่สังเคราะห์จากการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันอย่างแน่นหนาในช่วงขนาด 1-100 นาโนเมตร (1 นาโนเมตรมีขนาดเท่ากับ 1 ส่วนพันล้านส่วนของเมตร หรือเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมประมาณ 1 แสนเท่า) โดยที่สมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของวัสดุจำพวกนี้ เช่น การนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล สมบัติทางแม่เหล็ก จะแตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับที่เราคุ้นเคย และเนื่องจากวัสดุนาโนถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันอย่างถูกต้องแม่นยำจึงทำให้วัสดุนาโนจัดเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างสมบูรณ์แบบที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.1 โครงสร้างนาโน (Nanostructures)

โดยทั่วไปจะแบ่งโครงสร้างนาโนได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

2.2.1.1 ระบบศูนย์มิติ (zero-dimensional systems) คือ วัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร เช่น กลุ่มก้อนผลึกโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร เช่น อนุภาคนาโน (nanoparticles) หมุดควอนตัม (quantum dots)

2.2.1.2 ระบบหนึ่งมิติ (one-dimensional systems) คือ วัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสองมิติ ถูกจำกัดขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตรแต่มิติที่เหลืออีกหนึ่งมิติไม่ถูกจำกัดขนาด ตัวอย่างเช่น ลวดนาโน (nanowires) แท่งนาโน (nanorods) เข็มขัดนาโน (nanobelts) ริบบิ้นนาโน (nanoribbons) หรือท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่มีความยาวความยาวของท่ออยู่ในระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร

2.2.1.3 ระบบสองมิติ (two-dimensional systems) คือ วัสดุหรือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพหนึ่งมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตร แต่มิติที่เหลืออีกสองมิติไม่ถูกจำกัดขนาด เช่น แผ่นนาโน (nanosheets) ฟิล์มบางในระดับนาโน (nano-thin film) ที่เกิดจากการประกอบตัวเองของอะตอมหรือโมเลกุล เป็นต้น รูปแบบโครงสร้างนาโนที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการ กับสถานะเงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน

2.2.2 คุณสมบัติบางประการของวัสดุนาโน

วัสดุนาโน (Nanomaterials) เป็นวัสดุที่นักวิจัย ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากศักยภาพของวัสดุนาโนที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยผ่านโครงสร้างระดับอะตอมเป็นตัวควบคุมสมบัติของวัสดุนาโน ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

2.2.2.1 คุณสมบัติเชิงแสง

การที่วัสดุนาโนมีขนาดเล็กจนมีขนาดเพียงไม่กี่นาโนเมตร จะส่งผลให้สัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่ในบริเวณผิวหน้า (surface) และบริเวณผิวสัมผัส (interface) ของวัสดุเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำของวัสดุนาโนจะมีสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง แต่จะมีค่าได้อย่างจำเพาะเท่านั้น ลักษณะนี้เรียกว่า ควอนไทเซชัน (quantization) การเกิดควอนไทเซชันของสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดสมบัติและปรากฏการณ์ใหม่ ยกตัวอย่าง เช่น การแสดงผลของปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขังไว้ (quantum confinement effect) อิทธิพลของอิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron effect) การปิดกั้นแรงระหว่างประจุไฟฟ้า (Coulomb blockade) รวมไปถึงการกักขังเอ็กซิตอน (exciton confinement) ปรากฏการณ์การขยับเคลื่อนของสเปกตรัม (spectrum shift) ควอนไทเซชันของโฟนอน (phonon quantization) เป็นต้น (ศุภกร ภูเก็ท, 2549) นอกจากนี้การทำให้ขนาดอนุภาควัสดุนาโนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบมากจะเกิดปรากฏการณ์เชิงแสงที่เรียกว่า เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance : SPR) เนื่องจากอนุภาคนาโนของสารดูดกลืนสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างจากอนุภาคเดิม เช่น ทองคำแท่ง โดยทั่วไปจะมองเห็นเป็นสีเหลือง แต่เมื่อมีขนาดอนุภาคนาโนจะมองเห็นเป็นสีแดงทับทิม เนื่องจากอนุภาคนาโนของทองคำนั้นดูดกลืนสเปกตรัมของแสงในช่วงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร)

2.2.2.2 ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

วัตถุที่มีขนาดในระดับนาโนจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วัตถุที่มีขนาดระดับนาโนมีจำนวนอะตอมอยู่บริเวณผิวหน้าสูงมาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่ายมากขึ้นและยังเอื้อต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากความเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบริเวณผิวหน้าของวัตถุ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีความชุ่มกลายเป็นใส (ทองแดงนาโน) สารเฉื่อยที่เกิดปฏิกิริยาได้ยากสามารถกลายเป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง (ทองคำขาวนาโน) สารที่มีความเสถียรกลายเป็นติดไฟได้ง่าย (อะลูมิเนียมนาโน) ของแข็งกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (ทองคำนาโน) และสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้ากลายเป็นสารนำไฟฟ้า (ซิลิคอนนาโน)

2.2.2.3 ความแข็งและความแข็งแรง

วัสดุโลหะและเซรามิกที่มีขนาดเกรน (grain size) ในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งแรงและทนทานต่อการแตกหักสูงมากกว่าวัสดุชนิดเดียวกัน ที่มีขนาดเกรนระดับไมโครเมตรหรือที่ใหญ่กว่า เช่นเดียวกันกับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกในระดับนาโนจะมีความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าโลหะที่มีขนาดผลึกใหญ่ มีสมบัติในการต้านทานกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น มีความจุความร้อนจำเพาะมากขึ้น สามารถขยายตัวได้ดีมากขึ้นกว่าเดิม ตัวอย่างเช่นโลหะทองแดงที่มีขนาดเกรนในระดับนาโนเมตรจะมีความแข็งแรงสูงกว่าทองแดง ปกติถึง 5 เท่า หรืออนุภาคระดับนาโนเมตรของอะลูมิเนียมส่งผลให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมนาโนมีความเหนียวและแข็งแรงกว่าอะลูมิเนียมในขนาดปกติ

2.2.3 ประเภทของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนสามารถแบ่งย่อยออกเป็นหลายกลุ่ม โดยที่ในแต่ละกลุ่มก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้สอยได้อย่างมากมาย โดยที่กลุ่มของวัสดุนาโนที่มีความสำคัญและกำลังได้รับความนิยมอย่างมากอยู่ในขณะนี้ ประกอบด้วยประเภทต่างๆ ดังนี้

2.2.3.1 วัสดุผสมนาโน (nanocomposites) เป็นวัสดุนาโนที่เกิดจากการเติมอนุภาคนาโนของสารต่างๆเข้าไปในเนื้อของวัสดุหยาบ (bulk materials) อาทิเช่น พอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหยาบให้ดียิ่งขึ้น เช่น ทนความร้อน ป้องกันการติดไฟ เสริมความแข็งแรง เพิ่มความยืดหยุ่นและการนำไฟฟ้า เป็นต้น ในปัจจุบันนี้ วัสดุผสมนาโนที่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ก็คือ เคลย์/วัสดุผสมนาโนโพลิเมอร์ (clay/polymernanocomposites) ซึ่งเป็นการผสมอนุภาคนาโนของแร่ดินเหนียว เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ในเนื้อของโพลิเมอร์ เพื่อใช้ในการสร้างชิ้นส่วนรถยนต์และเครื่องบินที่แข็งแรงขึ้นแต่น้ำหนักเบาลง ใช้เป็นสารสำหรับเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนและรอยขีดข่วน ใช้ประดิษฐ์เซ็นเซอร์แบบฟิล์มบาง ใช้เป็นฟิล์มเรืองแสงและอุปกรณ์เชิงแสง ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ และใช้เป็นวัสดุพิเศษสำคัญในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปูนซีเมนต์ ในทอมของนาโนคอมโพสิตนั้นเป็นการอธิบายลักษณะของวัสดุ 2 เฟส โดยที่เฟสหนึ่งเข้าไปกระจายตัวอยู่ในอีกเฟสหนึ่งในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ซึ่งโดยปกติแล้ว วัสดุนาโนคอมโพสิตที่เป็นพอลิเมอร์จะนิยมเสริมแรงด้วย nanofibers ชนิดต่างๆ ตัวอย่างเช่น precipitated silica, silica, cellulose, whiskers, zeolites เป็นต้น

2.2.3.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายท่อกลวงที่เกิดจากการเชื่อมโยงของอะตอมคาร์บอนเป็นตาข่ายหกเหลี่ยม ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นกว่าวัสดุอื่นๆ คือมีความแข็งแรงสูงมาก และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 2,800 องศาเซลเซียส สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง 1,000 เท่า นำความร้อนได้ดีกว่าเพชรสองเท่า นำไปใช้เสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุและอุปกรณ์

สามารถนำไปทำเป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นไดโอดที่ใช้ในจอภาพรุ่นใหม่ ๆ และสามารถผลิตเป็นอุปกรณ์จัดเก็บและลำเลียงก๊าซไฮโดรเจนเพื่อประโยชน์ในการสร้างเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

2.2.3.3 อนุภาคนาโน (nanoparticles) อนุภาคนาโนเป็นวัสดุขนาดกลุ่มหนึ่งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมหลายร้อยอะตอม หรือโมเลกุลหลายร้อยโมเลกุล โดยที่สมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคนาโนเหล่านี้จะแตกต่างไปจากวัสดุขนาดใหญ่ที่เป็นวัสดุประเภทเดียวกันอย่างสิ้นเชิง อนุภาคนาโนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับสมบัติของอนุภาคนั้นๆ เช่น อนุภาคนาโนของทอง มีประโยชน์มากทางการสังเคราะห์ชั้นเดี่ยวประกอบตัวเอง (self-assembly monolayer) ที่ใช้ในนาโนเซ็นเซอร์ และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวตรวจวัดในอุปกรณ์เซ็นเซอร์ได้ อนุภาคนาโนของโฟโตคะตะลิสต์ (photocatalysts) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ซัลไฟด์ สามารถใช้เป็นส่วนผสมของครีมกันแดด กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง และส่วนประกอบของเซลล์สุริยะ

2.2.3.4 หมดควอนตัม (quantum dots) หมดควอนตัมมีขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตร โดยมีสมบัติทางเคมีและกายภาพอยู่ก้ำกึ่งระหว่างของแข็งและโมเลกุลขนาดเล็ก แต่ลักษณะเฉพาะของหมดควอนตัมก็คือ สมบัติเชิงแสง เนื่องจากหมดควอนตัมจะมีสีที่แตกต่างกันไปตามขนาดและส่วนประกอบของอนุภาค ที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะสถานะทางควอนตัมของอนุภาคเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค หมดควอนตัมสามารถดูดซับแสงและปลดปล่อยแสงออกมาได้รวดเร็ว สามารถนำไปใช้แทนสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent dyes) ที่ใช้ในการติดฉลากและย้อมสีเซลล์สิ่งมีชีวิตได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดไปเป็นวิธีการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถใช้หมดควอนตัมไปใช้เป็นไดโอดเปล่งแสงเลเซอร์ในอุปกรณ์โทรคมนาคมแบบไฟเบอร์ออปติก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ เช่น นาโนคอมพิวเตอร์แบบควอนตัมได้

2.3 วัสดุรูพรุน (Mesoporus materials)

วัสดุรูพรุน (porous materials) หรือตัวคัดแยกโมเลกุล (molecular sieve) ได้มีการนำวัสดุรูพรุนมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน นอกเหนือจากการใช้เพื่อเป็นตัวคัดแยกโมเลกุลแล้ว วัสดุรูพรุนยังสามารถนำไปใช้ในวัสดุประสมที่แตกต่างจากการเป็นตัวคัดขนาดของโมเลกุล เช่น เป็นตัวคะตะลิสต์ สารดูดซับเซ็นเซอร์ หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่าง

ประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry) หรือที่มีชื่อย่อว่า IUPAC โดยจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ไมโครพอร์ส (microporous) เป็นรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (mesoporous) เป็นรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร
3. แมคโครพอร์ส (macroporous) เป็นรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร

ขึ้นไป

สารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุรูพรุนมีอยู่มากมายหลายประเภท โดยสามารถจัดแบ่งได้ตามองค์ประกอบที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น เป็นวัสดุรูพรุนที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ซึ่งในกลุ่มของวัสดุรูพรุนที่เป็นสารอนินทรีย์ยังแบ่งได้เป็นกลุ่มวัสดุรูพรุนที่เป็นโลหะกับกลุ่มวัสดุรูพรุนที่เป็นอโลหะ สำหรับกลุ่มวัสดุรูพรุนที่เป็นอโลหะนั้นส่วนมากจะเป็นกลุ่มเซรามิกส์และพอลิเมอร์ การจัดแบ่งประเภทของวัสดุรูพรุนตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

การจัดแบ่งประเภทของวัสดุรูพรุนตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ

ประเภทของสาร	พอลิเมอร์	คาร์บอน	กระจก	อะลูมิเนียมซิลิเกต	ออกไซด์	โลหะ
ขนาดรูพรุน	เมโซ-แมโคร	ไมโคร-เมโซ	เมโซ-แมโคร	ไมโคร-เมโซ	ไมโคร-เมโซ	เมโซ-แมโคร
พื้นที่ผิว	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความพรุน	>0.6	0.3-0.6	0.3-0.6	0.3-0.7	0.3-0.6	0.1-0.7
ความสามารถในการแพร่ผ่าน	ต่ำ-ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ต่ำ-ปานกลาง	สูง
ความแข็งแรง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ-ปานกลาง	สูง
ฉนวน	ต่ำ	สูง	ดี	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง-สูง	สูง
ทนต่อสารเคมี	ต่ำ-ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูงมาก	สูง
ราคา	ต่ำ	สูง	สูง	ต่ำ-ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
อายุ	สั้น	ยาว	ยาว	สั้น-ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก วัสดุรูพรุนคืออะไร (น. 60-69), โดย ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2554, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จากตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกประเภทของวัสดุรูพรุน ได้แก่ อะลูมิเนียมซิลิเกต ออกไซด์พอลิเมอร์ คาร์บอน กระจก และโลหะ ตาม IUPAC ซึ่งพบว่าในวัสดุรูพรุนประเภทที่เป็น คาร์บอน อะลูมิเนียมซิลิเกต และออกไซด์ ขนาดรูพรุนจะอยู่ในช่วงไมโครพอร์สจนถึงเมโซพอร์ส ส่วน กระจกพอลิเมอร์ และโลหะ จะมีขนาดรูพรุนที่อยู่ในช่วงตั้งแต่เมโซพอร์สถึงแมโครพอร์ส และถ้าหากพิจารณาจาก

พื้นที่ผิวหรือความพรุนของวัสดุแล้ว เมื่อขนาดรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีขนาดเล็กหรืออยู่ในช่วงเมโซพอร์สลงมาถึงไมโครพอร์สพบว่าพื้นที่ผิว หรือความพรุนของวัสดุรูพรุนจะมีค่าสูง ในทางตรงข้ามเมื่อขนาดของรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีขนาดใหญ่ หรืออยู่ในช่วงเมโซพอร์สขึ้นไปจนถึงแมโครพอร์ส พื้นที่ผิวหรือความพรุนของวัสดุรูพรุนจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหากพิจารณาถึงความสามารถในการแพร่ผ่านว่ามีค่าสูงหรือต่ำ ปัจจัยสำคัญอยู่ที่ขนาดรูพรุนของวัสดุ เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาตรที่ว่างในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุ โดยทั่วไปวัสดุรูพรุนจะมีความพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.95 และรูพรุนนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบแรกเป็นรูพรุนแบบเปิด โดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุ ส่วนแบบที่สองเป็นรูพรุนแบบปิด ซึ่งรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก ดังนั้นการนำวัสดุรูพรุนไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น เป็นตัวดูดซับ เป็นตัวคะตะลิสต์ และเซ็นเซอร์นั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะในวัสดุรูพรุนที่มีรูพรุนเป็นแบบเปิดเท่านั้น ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนแบบปิดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการเก็บเสียง เป็นฉนวนกันความร้อน หรือเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา ดังนั้น วัสดุรูพรุนจึงมีประโยชน์มากมายทั้งในงานทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

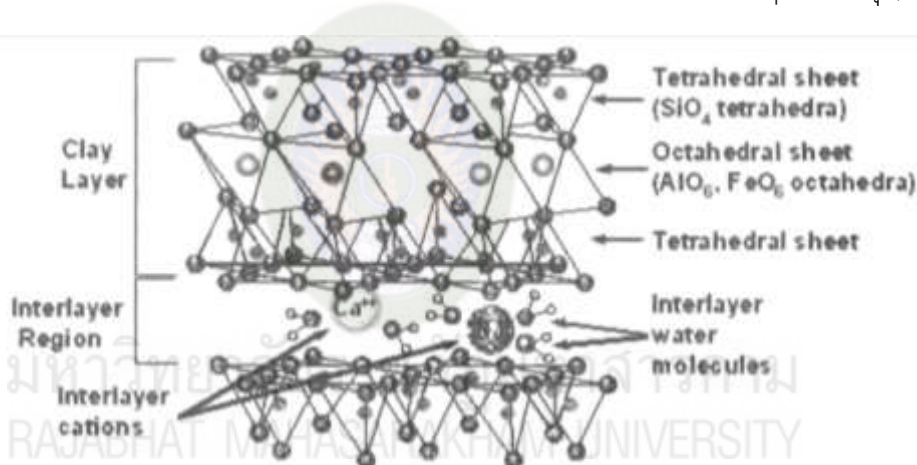
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นแร่ดินในกลุ่มสมекไทต์ มีสูตรโมเลกุล คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ โดยที่สัญลักษณ์ M คือ Monovalent cation และ x คือ degree of isomorphous substitution มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีลักษณะโครงสร้างซ้อนทับกัน ประกอบด้วยชั้น octahedral alumina และชั้น tetrahedral silicate โดยมีชั้นอะลูมินาอยู่ตรงกลางประกบบนล่างด้วยชั้นซิลิกา แต่ละชั้นมีความหนาเพียง 1 นาโนเมตร (สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์, 2550) และมีความยาวมากกว่าความหนา 1000 เท่า อะตอมในชั้นทั้งสองนี้จะเป็นอะตอมของออกซิเจน และในชั้นใกล้เคียงที่อยู่ติดกันพันธะที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรง ทำให้น้ำหรือโครงสร้างของแร่ดินเหนียวเกิดการขยายตัวในชั้น tetrahedral coordination และ silicon อาจถูกแทนที่โดย alumina หรือ phosphorus แต่ใน octahedral coordination อะลูมิเนียม นั้นอาจจะถูกแทนที่โดย แมกนีเซียม เหล็ก ลิเทียม โครเมียม ซิงค์ หรือแม้แต่ निकเกิล ความแตกต่างในการแทนที่กันภายใน lattice ในส่วนของตำแหน่งและชนิดของธาตุทำให้ มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นเคลย์ที่มีความหลากหลายมาก

2.4.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ในแต่ละชั้นดินจะประกอบไปด้วยแผ่น 3 แผ่น ซ้อนกัน ได้แก่ แผ่นซิลิกาที่มีรูปร่างของเซลล์หน่วยเป็นแบบทรงสี่หน้าจำนวน 2 แผ่น ประกบกับ

แผ่นของอลูมินา ที่มีรูปร่างของเซลล์หน่วยเป็นแบบทรงแปดหน้าแทรกอยู่ตรงกลาง เนื่องจากประจุสุทธิของชั้นดินเป็นประจุลบจึงเกิดการผลักกันระหว่างชั้นดินแต่ละชั้น จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นกันอยู่ระหว่างแต่ละชั้นดิน ประจุลบบนชั้นดินเกิดจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+}) สามารถเข้าไปแทนที่ซิลิกอนไฮดรอกไซด์ (Si^{4+}) ในแผ่นซิลิกา และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg^{2+}) หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ (Zn^{2+}) สามารถเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+}) ในแผ่นอลูมินาได้ แต่ออกซิเจนที่อยู่ล้อมรอบไฮดรอกไซด์เหล่านี้จัดเรียงตัวกันอย่างแน่นหนาจึงไม่สามารถขยับและไม่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮดรอกไซด์ได้ เมื่อเกิดการแทนที่ขึ้นมาก ๆ จะมีประจุลบเหลือมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประจุสุทธิของชั้นดินเป็นประจุลบ ส่งผลให้มีแรงผลักเกิดขึ้นเกิดเป็นช่องว่างระหว่างชั้นดินในธรรมชาติ เพื่อให้ประจุของแร่ดินมีความสมดุลจึงมีประจุบวก เช่น Na^+ Ca^{2+} และน้ำ มาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินเพื่อดุลกับประจุลบในชั้นดิน (ภาพที่ 2.1) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แร่ดินพองตัวเมื่อละลายอยู่ในน้ำ เพราะน้ำจะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นดินทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นดินขยายกว้างขึ้น (จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, 2548)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์. ปรับปรุงจาก การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์, โดย จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, 2548, นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกขยายถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก จึงเป็นที่รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น รวมถึงงานบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินเหนียวขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ ทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดของประจุได้ (อัญชลี สุทธิประการ, 2534)

2.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุของดิน (cation exchange)

2.4.2.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุของดิน (cation exchange process)

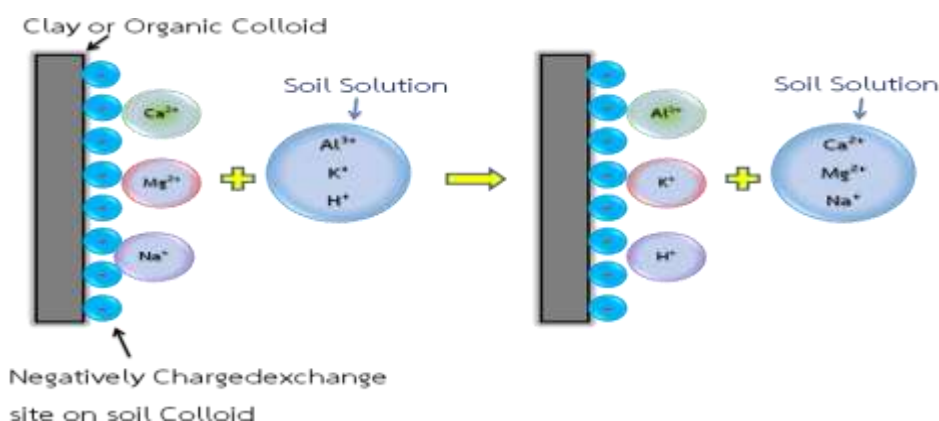
ดินเหนียวเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติจะดูดยึดไอออนที่มีประจุบวกไว้เต็มไปหมด สำหรับไอออนที่มีประจุบวกที่ดูดยึดภายในดินแถบรอนชั้นมีปริมาณมากน้อยตามลำดับ ดังนี้ คือ $H^+(Al^{3+}) > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ ซึ่งไอออนที่มีประจุบวกเหล่านี้จะไม่ยึดติดแน่นกับพื้นผิวของดินเหนียวแต่จะโคจรอยู่ในระยะใกล้ชิดกับผิวภายใต้สภาวะแรงดึงดูดระหว่างประจุของไอออนและประจุของดินเหนียว ดังนั้นการชะล้างด้วยน้ำจึงไม่สามารถชะเอาแคทไอออนเหล่านี้่ออกได้ จึงเรียกว่า แคทไอออนดูดซับ (adsorbed cation) อย่างไรก็ตามแคทไอออนเหล่านี้สามารถถูกไล่ออกได้ง่ายโดยแทนที่ด้วยแคทไอออนอื่น เรียกว่ากระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange process) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดินเหนียวที่อยู่ในกลุ่มของสมกไทต์ ตัวอย่างเช่น มอนต์มอริลโลไนต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนในกลุ่มแคทไอออน โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนเกิดได้ในสารละลาย (water solution) โดยทั่วไปแคทไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนจะเป็น Na^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} การแลกเปลี่ยนจะเกิดระหว่างไอออนของเคลย์ (X^+) และ electrolyte (Y^+) ดังแสดงในสมการ



X^+ คือ ประจุของดิน

Y^+ คือ ประจุที่ทำการเติมลงในสารละลาย

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของประจุของ X^+ และ Y^+ โดยปฏิกิริยาจะเคลื่อนที่ไปด้านขวาเมื่อเติมประจุ Y^+



ภาพที่ 2.2 การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างแคทไอออนในดินกับแคทไอออนอื่น. ปรับปรุงจาก *Soil Sampling and Methods of Analysis*, โดย M.R.Carter, E.G. Gregorich, 2008, United States of America : Taylor & Francis Group.

2.4.2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange Capacity : CEC)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ คือ ปริมาณที่มากที่สุดของประจุที่สามารถเข้าไปแทนที่ได้ มีหน่วยเป็น milliequivalent per gram หรือ 100 gram (meq/g หรือ mg/100g) ที่นอกจากนี้ยังมีหน่วยในระบบ SI เป็น “Coulombs per unit mass” โดยปกติค่า CEC 1 meq/g จะมีค่าเท่ากับ 96.5 C/g ในหน่วย SI Unit ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของแร่ดินขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังต่อไปนี้ (สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์, 2550)

1) ชนิดของคอลลอยด์ (soil colloid) ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของคอลลอยด์ดินที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกันมาก ตัวอย่างเช่น ฮิวมัส มอนต์มอริลโลไนต์ อิลไลต์ เคโอลิไนต์ และไฮดร็อกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าแตกต่างกันตามลำดับ คือ 200, 100, 30, 8 และ 4 ดังนั้นดินที่มีฮิวมัสหรือมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบอยู่มากก็จะทำให้ค่า CEC ของดินนั้นสูงกว่าดินชนิดที่มีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเคโอลิไนต์และไฮดร็อกไซด์

2) ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงจะมีค่า CEC สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวต่ำกว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้ขั้นตอนการสังเกตเนื้อดินเพื่อบอกลักษณะดินเบื้องต้นได้ ถ้าดินนั้นมีเนื้อละเอียดจะมีค่า CEC สูงกว่าดินที่มีเนื้อหยาบ ดังนั้นจึงสามารถประเมินค่า CEC ของดินเบื้องต้นได้จากปริมาณดินเหนียว ซึ่งหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ค่า CEC แก่ดินประมาณ 0.5 Meq/100 g เช่น ถ้าดินมีดินเหนียว 30% CEC ของดินจะมีปริมาณเท่ากับ meq/100g

3) ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน เนื่องจากฮิวมัสมีค่า CEC สูงมาก ดังนั้นดินที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงจึงมีค่า CEC สูง

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปฏิกิริยาการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ จึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้ โดยเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น

2.5.1 กลไกการดูดซับ มี 2 ลักษณะ คือ

2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบที่ยึดเกาะแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นจะสามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซหรือของเหลวนั้นและสามารถดูดซับก๊าซและของเหลวไว้ได้ในปริมาณสูงมาก ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวถูกดูดซับ ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่า Desorption ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวถูกละลายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ให้ความร้อนออกมาสูง เพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกละลายได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สามารถเกิด desorption ได้เพราะองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อใดที่เพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) หรือไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ (titanium (IV) oxide) หรือไทเทเนีย (titania) คือ ออกไซด์ของไทเทเนียมอยู่ในกลุ่มของออกไซด์โลหะทรานซิชัน มีสูตรทางเคมี คือ TiO_2 พบได้ในธรรมชาติแต่ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีโลหะปนเปื้อน เช่น เหล็ก โดยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถพบได้ในแหล่งแร่รูไทล์ (rutile) อิลเมไนต์ (ilmenite) ซึ่งเป็นแร่สีดำ และไอรอนไทเทเนต (iron titanate, $FeTiO_3$) หรือ แร่ลูโคซีน (leucoxene ores) โดยแร่รูไทล์นั้นมีองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ ร้อยละ 93-96 แร่อิลเมไนต์ ร้อยละ 44-70 และแร่ลูโคซีนพบไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่มากกว่าร้อยละ 90 (นิตดา เวชชากุล, 2553)

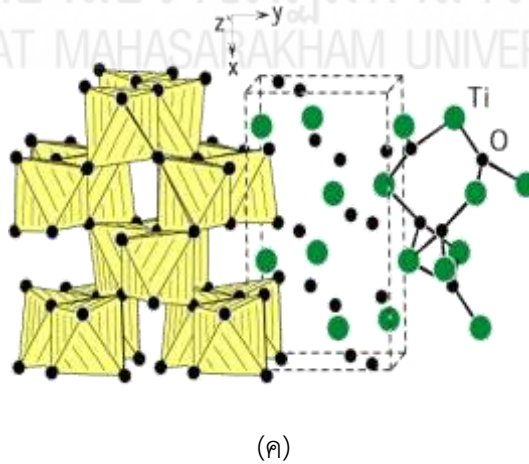
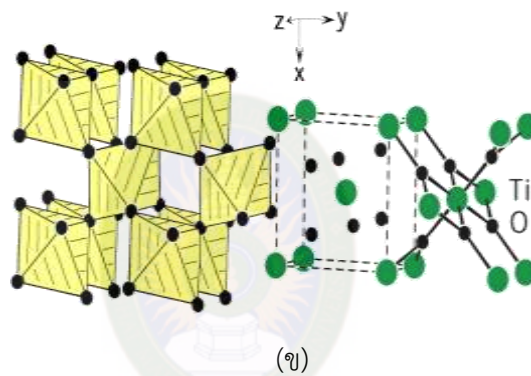
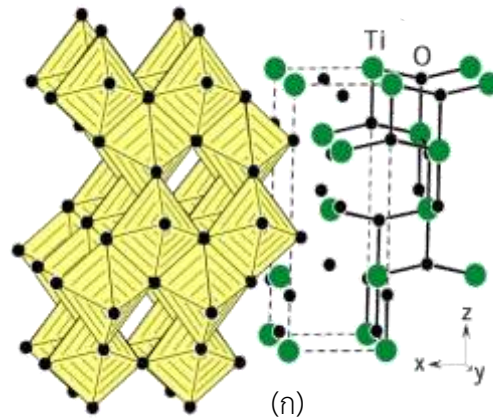
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพดี ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานด้านต่างๆ เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติพิเศษ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี ราคาไม่แพง และไม่ละลายน้ำทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีความโปร่งแสง จึงทำให้แสงส่องผ่านได้เป็นอย่างดี มีพื้นที่ผิวหน้าสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกาะติดผิว มีความคงตัว จะไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดการกัดกร่อน อีกทั้งไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม (ศศิมา จันสุ, 2556)

2.6.1 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะอยู่กลุ่มโลหะทรานซิชัน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.9 มีลักษณะเป็นผงผลึกมีสีขาว ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากเป็นสารที่ไม่มีกลิ่น มีความสามารถในการดูดซับ ทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็นสารไวไฟ ไม่มีความเป็นพิษสูง เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งแร่ชนิดนี้พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์เริ่มตั้งแต่สีทาบ้านไปจนถึงกระทงอาหารและเครื่องสำอาง โดยใช้ในเครื่องสำอางเพื่อวัตถุประสงค์ เช่น เป็นตัวทำให้เกิดการทึบแสง เป็นตัวป้องกันแสงแดด เป็นต้น (กชิตติศ เกษตรกุลชีพ, 2556)

2.6.2 โครงสร้างผลึก (crystal structure) ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ประเภท n-type มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคท์ (brookite) โดยเฟสบรูคไคท์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ส่วนเฟสอนาเทสและรูไทล์ มีโครงสร้างแบบเททระโกนอล (tetragonal) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของออกตะฮีดรอล (TiO_6^{2-}) มาเชื่อมต่อกัน ในแต่ละออกตะฮีดรอลนั้นจะประกอบด้วย Ti^{4+} อยู่ตรงกลางและถูกล้อมรอบด้วย O^{2-} แต่การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลในทั้งสองเฟสนั้นลักษณะแตกต่างกันออกไป ในกรณีของเฟสรูไทล์นั้นจะเกี่ยวข้องกับการใช้ขอบและมุมของออกตะฮีดรอลในการเชื่อมต่อ โดยด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของออกตะฮีดรอล จะถูกเชื่อมต่อกันทำให้เกิดเป็นเส้นตรง (linear chain) และแต่ละเส้นนั้นจะถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนที่อยู่ตรงมุมร่วมกัน ส่วนในกรณีของเฟสอนาเทสนั้น การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลจะเกี่ยวข้องกับการใช้ขอบร่วมกันเท่านั้น (พีระพงษ์ ยศประยูรศักดิ์, 2551) ซึ่งทุกโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_6^{2-} Octahedral) อะตอมไทเทเนียม (Ti) หนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน (O) หกอะตอม แต่ละรูปแบบของโครงสร้างขึ้นอยู่กับวิธีการบิดเบี้ยวในการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบมุม และหน้า เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3

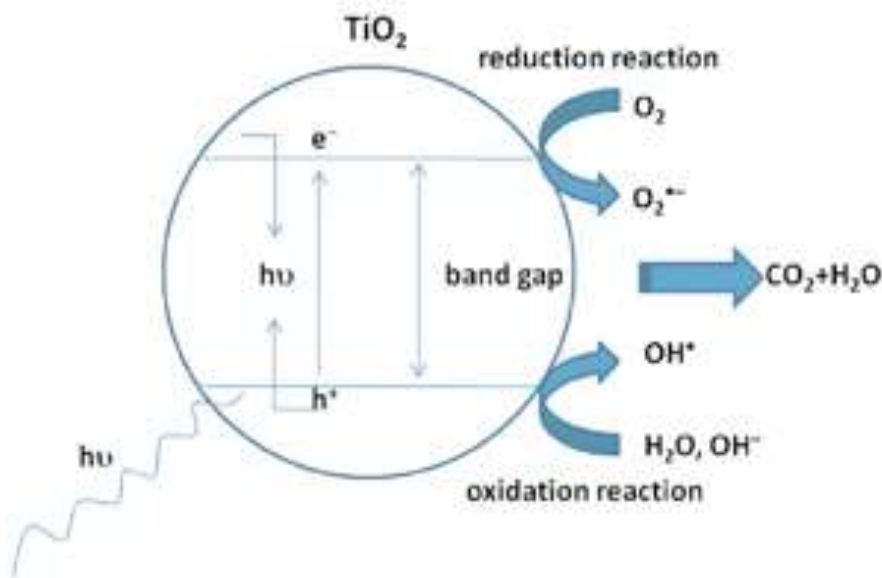


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์: อนาเทส (ก) รูไทล์ (ข) และบรูคไคท์ (ค), ปรับปรุงจาก การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (น.54), โดย นัตตา เวชชากุล, 2555, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีช่องว่างพลังงานโครงสร้างผลึกอนาเทส รูไทล์และบรูคไคท์ มีค่าเท่ากับ 3.2 eV 3.0 eV และ ~3.2 eV ตามลำดับ โดย titaniumdioxide ที่โครงสร้างแบบอนาเทส จะมีความสามารถในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีกว่าโครงสร้างที่เป็นแบบรูไทล์ เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) เกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แต่โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (นิตดา เวชชากุล, 2555) อีกทั้งโครงสร้างอนาเทสยังมีความสามารถในการดูดซับแสงสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่าโครงสร้างแบบอื่น และรูปผลึก ขนาดอนุภาค ผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมผลึกและความบริสุทธิ์ของกระบวนการผลิตถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.6.3 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor) ที่มีสมบัติพิเศษทางโฟโตคะตะไลติก (photocatalyst) มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร โดยกลไกในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอน (e^-) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับพลังงานจากแสงจะมีพลังงานสูงขึ้นและย้ายจากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) และทำให้เกิดโฮล (h^+) อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับสารต่างๆ ที่สัมผัสกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้มีการศึกษานำผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียง 2 เฟส คือ เฟสรูไทล์และอนาเทส ซึ่งรูไทล์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะสามารถเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนกับโฮลสูงและมีความสามารถในการดูดซับแสงต่ำกว่าอนาเทส (ฉลาด บรรเทาและชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม, 2548)



ภาพที่ 2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง. ปรับปรุงจาก การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (น.55), โดย นิตดา เวชชากุล, 2555, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

หลักการของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ คือ ถ้ามีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ให้เข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นได้ เมื่อได้รับ พลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ซึ่งพลังงานนี้เราเรียกว่า พลังงานกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยานาโนถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

2.7 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic Process)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก เป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นอนุภาคของโฟโตคะตะลิสต์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานแสงของโฟตอนที่มากพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถ คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

- เมื่อ $E =$ พลังงานควอนตัม (Quantum energy (จูล))
 $h =$ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} (จูล-วินาที)
 $\nu =$ ความถี่ของคลื่นแสง (เฮิรตซ์หรือวินาที⁻¹)
 $c =$ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 (เมตร/วินาที)
 $\lambda =$ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

2.7.1 ชนิดของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ดังนี้

2.7.1.1 การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบเอกพันธ์ (homogeneous photocatalysis) คือตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจนทำให้ง่ายต่อการศึกษาแต่มีข้อเสียคือสลายตัวหรือเสียดสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.7.1.2 การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous photocatalysis) คือตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยาเช่นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลวการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบได้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ และตัวทำละลาย

2.7.2 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (transition metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นต้น

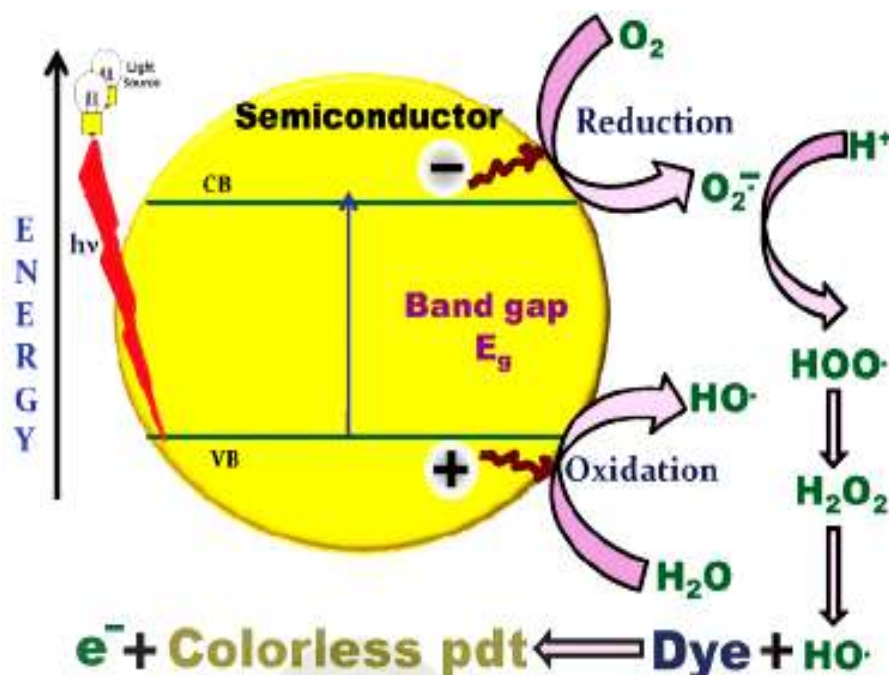
โฟโตคะตะลิสต์ ที่นิยมใช้ส่วนมากเป็นชนิดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) อนุภาคของสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์แบนด์ (valance band) ที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอนอยู่ โดยแถบทั้งสองจะถูกแยกออกจากกัน โดยแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ค่าของช่องว่างพลังงาน (energy gap) จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง โดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าต่างกันออกไป (ศรัญญา ทองอุ่น, 2555)

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงานทำให้เกิดเป็นระดับพลังงานแถบต้องห้าม (band gap energy) ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮล

หลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไป ยังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่เป็นสารกึ่งตัวนำ มีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation and reduction reaction)

2.7.3 กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดขึ้นได้เมื่อมีการดูดซับโฟตอน พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานแถบต้องห้าม (band gap energy) ประมาณ 3.2 eV จะเกิดคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (valence band) จะกระโดดไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) เกิดเป็นโฮล (h^+) ในแถบวาเลนซ์ ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งมีโฮลอยู่นั้นอธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนจากสารละลาย ที่เรียกว่า ตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) จะเคลื่อนที่ไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, OH^\cdot) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 อีกทางด้านหนึ่ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band) คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) ในปฏิกิริยารีดักชัน และออกซิเจน (O_2) ที่ถูกดูดซับจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้เกิดเป็นแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O_2^\cdot) และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO_2^\cdot) ในน้ำถ้า HO_2^\cdot รวมตัวกัน ผลที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน (O_2) โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำ หรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้น ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชันสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นเดียวกัน และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ คือ น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (นัตตา เวชชากุล, 2555)



ภาพที่ 2.5 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์. ปรับปรุงจาก *Ligand-assisted soft-chemical synthesis of self-assembled shaped mesoporous Co₃O₄: Efficient visible light photocatalyst*, โดย Milan Naskar et al, 2015.

ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดจากการที่แสงมีพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของวัสดุเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ซึ่งไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (valence band) ของอนุภาคที่เป็นวัสดุเร่งปฏิกิริยาซึ่งอาจเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหลุดออกจากตำแหน่งซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบคอนดักชันได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแถบช่องว่างพลังงานจึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำจะเกิดได้ยากเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวนแยกได้ยากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับแถบช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานแถบคอนดักชัน และระดับพลังงานแถบเวเลนซ์ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) และน้ำ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot , hydroxylradical) ดังสมการ (2-2) – (2-3) ซึ่งจะเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์และอนินทรีย์อื่นๆ ตัวอย่างของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่โฮลและไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้หมด แสดงได้ดังสมการ 2.9-2.11 ส่วนอิเล็กตรอนจะทำ

ปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ($O_2^{\cdot -}$) ดังสมการ (2-4) – (2-5) และเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการ 2.6-2.8 ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ไอออนไฮดรอกไซด์ น้ำและมลพิษที่เป็นตัวให้ของตัวพาประจุในสารกึ่งตัวนำ (ศรัณยู ชัยวิเชียร, 2555)

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้หมด



และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดหรือตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้รับพลังงานโฟตอนแล้วจะทำให้เกิดการรวมกันอีกครั้งหนึ่งของอิเล็กตรอนและโฮล (e^-/h^+ recombination) ได้เป็นพลังงานความร้อน ดังสมการ (2-12) (ศศิมา จันสุ, 2556)



h^+ คือ โฮลที่แถบเวเลนซ์ (Valence Band Hole)

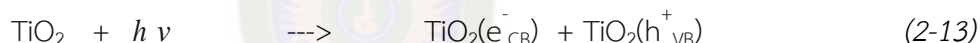
e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

2.7.4 กลไกการกำจัดสีย้อมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

กลไกในการกำจัดสีย้อมออกจากสารละลายด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ มีอยู่ 2 กลไก คือ

2.7.4.1 กลไกโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation)

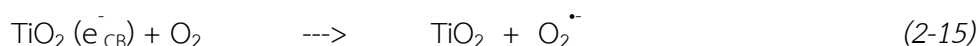
กลไกโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กลไกการแยกประจุ (charge separation) โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสง หรือได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet, UV) เป็นคลื่นที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างของระดับชั้นพลังงาน (band gap energy, E_g) ระหว่างแถบเวเลนซ์ (valence band) กับแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีค่าประมาณ 3.2 eV ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบเวเลนซ์ของไทเทเนียมโมเลกุลหนึ่งไปอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกโมเลกุลหนึ่ง เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดไปอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้านี้ว่า อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (conduction band electron, e^-_{CB}) ส่วนระดับพลังงานแถบเวเลนซ์ของโมเลกุลเดิมซึ่งได้สูญเสียอิเล็กตรอนไปนั้นก็จะเกิดเป็นช่องว่างที่อิเล็กตรอนเดิมเคยอยู่ เรียกช่องว่างดังกล่าวว่า ช่องว่างที่แถบเวเลนซ์ (valence band hole, h^+_{VB}) ดังแสดงในสมการ (2-13)



ในการกำจัดสีย้อม (dye) สีที่ต้องการกำจัดจะเข้ามาจับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลายเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ดังแสดงในสมการที่ 2.14



นอกจากนี้ อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้ายังทำปฏิกิริยากับสารที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) เช่น ออกซิเจน (O_2) แล้วกลายเป็นสารที่มีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เช่น ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (superoxide radical anion, $O_2^{\cdot-}$) ดังแสดงในสมการที่ (2-15)



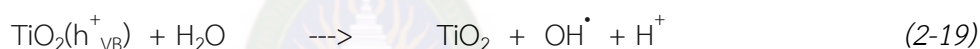
ซึ่ง $O_2^{\cdot-}$ ที่เกิดขึ้นนี้ก็สามารถไปทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) ในสารละลายกลายเป็นสารเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (peroxide radical, HO_2^{\cdot}) ซึ่งมีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เช่นเดียวกับ $O_2^{\cdot-}$ ดังแสดงในสมการที่ (2-16)



ส่วนช่องว่างที่แถบเวเลนซ์ที่เกิดขึ้นมานั้นก็จะไปดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสีย้อม ทำให้โมเลกุลของสีย้อมเปลี่ยนสภาพกลายเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ ดังแสดงในสมการ 2.17



นอกจากนี้ช่องว่างที่แถบเวเลนซ์ยังสามารถไปดึงอิเล็กตรอนจากไฮดรอกไซด์ไอออน(OH⁻) หรือน้ำ (H₂O) ทำให้สารทั้งสองนี้เปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, OH[·]) ซึ่งเป็นสารที่มีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับสารอื่นเช่นกัน ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2-18) และ (2-19)



ซึ่งโมเลกุลของเรดิคัลต่างๆ (radical molecules) ที่เกิดขึ้น ได้แก่ OH[·], O₂^{·-} และ HO₂[·] สามารถไปดึงอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากสารอื่นได้ดีมาก ด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้สารเรดิคัลสามารถย่อยสลายสีได้ ดังสมการ (2-20)



พบว่า OH[·] มีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนจากสารอื่นได้ดีมาก โดยมีค่ามาตรฐานของศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (standard oxidation-reduction potential, ORP) เท่ากับ+2.8 โวลต์ ทำให้สามารถย่อยสลายสีย้อมจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (end product) คือคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide, CO₂) และน้ำได้ง่าย โดยเฉพาะสีย้อมกลุ่มอะโซ (Zainal et al., 2005)

2.7.2.2 กลไกโฟโตเซนซิไทส์ออกซิเดชัน (photosensitized oxidation)

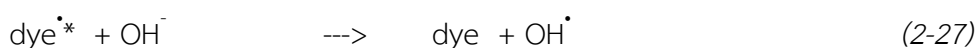
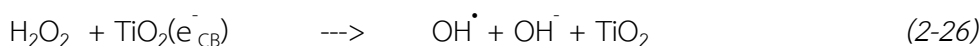
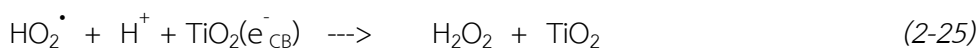
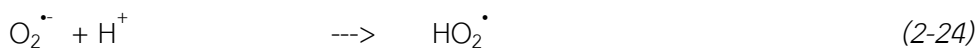
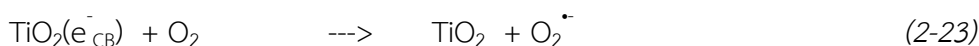
กลไกโฟโตเซนซิไทส์ออกซิเดชัน อาจจะเรียกว่า กลไกการเพิ่มประจุ (charge injection) หรือกลไก photo-assisted degradation กลไกนี้จะเกิดขึ้นเพียงกลไกเดียวเท่านั้น ถ้าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้มีความยาวคลื่นมากกว่า 420 นาโนเมตร ซึ่งขั้นตอนการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการนี้จะแตกต่างกับขั้นตอนที่เกิดขึ้นในกลไกโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน หลักการของกลไกนี้คือ เมื่อสีย้อมได้รับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเฉลี่ยต่ำกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตและ

แสงสีม่วง เช่น แสงขาว(visible light) จะทำให้อิเล็กตรอนของสีย้อมถูกกระตุ้นและกระโดดขึ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า ส่งผลให้สีย้อมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) ดังสมการที่ (2-21)



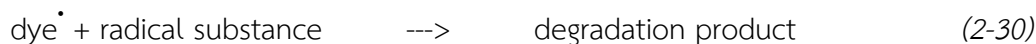
เมื่อสีย้อมในสภาวะถูกกระตุ้น (excited dye, dye*) มาสัมผัสกับไทเทเนียมไดออกไซด์ อิเล็กตรอนของสีย้อมที่ถูกกระตุ้นก็จะหลุดไปอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยสีย้อมที่ถูกกระตุ้นนี้จะเปลี่ยนไปเป็นเรดิคอลลีอ้อมแคทไอออนิก (cationic dye radical, dye^{•+}) ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับอิเล็กตรอนจากสีย้อม $\text{TiO}_2 (e_{\text{CB}}^-)$ จะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (superoxide radical anion, $\text{O}_2^{\cdot-}$) หลังจากนั้น $\text{O}_2^{\cdot-}$ ก็สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) ในสารละลายแล้วเกิดเป็นสารเปอร์ออกไซด์เรดิคอล (peroxide radical, HO_2^{\cdot}) ซึ่งสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ นอกจากนี้ HO_2^{\cdot} ยังสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอนและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้า $\text{TiO}_2 (e_{\text{CB}}^-)$ แล้วกลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอิเล็กตรอนอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้า $\text{TiO}_2 (e_{\text{CB}}^-)$ แล้วเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล (hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ซึ่งก็มีความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมได้เช่นกัน ส่วน Dye^* ที่เกิดขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ก็สามารถก่อให้เกิด OH^{\cdot} ได้เช่นกัน

การเกิดขึ้นของสารเรดิคอลต่างๆ (radical substance) ที่มีความสามารถย่อยสลายสีย้อมดังกล่าวมาข้างต้นนี้ สามารถเขียนแสดงด้วยสมการ (2-22) – (2-27)



ส่วนการย่อยสลายของสีย้อมและ dye^* ที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.22 สามารถเกิดได้หลายรูปแบบ ดังแสดงในสมการ (2-28) ถึง (2-30)





ในที่นี้เรดิคัล ได้แก่ O_2^- , OH^- และ HO_2^- ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลาย (degradation product) เมื่อย่อยสลายเรื่อยๆจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรต์ (NO_2^-) หรือซัลโฟเนต (SO_4^{2-}) (Tanaka et al., 2000)

2.7.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ ได้แก่ ค่า pH ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) และความเข้มของแสงดังนี้

2.7.5.1 ค่าพีเอช (pH) ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์นั้นขึ้นอยู่กับค่า pH ในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารเนื่องจากค่า pH มีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่า pH สูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่า pH ต่ำ และเป็นลบเมื่อค่า pH สูงขึ้น สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ค่า pH ที่ทำให้ประจุเป็นกลาง (isoelectric point) คือ 6 – 6.3 จากการศึกษา พบว่าไฮดรอกซิลเรดิคัลต่อเมื่อโฟโตคะตะลิสต์ มีค่า $\text{pH} < 3$ ขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัล มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่า $\text{pH} < 3$

2.7.5.2 ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อนและทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ลดลง เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลง ปริมาณไทเทเนียมที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1–5 กรัมต่อลิตร

2.7.5.3 อุณหภูมิทางจลนศาสตร์ อุณหภูมินี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่อัตราที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการของอาร์เรเนียส สมการที่ (2-31)

$$k = A - E_a / RT \quad (2-31)$$

k = Reaction rate constant (min^{-1})

A = Frequency factor (min^{-1})

E_a = Activation energy (J.mol^{-1})

R = Gas constant ($\text{J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T = Absolute temperature (K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟที่เขียนระหว่างค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยา (k) กับส่วนกลับของค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1/T$) ดังสมการที่ (2-32)

$$\ln k = (- E_a / RT) + \ln A \quad (2-32)$$

โดยอัตราของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e^-_{CB} และ h^+_{VB} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{CB} และ h^+_{VB} และอาจเนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา

2.7.5.4 ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e^- ที่แถบนำไฟฟ้าทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{CB} และ h^+_{VB} นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วย

2.7.5.5 ความเข้มของแสง (light intensity) เนื่องจากความเข้มของแสง (พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ (ν) มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนั้น จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน = พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบน พลังงานของแสง 1 โฟตอน = $E_r / h\nu$ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบนต่อ 1 วินาที = ความเข้มแสง h การที่จะกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e^-_{CB} และ h^+_{VB} ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 nm หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 eV ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ระดับความเข้มแสงต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง

และที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง (Ollis et., seng & Haung, 1991; อ้างถึงใน ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล, 2550)

2.8 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลู (methylene blue) หรือ 3,7-bis (dimethylamino) -phenolthiazin-5-ium chloride ตามชื่อ IUPAC มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $C_{16}H_{18}N_3S^+Cl^-$ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 319.85 g/mol (ภัทรานิตร์ ทองเทพ, 2558, น. 36) เป็นสีย้อมประเภทดิสเพิร์ส (disperse dyes) สูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.6 มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงสีเขียวเข้ม ละลายได้ดีในน้ำและละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม เมทิลีนบลูมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิว หรือภายในเซลล์ ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาล เมทิลีนบลูมี CAS Number: 61-73-4 สามารถใช้เป็นสารย้อมสีในการศึกษาทางแบคทีเรีย เป็นรีเอเจนท์ ตัวย้อมยั้งกระบวนการสร้างโพลีเมอร์และสีย้อมผสมชนิดไม่ถาวร ใช้เป็นสีย้อมกระดาษ สิ่งทอ และหนัง เป็นต้น ที่อุณหภูมิห้องจะมีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงสีเขียวเข้ม ไม่มีกลิ่น จะกลายเป็นสีน้ำเงินเข้มเมื่อละลายน้ำ เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีประจุบวก มีการดูดซับสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยการแตกตัวเป็นประจุบวก ชนิดตัวดูดซับ ความเข้มข้น และปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ เป็นต้น โดยเมทิลีนบลูแต่ละชนิดมีค่าการดูดซับดังตารางที่ 2.2 (ศิริประภา ชัยเนตร, ภัทรา วงษ์พันธ์กมล และครรชิต คงคาเงิน, 2559, น. 5)



ภาพที่ 2.6 สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู. ปรับปรุงจาก “การพัฒนาเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการกำจัดสีย้อมอินทรีย์,” โดย ภัทรานิตร์ ทองเทพ, 2558, วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 20.

ตารางที่ 2.2

ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู

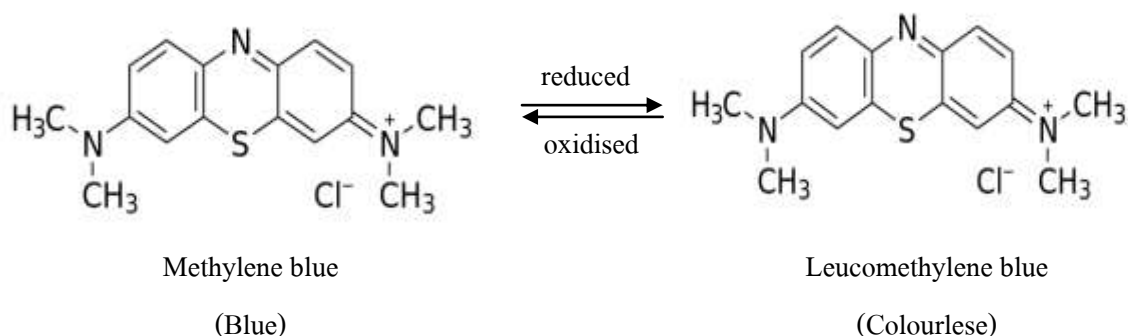
Species	Adsorption peak	Extinction coefficient ($\text{dm}^3/\text{mol}\cdot\text{cm}$)
MB^+ (solution)	664	95000
MBH^{2+} (solution)	741	76000
$(\text{MB}^+)_2$ (solution)	605	132000
$(\text{MB}^+)_3$ (solution)	580	110000
MB^+ (adsorbed on clay)	673	116000
MBH^{2+} (adsorbed on clay)	763	86000
$(\text{MB}^+)_2$ (adsorbed on clay)	596	80000
$(\text{MB}^+)_3$ (adsorbed on clay)	570	114000

หมายเหตุ. ปรับปรุงจาก การดูดซับเมทิลีนบลูจากเปลือกไข่, โดย ศิริประภา ชัยเนตร, ภัทรา วงษ์พันธ์กุลและครรชิต คงคาเงิน, (2559), เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (basic dyes) หรือสีย้อมที่เป็นต่าง ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่าสีย้อมแคทไอออนิก (cationic dyes) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ และพิษของเมทิลีนบลูอาจทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำและบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ (อารีพร อ่อนตาม, 2558)

เมทิลีนบลู มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย anthraquinone และ sulfide นอกจากนี้ประกอบด้วยกลุ่ม $-\text{C}=\text{O}$ $-\text{NH}-$ และแอมโรมาติก ซึ่งสามารถย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้ด้วยกระบวนการที่ใช้แสงจากดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลปริมาณที่สูงโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล

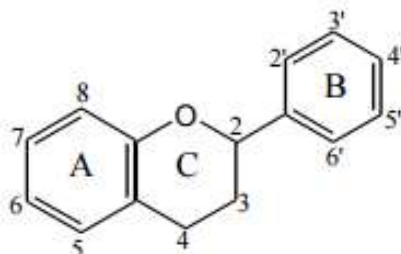
ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเข้าไปสลายโมเลกุลเมทิลีนบลู การสลายโมเลกุลของเมทิลีนบลูซึ่งเริ่มต้นจากการแตกของหมู่ $\text{C}-\text{N}^+=\text{C}$ ดังภาพที่ 2.7 เมื่อสิ้นสุดการสลายจะได้ CO_2 , H_2O , NO_x^- และ SO_4^{2-}



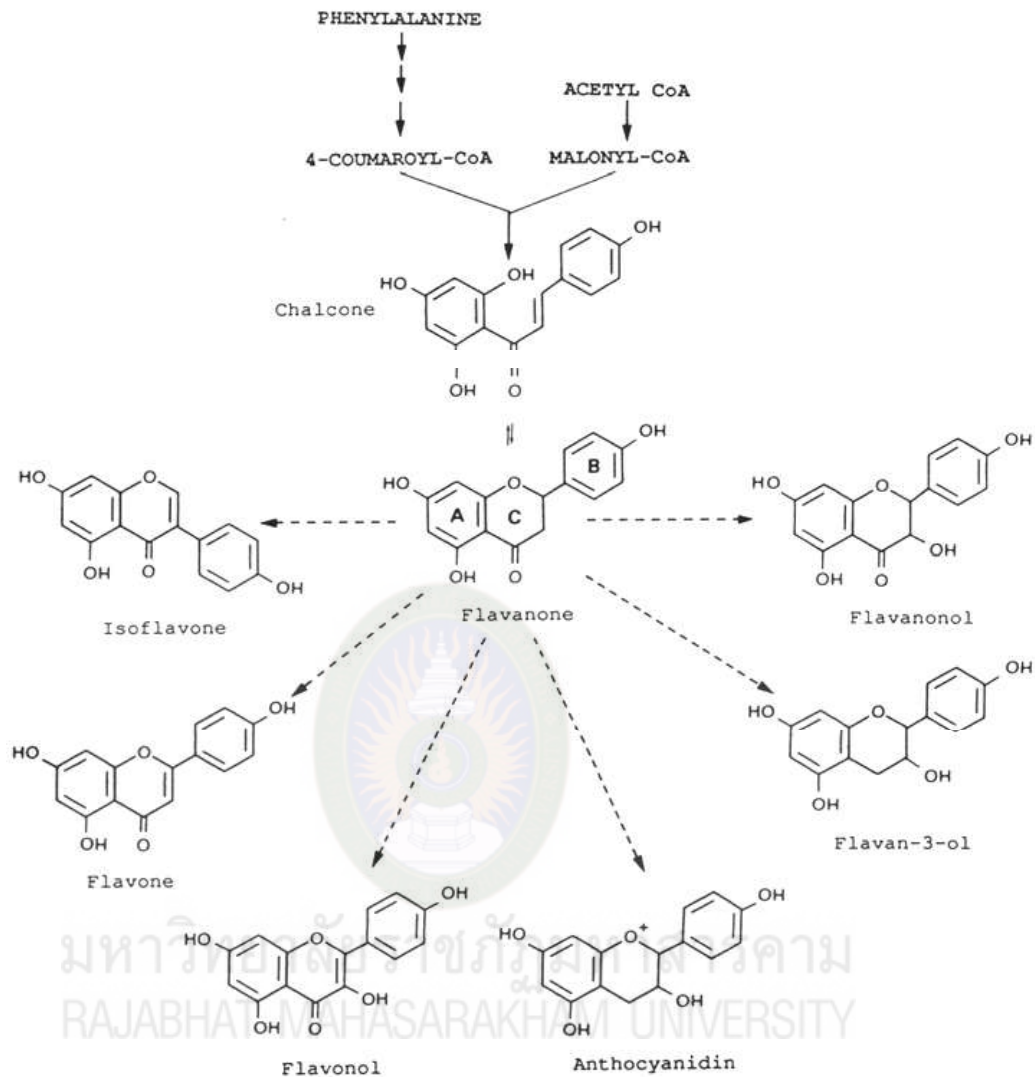
ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาย่อยลายสีของเมทิลีนบลู, โดย Evanthia Papadopoulou et al., 2016.

2.9 ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)

ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นสารกลุ่มโพลีฟีนอลิก (polyphenolic compounds) ส่วนใหญ่เป็นสารที่มีสีในส่วนต่างๆของพืชโดยเฉพาะในดอกและใบ สีที่พบแตกต่างกันไป เช่น สีแดง เหลือง ม่วง และน้ำเงิน เป็นต้น สารกลุ่มนี้เป็นสารกลุ่มใหญ่ที่พบได้ในพืชทั่วไป โครงสร้างหลักของฟลาโวนอยด์เป็นไดฟีนิลโพรเพน (diphenylpropane) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 อะตอม จัดเรียงตัวเป็นวงแหวน 3 วงเรียงต่อกัน (C6-C3-C6) ให้ชื่อว่า วงแหวน A วงแหวน B และวงแหวน C มีการเรียกชื่อตำแหน่งคาร์บอนตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งสารแต่ละกลุ่มย่อยของฟลาโวนอยด์มีโครงสร้างที่แตกต่างกันที่พันธะคู่บนวงแหวน A และวงแหวน B นอกจากนั้นยังมีความแตกต่างเมื่อมีหมู่ต่างๆ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่เมทอกซิล (methoxyl group) หรือ น้ำตาลชนิดต่างๆ เข้ามาแทนที่บริเวณคาร์บอนตำแหน่งต่างๆบนวงแหวนอีกด้วย ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์กลุ่มต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์, โดย Shashank Kumar and Abhay K. Pandey, 2013.



ภาพที่ 2.9 การสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์, โดย Macheix et al., 1990.

2.9.1 ชนิดและแหล่งของฟลาโวนอยด์ (flavonoids)

ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) สามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ตามโครงสร้างซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีโครงสร้างแตกต่างกันบริเวณวงแหวน C ในขณะที่สารแต่ละชนิดในกลุ่มจะมีโครงสร้างแตกต่างกันบริเวณวงแหวน A และวงแหวน B โดยเป็นการที่มีหมู่ต่างๆ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่เมทอกซิล (methoxyl group) หรือน้ำตาลชนิดต่างๆ เข้ามาแทนที่ในคาร์บอนตำแหน่งต่างกัน สามารถจำแนกออกได้อย่างกว้างๆ เป็น 12 ชนิด ดังภาพที่ 2.10 ดังนี้

2.9.1.1 แอนโธไซยานิน (anthocyanins) เป็นสารสีที่สำคัญและมีทั่วไปในพืช เช่น ในกลีบดอก กลีบเลี้ยง ใบ เปลือก และผล ซึ่งพบในดอกไม้ เช่น ดอกอัญชัน ในผลไม้ เช่น บลูเบอร์รี่

บิลเบอร์รี่ ลูกหว้า มะเกี๋ยง เป็นต้น ให้สีชมพู ม่วง ม่วง-แดง จนถึงน้ำเงิน มักพบเป็น O-glycosides ที่ตำแหน่ง C-3 และ C-5 หรืออาจพบน้ำตาลทั้งสองตำแหน่งเลยก็ได้ สำหรับในส่วนของอะไกลโคโคน เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) ซึ่งจะมีสีที่แตกต่างกันเมื่ออยู่ในสภาวะที่ต่างกัน เช่น ในสภาวะที่เป็นกรดจะให้สีแดงปนส้ม ในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่มีสีและในสภาวะที่เป็นเบสจะให้สีม่วง-สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ แต่ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นเบสมาก คือที่ pH สูงๆ ปฏิกิริยาจะไม่ย้อนกลับ โดยปกติแอนโทไซยานินที่อยู่ในสภาวะเบสจะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายในอากาศ ดังนั้นจึงนิยมที่จะเก็บในสภาวะกรด สีที่ต่างกันของแอนโทไซยานินนั้นถ้าพิจารณาจากโครงสร้างจะพบว่าขึ้นอยู่กับจำนวนของหมู่ไฮดรอกซีที่วงแหวน B เช่น พิลากอนิดิน (pelargonidin) มีหมู่ไฮดรอกซีหนึ่งหมู่จะให้สีส้มแดง ไซยานิดิน (cyanidin) มีสองหมู่ให้สีแดง-ม่วง และดีลฟินิดิน (delphinidin) มีสามหมู่ให้สีม่วง-น้ำเงิน-แดง

2.9.1.2 ลิวโคแอนโทไซยานิดิน (leucoanthocyanidins) เป็นฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีสี ไปจนถึงสีแดงและสีม่วง พบในแก่นของต้นไม้ เกาอุน เป็นต้น ลิวโคแอนโทไซยานิน ส่วนใหญ่พบในรูปของอะไกลโคโคน มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับฟลาโวนอล ที่ตำแหน่ง C-3 และ C-4 มีหมู่ไฮดรอกซีทั้งสองตำแหน่ง เมื่ออยู่สภาวะที่เป็นกรดบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอนโทไซยานิดิน

2.9.1.3 ฟลาโวนอล (flavanonols) เป็นฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีสีหรือมีสีเหลืองเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นเบสมีความร้อนด้วยจะสลายตัวให้ซาลิโคน ตัวอย่างฟลาโวนอยด์ชนิดนี้ ได้แก่ ทาซิโฟลิน (taxifolin) พบใน ใบแปะก๊วย เปลือกสนเขินต์จอห์นเวิร์ต เป็นต้น

2.9.1.4 ฟลาโวน (Flavones) เป็นฟลาโวนอยด์ที่พบมากในพืชเป็นสารสีเหลืองพบในดอกไม้ ผลไม้ เป็น Flavonoid ชนิดที่พบมากที่สุด มีลักษณะโครงสร้างต่างกับฟลาโวนอยด์ ไม่มีหมู่ไฮดรอกซีที่ C-3 พบมากในรูปของไกลโคไซด์ ส่วนของอะไกลโคโคนที่พบมาก ได้แก่ อะพิจินิน (apiginin) ลูติโอลิน (lutiolin) ไทรซิน (tricin) และไตรซิทิน (tricetin) สำหรับส่วนที่เป็นน้ำตาลมักจะพบที่ C-7 เป็น O-glycosides เช่น luteolin-7-glycosides อาจพบที่เป็น C-glycosides ด้วย เช่น โอเรียนติน (orientin) (luteolin-8-C-glycosides) และวิทซิทิน (vitexin) ซึ่ง C-glycoside นี้จะทนต่อการถูกไฮโดรไลส์ด้วยกรด ยังพบว่าฟลาโวนสามารถเกิดเป็นสารพวกไดเมอร์ (dimeric compound) ที่เรียกว่า ไบฟลาโวนิล (biflavonyl) โดยจะพบในกลุ่ม อะพิจินิน เช่น เคยาฟลาโวน (kayaflavones)

2.9.1.5 ไอโซฟลาโวน (isoflavones) เป็นสารฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีสี พบในพืชวงศ์ *leguminisae* และวงศ์ *Iridaceae* ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามการออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา

1) มีฤทธิ์ต่อระบบสืบพันธุ์ของเพศหญิง แบบฮอร์โมนเพศหญิงเอสโตรเจน (estrogenic agent) ได้แก่ เดดซิน (daidain) (7,4'-dihydroxyisoflavone) พบได้ในถั่วหัวช้าง

และหญ้าแพรก จินิสตีอิน (genistein) (5,7,4'-trihydroxyisoflavone) พบได้ในถั่วเหลือง หญ้าแพรก และในพืชตระกูลข้าวสาลี ไบโอซามิน เอ (biochamin A) จะพบได้ในถั่วหัวข้าง ประดู่ แยก และกระพี และฟอร์มโนนิน (formononetin) (7-hydroxy-4'-methoxyisoflavone) พบได้ในถั่วหัวข้างและชะเอมเทศ

2) ออกฤทธิ์เป็นยาฆ่าแมลง (insecticides) เช่น โรทีโนน (rotenone)

3) ไฟโตอะเล็กซิน (phytoalexin) เป็นสารที่พืชสร้างขึ้นเมื่อถูกรุกรานโดยเชื้อโรคและแมลง เช่น ไพซาติน (pisatin)

2.9.1.6 ฟลาโวนอน (flavanones) เป็นฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีสีหรือสีเหลืองอ่อนมาก ในธรรมชาติมักพบควบคู่กับซาลิโคนแต่อาจพบเดี่ยวๆได้ เช่น พบในพืชตระกูลส้ม ได้แก่ นารินจิน (naringin) เป็นสารที่มีรสขมในเปลือกของผลส้มและบูทิน (butin) ฟลาโวนอนอาจเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่ไฮดรอกซี (dehydrogenation) ได้ฟลาโวน หรืออาจเกิดปฏิกิริยาการเติมหมู่ไฮดรอกซี (hydroxylation) ที่ตำแหน่งที่ 3 ได้เป็นไดไฮโดรฟลาโวนอล จากนั้นก็จะได้ฟลาโวนอยด์ชนิดต่างๆ แล้วแต่ปฏิกิริยา เช่น เกิดปฏิกิริยากำจัดหมู่ไฮดรอกซีได้ฟลาโวนอลและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่หมู่คาร์บอนิลได้ flavan-3-4 diols หลังจากเกิดอีโนไลเซชัน (enolization) และออกซิเดชันแล้ว จะได้แอนโทราไซยานิน ฟลาโวนอนใน citrus มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อราจึงมีการนำมาใช้รักษาเนื้อไม้ และมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมและเภสัชกรรม (คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2533:11)

2.9.1.7 ซาลิโคน (chalcones) เป็นฟลาโวนอยด์ที่มีสีเหลืองพบมากในวงศ์ *Compositae*, *Scrophulariaceae*, *Oxalidaceae*, *Acanthaceae* และ *Liliaceae* โดยทั่วไปมักพบควบคู่กับฟลาโวนอน อะไกลโคนของสารทั้งสองนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ เช่น บูทิน เมื่ออยู่ในสภาวะกรดจะได้ บูทิน แต่เมื่ออยู่ในสภาวะเบสจะเกิดปฏิกิริยาผันกลับ

2.9.1.8 ออโรน (aurones) เป็นฟลาโวนอยด์ที่มักจะพบร่วมกับซาลิโคนและมีสีเหลือง เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นเบสจะให้สีส้มหรือสีแดง ตัวอย่าง ได้แก่ ออริซิดิน (aureusidin) และซัลฟูริทิน (sulphuretin) สามารถพบออโรนได้ในดอกไม้ เปลือกไม้ เนื้อไม้ และใบไม้

2.9.1.9 คาทีชิน (catechins) เป็นฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีสี สามารถพบได้ในพืชทั่วไป โดยเฉพาะในพืชที่มีเนื้อไม้ เป็นสารตั้งต้นของคอนเดนส์แทนนิน (condensed tannin) เนื่องจากเมื่อถูกความร้อน กรด หรือเอนไซม์ จะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีแดงที่ไม่ละลายน้ำ เรียกว่าแทนนินเรด (tannin red) คาทีชินใช้รักษาเนื้อเยื่อในผู้ป่วยอัมพาตให้ดีขึ้น

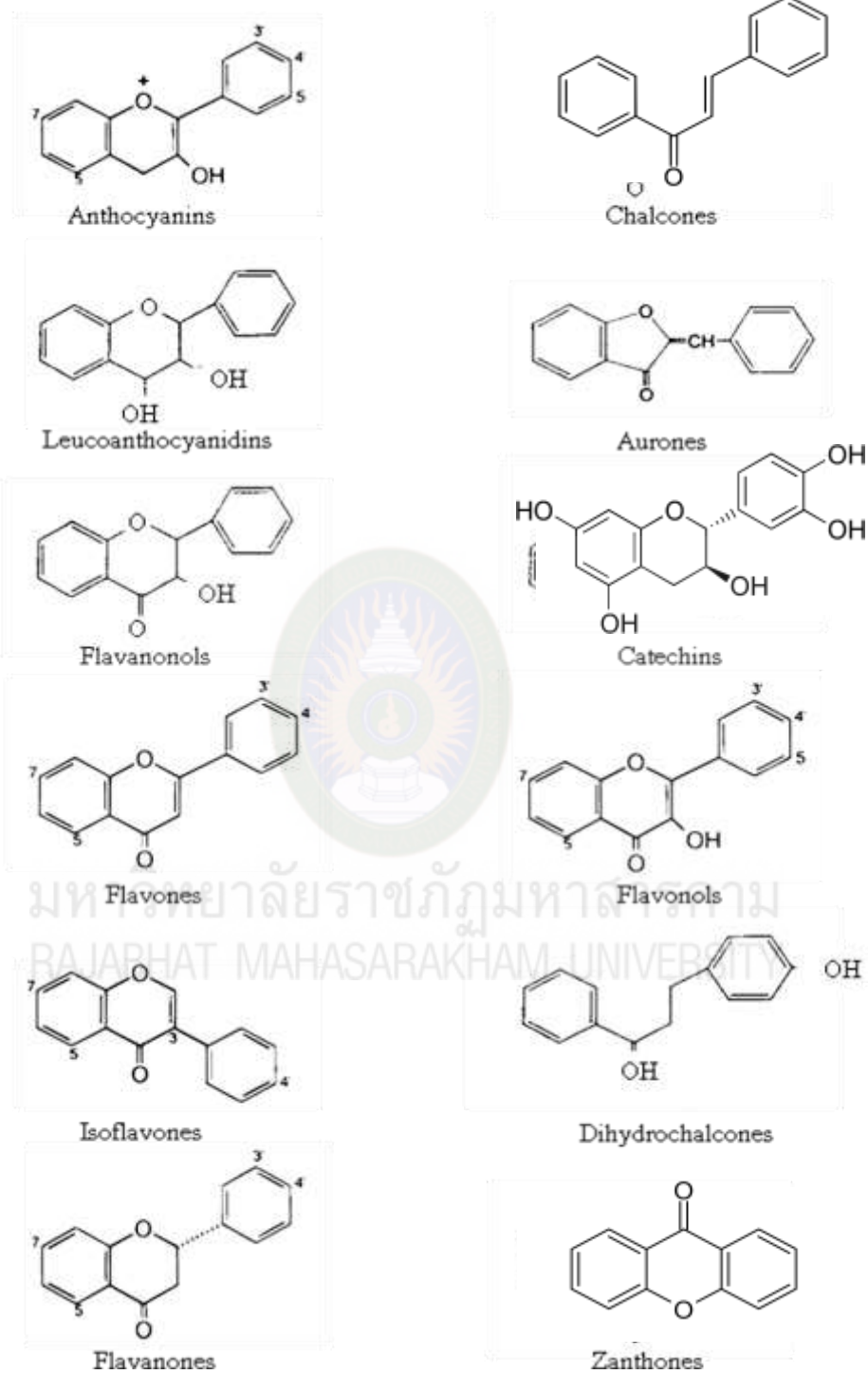
2.9.1.10 ฟลาโวนอล (flavonols) ได้แก่ quercetin, kaempferol และ myricetin กลุ่มนี้เป็นสารที่สามารถพบได้ทั่วไปและพบได้ในปริมาณมากในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แอปเปิ้ล บร็อคโคลี่ กระเทียมต้น หัวหอมใหญ่ แครนเบอร์รี่ และสตรอเบอร์รี่ เป็นต้น

2.9.1.11 ไดไฮโดรซาลโคน (dihydrochalcones) มีโครงสร้างแตกต่างกับซาลโคน ตรงตำแหน่งคาร์บอนที่เชื่อมระหว่างทั้งสอง คือตำแหน่งแอลฟา และบีตา ของหมู่คาร์บอนิล เป็นพันธะเดี่ยว ซึ่งในซาลโคนจะเป็นพันธะคู่ สำหรับตัวอย่างของฟลาโวนอยด์ชนิดนี้ ได้แก่ โฟริซิน (pholrizin) เป็นสารที่ทำให้มีน้ำตาลในปัสสาวะสูง (glycosuria) ในสัตว์

2.9.1.12 แซนโทน (zanthones) จัดเป็นฟลาโวนอยด์ชนิดหนึ่งแม้ว่าโครงสร้างจะแตกต่างกับฟลาโวนอยด์ชนิดอื่นๆ คือ มีการจัดเรียงตัวเป็น C6-C1-C6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีคาร์บอนในระหว่างวงแหวน A และวงแหวน B ขาดหายไปจำนวนสองอะตอม แต่เนื่องจากว่ามีชีวสังเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกันจึงจัดเป็นสารกลุ่มเดียวกัน แซนโทนมีสีเหลืองพบในพืชวงศ์ *Gutiferae, Gentianeaceae, Moraceae* และ *Poligalaceae* ตัวอย่างของอะไกลโคนของฟลาโวนอยด์ชนิดนี้ ได้แก่ จินทิซิน (gentisin) สำหรับตัวอย่างของแซนโทนไกลโคไซด์ ได้แก่ แมนจิเฟอริน (mangiferin) ซึ่งเป็น C-glycoside พบในเฟิร์นและพืชชั้นสูง



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของสาร Flavonoids. ปรับปรุงจาก เคมีของผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (น.73).
โดย ขวัญใจ กนกเมธากุล, 2535, ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

2.9.2 คุณสมบัติและการสกัดฟลาโวนอยด์

ฟลาโวนอยด์ส่วนใหญ่ เป็นสารที่มีสีซึ่งสามารถระบุความแตกต่างของแต่ละชนิดได้ ในพืชบางชนิดที่ไม่มีสีสามารถตรวจสอบฟลาโวนอยด์ได้ โดยใช้ไอของแอมโมเนียซึ่งจะทำให้เกิดมีสีเหลืองขึ้น และถ้าเป็นสารกลุ่มออโรน และชาลโคน ที่มีสีเหลืองจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง ฟลาโวนอยด์จะถูกรีดิวซ์ ด้วยโลหะแมกนีเซียมในสารละลายกรด สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ฟลาโวนอยด์แต่ละชนิดจะมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นโดยจะดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ที่ 220-270 นาโนเมตร ช่วงที่ 2 ขึ้นอยู่กับชนิดของฟลาโวนอยด์ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

ความยาวคลื่นของฟลาโวนอยด์แต่ละชนิด

ฟลาโวนอยด์	ความยาวคลื่น (nm)
Anthocyanins	500-530
Flavones และ flavonols	330-375
Aurones และ chalcones	370-410
Flavanones และ flavanonols	250-300
Leuco anthocyanidins และ catechins	280
Isoflavones	310-330

ฟลาโวนอยด์มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลหลากหลายมากจึงมีผลสะท้อนต่อคุณสมบัติของแต่ละชนิด ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไกลโคไซด์ บางชนิดอยู่ในรูปไตรโคไซด์ (triglycoside) เช่น โรบินิน (robinin) บางชนิดเป็นไดไกลโคไซด์ (diglycoside) เช่น รุทีน (rutin) และส่วนมากเป็นโมโนไกลโคไซด์ (monoglycoside) บางครั้งพบกลูคูโรนิกแอซิด (glucuronic acid) แทนกลูโคสด้วย ถ้าฟลาโวนอยด์อยู่ในรูปอิสระ คือไกลโคโคนก็ยังมี ความแตกต่างกันได้ในจำนวนของหมู่ไฮดรอกซี ถึง 7 กลุ่ม และอนุมูลไฮดรอกซี ก็อยู่ในรูปของเมทิลอีเทอร์ บางกลุ่มหรือทุกกลุ่มก็ได้ เหล่านี้ทำให้เกิดความแตกต่างของการละลายของฟลาโวนอยด์

สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่ละลายได้ในน้ำสามารถแยกสกัดได้ด้วยตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น เมทานอล (CH_3OH) เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) อะซีโตน (CH_3COCH_3) 80% เมทานอล

สารกลุ่มฟลาโวนอยด์จัดเป็นฟีนอลิกไกลโคไซด์ซึ่งมีความไวต่อการถูกออกซิไดส์ด้วยออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นจึงควรเก็บในสภาวะกรดเจือจาง (0.1 M HCl) และตัวรีดิวซ์ อาทิเช่น

แอสคอบิกแอซิด แต่ในสภาวะกรดร้อนหรือเย็นก็อาจก่อให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของไกลโคไซด์

พืชที่จะนำมาสกัดฟลาโวนอยด์ ควรเป็นพืชสด หรือทำให้แห้งอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากสารกลุ่มที่มีความเป็นกรดมาก เช่น มีหมู่ฟีนอลิก ไฮดรอกซิลอยู่ในตำแหน่ง para- กับหมู่คาร์บอนิล จะละลายในโซเดียมคาร์บอเนต ได้ดีกว่าพวกไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือมีในรูปของ เมทิลอีเทอร์ อีกวิธีหนึ่งคือ การเกิดสารเชิงซ้อนกับบอเรต ถ้าเกิดฟลาโวนอยด์นั้นมี 5-hydroxyl group และมีอนุมูลคาทิซอล เช่น ควาซิทิน และไกลโคไซด์ก็สามารถสกัดด้วยบอเรคและคืนรูปได้โดยการทำให้เป็นกรด (คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2533, น. 119-120)

สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่ไม่มีขั้วสามารถแยกโดยใช้เทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟี ที่มีซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ และตัวชะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้ว เช่น เอทิลอะซิเตทและอีเทอร์

2.9.3 ประโยชน์ของสารประกอบฟลาโวนอยด์

2.9.3.1 Antioxidation ทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน โดยประสิทธิภาพของการต้านออกซิเดชันขึ้นอยู่กับโครงสร้างและหมู่ที่เข้ามาแทนที่ เช่น หากมีหมู่ 3-hydroxyl เข้ามาแทนที่บริเวณวงแหวน C จะทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันมากขึ้น และถ้าหากมีหมู่ hydroxyl เข้ามาแทนที่ในตำแหน่ง 5 และ 7 จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการต้านออกซิเดชันน้อยกว่าการเข้ามาแทนที่ในตำแหน่งที่ 3 (Rice-Evans et al., 1996)

2.9.3.2 Anticarcinogen มีคุณสมบัติในการต้านการเกิดมะเร็ง โดยมีหน้าที่หลักคือทำลายอนุมูลอิสระ ยับยั้งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของเนื้องอก และทำหน้าที่ยับยั้งการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง (Hertog et al., 1992)

2.9.3.3 Cardiovascular properties มีความสามารถในการป้องกันการแตกของเส้นเลือดและป้องกันการแข็งตัวของเส้นเลือด

2.9.3.4 Metal cation chelators ทำหน้าที่ในการจับไอออนของโลหะเนื่องจากไอออนของโลหะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการทำลายเซลล์ร่างกาย

2.9.3.5 Anti-inflammatory ทำหน้าที่ยับยั้งการอักเสบ เมื่อเกิดการอักเสบจะเพิ่มอนุมูลอิสระ และเร่งการพัฒนาอนุมูลอิสระ สารที่มีคุณสมบัตินี้มากคือ สารในกลุ่มฟลาโวนอล

2.9.3.6 ลดปริมาณ LDL cholesterol ซึ่งเป็นคอเรสเตอรอลที่เป็นผลเสียต่อร่างกาย ซึ่งหากร่างกายมีปริมาณ LDL cholesterol มาก จะส่งผลให้เกิดอาการหลอดเลือดแดงตีตันสารในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกบางชนิด เช่น กรดแกลลิก (gallic acid) เป็นสารที่พบได้ทั่วไปและมีปริมาณมากในผักและผลไม้แทบทุกชนิด ส่วนในกลุ่มฟลาโวนอยด์พบได้ทั่วไปและพบได้ปริมาณมากในผักและผลไม้หลายชนิด คือ กลุ่มฟลาโวนอล (flavonols) ได้แก่ แคมพ์เฟอรอล และควอเซติน (Rice-Evans et al., 1996)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมจิตร พุฒดี (2553) ได้ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนตและเส้นนาโนไทเทเนต โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลจากไทเทเนียมทรงแท่งกลมเชิงการค้ำ โดยศึกษาผลของการทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิปฏิกิริยาและการเผาต่อการเกิดและรูปร่างของไทเทเนต พบว่าท่อนาโนไทเทเนตที่มีพื้นที่ผิวสูงสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิกิริยาเป็น 200 องศาเซลเซียส ท่อนาโนไทเทเนตเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นเส้นนาโนไทเทเนต การเผาที่ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ท่อนาโนไทเทเนตเปลี่ยนรูปร่างกลับไปเป็นอะนาเทสไทเทเนียม ในขณะที่การเผาเส้นนาโนไทเทเนตเปลี่ยนเป็น ไทเทเนียมแบบเมตาสเตเบิลภายใต้สภาวะเดียวกัน การใช้ท่อนาโนไทเทเนตเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันแบบเลือกเกิดของหนึ่ง-เฮปไทน์ในวัฏภาคของเหลว สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมที่เตรียมบนเส้นนาโนไทเทเนตและไทเทเนียมทางการค้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนท่อนาโนไทเทเนต ที่เตรียมจากวิธีรีดักชันด้วยตัวทำละลายแสดงค่าการเปลี่ยนของหนึ่ง-เฮปไทน์ ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบฝัง ในขณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันเพิ่มขึ้น เมื่อการกระจายตัวของแพลเลเดียมสูงขึ้น ค่าการเลือกเกิดเป็นหนึ่ง-เฮปไทน์ขึ้นกับชนิดของตัวรองรับ และ/หรืออันตรกิริยาระหว่างแพลเลเดียมและตัวรองรับ

ชุติมา แกมกิจ (2556) ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างโคโตซานละลายน้ำ (wCTS) กับมอนตมอริลโลไนต์ (MMT) และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, FT-IR และ TGA โดยใช้โคโตซานละลายน้ำทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ โคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (L-wCTS), ไฮดรอกซีเอทิลอะคริลาตโคโตซาน (H-wCTS) และโคโตซาน hydroxyethylacryl น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (LH-wCTS) ซึ่งจะได้วัสดุ L-wCTS/MMT, H-wCTS/MMT, LH-wCTS/MMT ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม เบสิกบลู เบสิกเยลโล่ และเอซิดเรด 91 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 mg/L พบว่า L-wCTS/MMT, H-wCTS/MMT มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกเยลโล่ 1 สูงสุดเท่ากับ 188.7 mg/L และ 294.1 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเป็นการดูดซับของวัสดุที่สอดคล้องตามสมการ Langmuir adsorption

โชติรส ประสานแสง (2557) ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาต่อลักษณะทางกายภาพและสมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของเส้นใยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยเตรียมเส้นใยนาโนได้จากสารละลายโพลีไวนิลไพโรลิโดน และไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ หลังการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 - 900 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดพอลิเมอร์ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อตัวเป็นผลึก

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเทคนิคการเลี้ยวของเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการทดลอง พบว่า เส้นใยนาโนที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 107 นาโนเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดอนุภาคของเส้นใยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผลิตได้ เส้นใยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันตั้งแต่ขนาด 17 นาโนเมตร - 164 นาโนเมตร และมีขนาดผลึกตั้งแต่ 15 นาโนเมตร - 87 นาโนเมตร ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง พบว่า เส้นใยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงจาก 2.8 eV เป็น 2.5 eV และมีค่าความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงเพิ่มขึ้น 0.00012 A/cm^2 เป็น 0.00032 A/cm^2 เมื่อวัดที่ potential 0.5 V หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานที่เล็กลงในเส้นใยนาโนที่มี TiO_2 ขนาดใหญ่ จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ข้ามไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้มากขึ้น เส้นใยนาโนที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก มีความโค้งผิวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการกระเจิงของแสงมากกว่า ดังนั้นค่ากระแสที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแสงที่วัดได้ในอนุภาคขนาดใหญ่ อาจเกิดจากการกระเจิงแสงที่ลดลงและอนุภาคสามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้มากขึ้น และมีการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ (Visible range)

ปวีวัชร นามด้วง (2559) ศึกษาการเตรียมแร่ออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) โดยตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซาน (CTS/MMT) และออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซาน (CTS/OMMT) และทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอคทีฟเรด 120 (RR120) จากสารละลายสีสังเคราะห์ วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับด้วยเครื่อง FTIR Autosorb SEM และ XRD ผลจากการวิเคราะห์พบว่าสารตัดแปรสามารถแทรกสอดเข้าไปในโครงสร้างของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ได้เป็นอย่างดี ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR120 ของ OMMT ในการทดลอง 2 สภาวะ คือการทดลองแบบกะและแบบหอบรรจุ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แร่ดิน OMMT มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสารละลาย RR120 ได้ โดยมีอัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 360 นาที ปริมาณการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิสูงขึ้น

ปิยวรรณ วงศ์สถาน (2559) ได้ทำการศึกษาการเตรียมเม็ดแอลจีเนตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับที่สามารถเกิดกระบวนการสลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงร่วมด้วย โดยเริ่มจากการเตรียมเม็ดแอลจีเนตและทำการศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ พบว่าเม็ดแอลจีเนตที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 3 % โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลที่ดี จึงเลือกสภาวะนี้ในการเตรียมเม็ดแอลจีเนตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อไป จากนั้นได้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ของเม็ดแอลจี

เน็ตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมต่อความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ่านกระบวนการดูดซับ (ภายใต้สภาวะมืด) ศึกษาอิทธิพลปริมาณนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และระยะเวลาการฉายรังสีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับ-การสลายตัวที่เร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสียูวีซี) ซึ่งพบว่า เม็ดแอลจีเน็ตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 30 % โดยน้ำหนักมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมสูงสุดในสภาวะมืด เท่ากับ 18.97 % ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 3 สำหรับสภาวะภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสียูวีซี พบว่า ความสามารถในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และระยะเวลาการฉายรังสีเพิ่มขึ้น โดยเม็ดแอลจีเน็ตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 30 % โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมสูงสุด เท่ากับ 97.82 % เมื่อระยะเวลาการฉายรังสี เท่ากับ 180 นาทีและค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 3

ธีระวิทย์ พลโคกกอง (2559) ศึกษาสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล และการกลั่นไหลกลับ และเพื่อเปรียบเทียบและศึกษาลักษณะเฉพาะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชื่อเรียกทางการ คำว่า P25 ชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีลักษณะที่เป็นอนุภาคนาโนเพื่อต้องการที่จะทราบถึง รายละเอียดของข้อมูลและคุณสมบัติจึงได้ทำการวิเคราะห์หลักลักษณะเฉพาะเพื่อยืนยันด้วยเทคนิค XRD, EDX, SEM, TEM, UV-VIS, Raman และ PL จากนั้นทำ การเตรียมฟิล์มบางของอนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล และการกลั่น ไหลกลับ รวมถึง P25 เพื่อประกอบเป็นเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในลำดับ ต่อมาทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ผลปรากฏว่าอนุภาค นาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มากที่สุดตามข้อมูล $V_{OC} = 0.497 \text{ V}$, $J_{SC} = 10.156 \text{ mA/cm}^2$ and $FF = 0.381$

Enederson Rossetto et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุ TiO_2 ในแร่ Bentonite ด้วยเทคนิคเปียกชุ่ม (Impregnation method) พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุด้วยเทคนิค XRD, SEM, IR, BET และ DRS ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวเฉลี่ยด้วยเทคนิค BET ของแร่เบนไนท์ คือ 76, 46, 80 และ 31 และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อแทรกอนุภาค TiO_2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงถึงการกระจายตัวได้ดีของ TiO_2 บนพื้นผิวของแร่เบนโทไนท์โดยไม่ทำลายโครงสร้างระหว่างชั้น จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู พบว่า วัสดุ $\text{TiO}_2/\text{Bentonite}$ มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายสีได้สูงกว่า TiO_2 ซึ่งเป็นผลจากการกระจายตัวของ TiO_2 ทำให้สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า

Daimei Chen et al. (2013) ได้สังเคราะห์วัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ โดยปรับปรุง Montmorillonite ด้วย cetyl-trimethyl ammoniumbromide (CTAB) แล้วเติม Ti-alkoxide

ลงไปใน Montmorillonite ที่ปรับปรุงแล้วโดยใช้สารละลายกรดเป็นตัวทำละลาย พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, FTIR, TEM, SEM และ TG-DTA ซึ่งผลการวิเคราะห์วัสดุผสมพบการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของ Montmorillonite ผลการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของวัสดุผสมในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู พบว่า วัสดุผสมมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงถึง 99% ภายในเวลา 60 นาที

Djellabi et al. (2014) ศึกษาปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ สำหรับย่อยสลายสีย้อมอินทรีย์ในน้ำ โดยสังเคราะห์วัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ (TiO_2/MMT) ด้วยเทคนิคเปียกชุ่ม (Impregnation method) จากการนำไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) ไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะได้โครงสร้างผลึกเป็นเฟสอนาเทสขนาดประมาณ 15-20 นาโนเมตร จากนั้น ศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีโดยทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงภายใต้รังสียูวีกับสีย้อมอินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ Cristal violet, Rhodamine B, Methylene blue, Methyl orange และ Congo Red โดยเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ซึ่งพบว่า $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของ Crystal violet ได้ดีที่สุด คือ 97.1 % และมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมทั้ง 5 ชนิดได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ในวัสดุ TiO_2/MMT ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และความสามารถในการดูดซับสีย้อมของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของสีย้อมได้ดียิ่งขึ้น

Hui Liang et al. (2017) ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงประสิทธิภาพสูงของวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ สังเคราะห์โดยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุและศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีโดยทดสอบการย่อยสลายเชิงแสงของ Methylene blue ภายใต้สภาวะรังสียูวี พบว่า $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ Methylene blue อย่างเห็นได้ชัด และ 90% $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของ Methylene blue ได้ดีที่สุดและมีคุณสมบัติที่แน่นอน ด้วยขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ซับซ้อนของวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Montmorillonite}$ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ มีโครงสร้างชั้นที่ชัดเจนมีคุณสมบัติในการดูดซับ ดังนั้น การแทรกอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเคมีในอุตสาหกรรมได้ดี

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมและมอนต์มอริลโลไนต์ ประกอบด้วยอุปกรณ์เครื่องมือ และวิธีการวิจัยตามลำดับ ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) รุ่น LEO/1450

3.1.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD) รุ่น Bruker/D8 Advance

3.1.3 เครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer : FT-IR) รุ่น Perkin Elmer Model Spectrum One

3.1.4 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrometer) รุ่น Perkin Elmer Lamda12

3.1.5 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) รุ่น IKA/C-MAG HS10

3.1.6 เครื่องเขย่าสาร (Shaker) รุ่น G560E Vortex Mixer Genie 2

3.1.7 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) รุ่น Bartorius BL210s

3.1.8 เครื่องระเหยแห้ง (Rotary evaporator) รุ่น Buchi R-124

3.1.9 เครื่องสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่อเนื่อง (Sohxlet)

3.1.10 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Hettich รุ่น Universal 16

3.1.11 ตู้อบ (Oven) รุ่น Memmert D06062

3.1.12 โถดูดความชื้น (Desicator)

3.1.13 เตาเผา (Furnace) รุ่น Nabertherm/LE 4/11

3.1.14 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)

3.1.15 ปีกเกอร์ (Beaker)

3.1.16 ปิเปตต์ (Pipette)

- 3.1.17 หลอดทดลอง (Test tube)
- 3.1.18 หลอดหยด (Dropper)
- 3.1.19 หลอดเซนติฟิวจ์ (Centrifuge tube)
- 3.1.20 หลอดยูวี (UV lamp)

3.2 วัสดุและสารเคมี

- 3.2.1 เปลือกกล้วยหอม
- 3.2.2 เอทานอล (Ethanol)
- 3.2.3 เมทิลีนบลู (Methylene blue)
- 3.2.4 เมทานอล (Methanol \geq 99.9%)
- 3.2.5 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite : MMT)
- 3.2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2)

3.3 การเตรียมสารละลาย

สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm

3.4 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.4.1 การสกัดสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม

3.4.1.1 นำเปลือกกล้วยหอมมาทำความสะอาดแล้วตากให้แห้ง ตัดเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้ววางทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3.4.1.2 ชั่งเปลือกกล้วยหอมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน นำไปใส่ในทิมเบล (Thimble) ทิมเบลละ 30 กรัม สกัดด้วยชุดสกัดต่อเนื่อง (Soxhlet Extraction) 4 ครั้ง โดยใช้เมทานอล (methanol) เป็นตัวทำละลาย

3.4.1.3 ใช้เวลาสำหรับการสกัดประมาณ 4 ชั่วโมง

3.4.1.4 นำสารสกัดที่ได้ไประเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบลดความดัน (Rotary evaporator) ได้สารสกัดหยาบ ซึ่งมีสารกลุ่มฟลาโวนอยด์

3.4.2 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO₂NPs)

3.4.2.1 นำ Titanium dioxide (Carlo Erba' reagent) 5 กรัม ไปอบไล่ความชื้นที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.2.2 เฝ้า Titanium dioxide ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

3.4.2.3 นำอนุภาค Titanium dioxide ไปวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะผลึกด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR

3.4.3 การเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂/MMT) (Hui Liang et al., 2017)

3.4.3.1 นำ montmorillonite 0.6 กรัม มาบดผสมกับ Titanium dioxide ปริมาณ 0.024, 0.030 และ 0.036 กรัม แล้วละลายด้วย ethanol ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3.4.3.2 นำสารผสมไปกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.3.3 นำสารผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จะได้วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂/MMT) ในอัตราส่วน คือ 40%, 50% และ 60% (40%TiO₂/MMT 50%TiO₂/MMT และ 60%TiO₂/MMT)

3.4.4 การเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂&Fla/MMT)

3.4.4.1 นำ montmorillonite ปริมาณ 0.6 กรัม มาบดผสมกับ Titanium dioxide ปริมาณ 0.024, 0.030 และ 0.036 กรัม แล้วละลายด้วย ethanol ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3.4.4.2 นำไปกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.4.3 นำสารผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จะได้วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂/MMT) ในอัตราส่วน คือ 40%, 50% และ 60% (40%TiO₂/MMT 50%TiO₂/MMT และ 60%TiO₂/MMT)

3.4.4.4 เติมสารสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยหอมปริมาณ 0.02 กรัม ลงในสารผสม แล้วละลายด้วย ethanol ปริมาณ 30 มิลลิลิตร จากนั้นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.4.5 นำวัสดุผสมไปกรองและล้างด้วย ethanol ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ อัตราส่วน 40%, 50% และ 60% (40%TiO₂&Fla/MMT 50%TiO₂&Fla/MMT และ 60%TiO₂&Fla/MMT)

3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุผสม

พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุผสมที่ได้จากการเตรียม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) เทคนิคฟูเรียร์สฟอร์มนอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) และวิเคราะห์พื้นผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันเมทิลีนบลู

ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์และวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ โดยเครื่อง UV-Vis spectrometer

3.6.1 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีเมทิลีนบลู

3.6.1.1 ชั่งวัสดุ TiO_2 , MMT, TiO_2/MMT และ $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ ปริมาณ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3.6.1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

3.6.1.3 เก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที 60 นาที 120 นาที 180 นาที และ 240 นาที โดยศึกษาในสภาวะที่มีมืด

3.6.1.4 แยกส่วนสารละลายตัวอย่างโดยหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

3.6.1.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร และคำนวณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน

3.6.2 ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันเมทิลีนบลู

3.6.2.1 ชั่งวัสดุ TiO_2 , MMT, TiO_2/MMT และ $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ ปริมาณ 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3.6.2.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

3.6.2.3 เก็บตัวอย่างที่เวลา 30 นาที 60 นาที 120 นาที 180 นาที และ 240 นาที โดยแยกศึกษาในสภาวะแสงธรรมชาติและแสงยูวี

3.6.2.4 แยกส่วนสารละลายตัวอย่างโดยหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

3.6.2.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร และ
คำนวณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

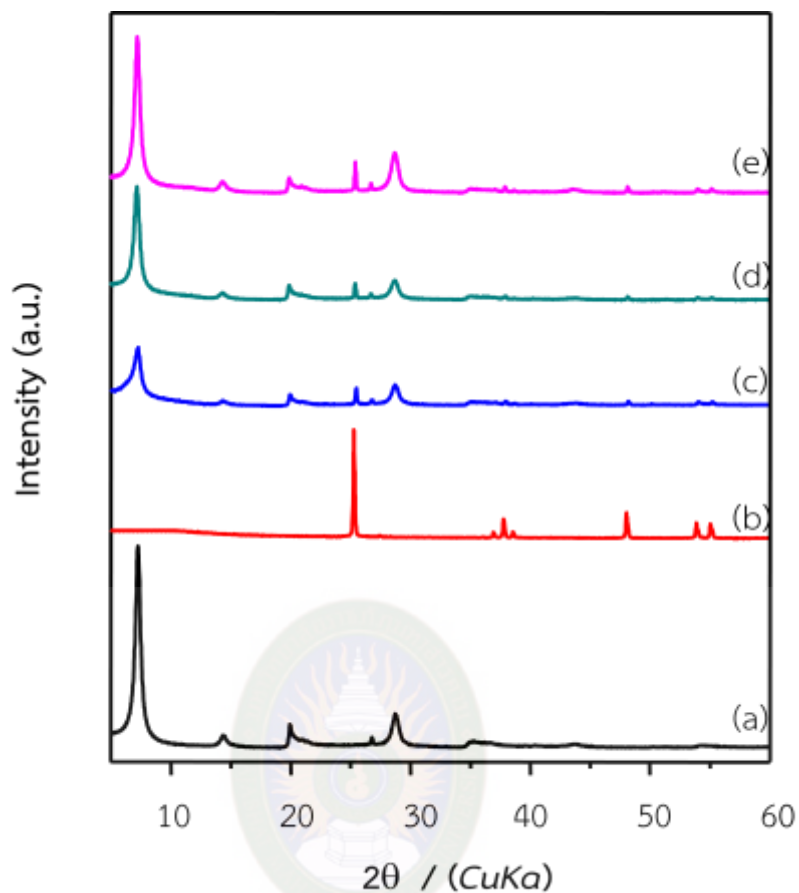
จากการทดลองการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์ จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น พิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุผสมที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD, เทคนิค FT-IR และ เทคนิค SEM และศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสมโดยปฏิกิริยาการย่อยสลาย สีของสารละลายเมทิลีนบลู แสดงผลการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

4.1.1 การวิเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO_2/MMT)

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างผลึกของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ แสดงไว้ดังภาพที่ 4.1(a) พบพีคหลักที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.25° สอดคล้องกับ ครรชนีระนาบผลึก 001 มีค่าระยะห่างระหว่างระนาบ 1.24 นาโนเมตร และปรากฏพีครอง ที่ 14.35° , 19.95° , 28.73° และ 35.23° สอดคล้องกับค่าครรชนีระนาบผลึก 002, 100, 101 และ 105 ตามลำดับ แสดงลักษณะโครงสร้างของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อเทียบกับฐานข้อมูล JCDPS Card No. 003-0010 (Etcheverry, Cappa, Trelles & Zanini, 2017, p. 5870)

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้จากการเผาที่ อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากภาพที่ 4.1(b) พบพีคหลัก ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.29° , 37.79° , 48.03° , 53.86° และ 55.03° สัมพันธ์กับค่าครรชนีระนาบ ผลึก 101, 004, 200, 105 และ 211 ตามลำดับ แสดงลักษณะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็น อะนาเทส เมื่อเทียบกับฐานข้อมูล JCDPS Card No. 21-1272 (Sun, Peng, Liu & Zian, 2015, p. 442) ปรากฏความเป็นของแข็งอัญฐานที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นไปตามสมการของ Scherrer มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (Hassani, Khataee, Karaca & Gholami, 2017, p. 253)



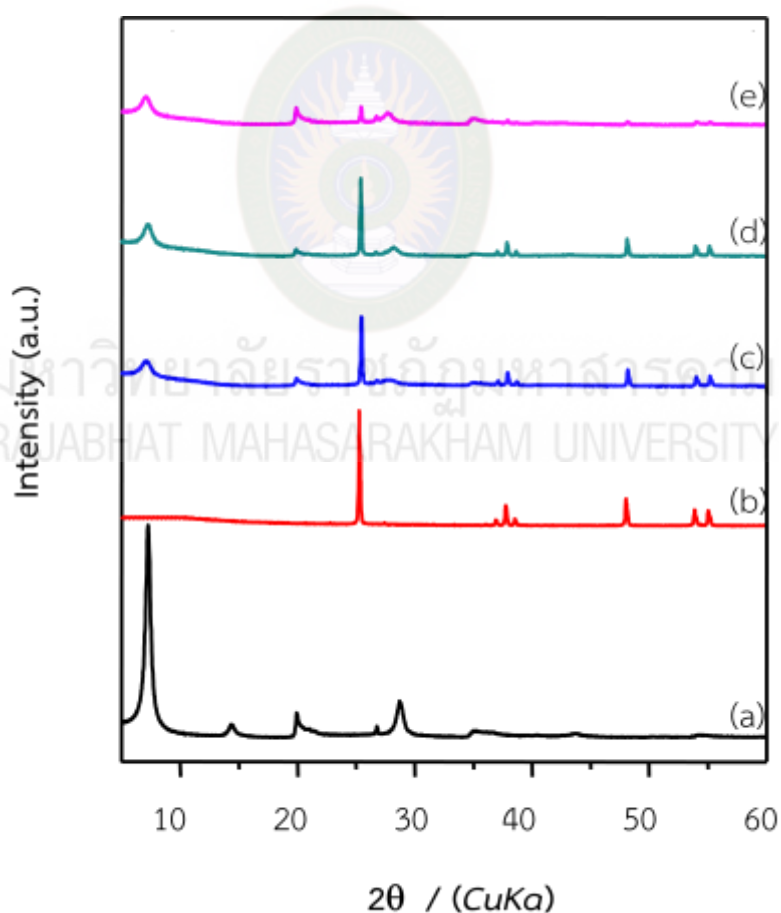
ภาพที่ 4.1 XRD patterns ของ MMT(a), TiO_2 (b), 40% TiO_2 /MMT(c), 50% TiO_2 /MMT(d) และ 60% TiO_2 /MMT(e)

ภาพที่ 4.1 (c-e) แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุผสม TiO_2 /MMT ที่เตรียมได้จากการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากภาพที่ 4.1(e) แสดงผลการวิเคราะห์ของวัสดุผสม 60% TiO_2 /MMT ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.21° , 19.91° และ 28.71° แสดงคุณลักษณะของแรมอนต์มอริลโลไนต์ (Huo et al., 2018, p. 123) นอกจากนี้ยังพบพีคที่ 25.41° , 37.89° และ 48.41° แสดงลักษณะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็นอะนาเทส พบพีคที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันในวัสดุผสม 40% TiO_2 /MMT และ 50% TiO_2 /MMT ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.1 (c-d) ซึ่งยืนยันคุณลักษณะ TiO_2 และ MMT ในวัสดุผสม TiO_2 /MMT (Hassani et al., 2017, p. 253) ที่เตรียมได้ จากข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่า อัตราส่วนที่ต่างกันของ TiO_2 ในวัสดุผสม ทำให้ความเข้มข้นของพีคที่ตำแหน่ง 2θ ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก MMT ควบคุมการกระจายตัวของ

อนุภาค TiO_2 อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้าง

4.1.2 การวิเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ($\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$)

ภาพที่ 4.2(c-e) แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของวัสดุผสม $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ที่เตรียมได้จากการเติมสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในวัสดุผสม TiO_2/MMT จากภาพที่ 4.2(e) แสดงผลการวิเคราะห์ของวัสดุผสม 60% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.09° , 19.91° , และ 27.66° เป็นลักษณะโครงสร้างแรมมอนต์มอริลโลไนต์ และพบพิกที่ 25.43° , 37.93° และ 48.16° เป็นลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงถึงการผสมกันระหว่าง TiO_2 กับ MMT ในวัสดุผสม $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$



ภาพที่ 4.2 XRD patterns ของ MMT(a), TiO_2 (b), 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ (c), 50% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ (d) และ 60% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ (e)

ข้อมูลตารางที่ 4.1 พบว่า MMT ปรากฏ พีคหลักที่ 7.25° ในขณะที่วัสดุผสม $\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$ อัตราส่วน 40%, 50% และ 60% พบพีคหลักที่ 7.11° , 7.19° และ 7.09° ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ระนาบผลึก 001 ของ MMT มีค่าสูงขึ้นตามลำดับคือ $60\%\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$, $40\%\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$ และ $50\%\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$ สอดคล้องกับพีคแสดงลักษณะของ TiO_2 ใน $60\%\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$ มีค่าน้อยที่สุด น่าจะเป็นผลจาก TiO_2 และสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมแทรกเข้าไปภายในรูพรุนของ MMT ส่งผลให้ไม่ปรากฏพีคของสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม

ตารางที่ 4.1

ตำแหน่งมุมของพีคและระนาบผลึกของ MMT, TiO_2 , วัสดุผสม $\text{TiO}_2\&\text{MMT}$ และวัสดุผสม $\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$ โดยเทคนิค XRD

ระนาบผลึก	$2\theta / (\text{CuK}\alpha)$							
	MMT	TiO_2	$\text{TiO}_2\&\text{MMT}$			$\text{TiO}_2\&\text{Fla/MMT}$		
			40%	50%	60%	40%	50%	60%
001	7.25°		7.27°	7.17°	7.21°	7.11°	7.19°	7.09°
002	14.35°							
100	19.95°		19.93°	19.87°	19.91°	19.91°	19.91°	19.91°
101	28.73°		28.73°	28.71°	28.71°	27.89°	28.23°	27.66°
105	35.23°							
101		25.29°	25.47°	25.37°	25.41°	25.45°	25.41°	25.43°
004		37.79°	37.95°	37.95°	37.89°	37.93°	37.89°	37.93°
200		48.03°	48.18°	48.12°	48.41°	48.20°	48.14°	48.16°
105		53.86°						
211		55.03°						

4.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)

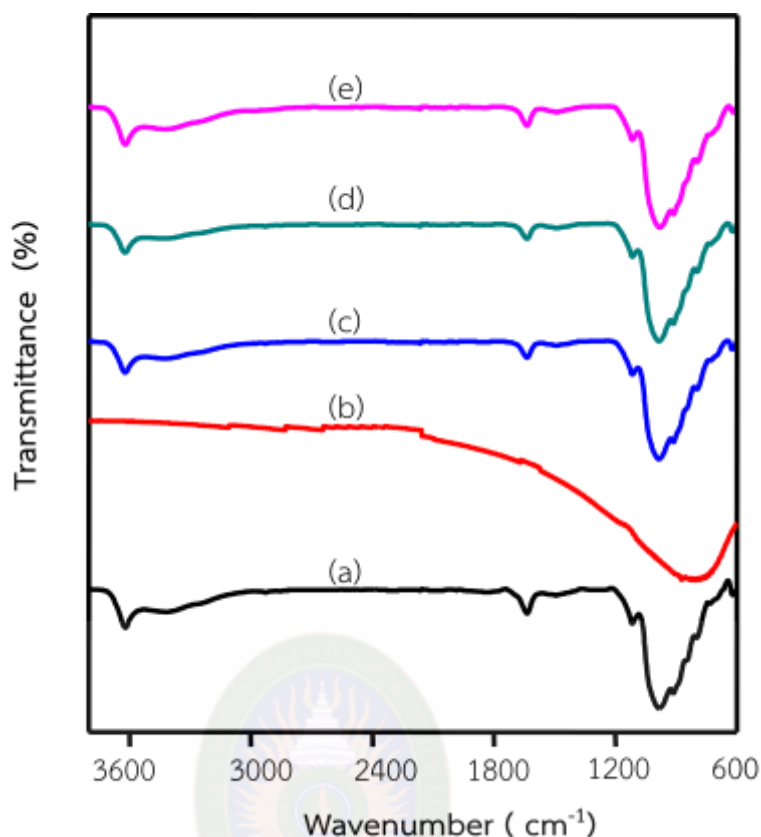
4.2.1 การวิเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ ($\text{TiO}_2\&\text{MMT}$)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีของมอนต์มอริลโลไนต์ ช่วงเลขคลื่น $600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ จากภาพที่ 4.3a ปรากฏพีคที่ความยาวคลื่น

ประมาณ 3620 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ Al-OH stretching ของหมู่ OH (Liu, Li, Zuo & Yu et al., 2007, pp. 277-278) ส่วนที่เลขคลื่น 1635 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H bending ในโมเลกุลของ H_2O และที่เลขคลื่น 983 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบ Si-O-Si stretching ในหมู่ไฮดรอกซิล

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการเผาที่อุณหภูมิ $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ช่วงเลขคลื่น $600 - 4000\text{ cm}^{-1}$ แสดงไว้ดังภาพที่ 4.3b ปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ 788 cm^{-1} ลักษณะพีคกว้างเป็นตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ Ti-O stretching ของ หมู่ TiO_2 (Liu, Jian, Fang, Xu, Zhu & Wu, 2011, p. 5)

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม TiO_2/MMT ในช่วงเลขคลื่น $600 - 4000\text{ cm}^{-1}$ จากภาพที่ 4.3(c-e) แสดงข้อมูลความถี่และชนิดการสั่นพันธะวัสดุผสม $40\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$, $50\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$ และ $60\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$ ปรากฏพีคในช่วงเลขคลื่น 985 cm^{-1} , 985 cm^{-1} และ 979 cm^{-1} ตามลำดับ เป็นตำแหน่งความถี่และชนิดการสั่นในโมเลกุล Ti-O-Si stretching ที่เกิดจากการรวมตัวระหว่าง MMT และ TiO_2 ในระหว่างการสังเคราะห์วัสดุผสม TiO_2/MMT แสดงให้เห็นถึงการผสมกันระหว่าง TiO_2 กับ MMT เกิดเป็นวัสดุผสม TiO_2/MMT (Jianjun Liu et al., 2007, p. 278) จากการวิเคราะห์วัสดุผสม TiO_2/MMT ด้วยเทคนิค FT-IR สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าที่เลขคลื่น 985 cm^{-1} ในวัสดุผสม $40\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$ และ $50\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$ ในขณะที่ $60\%\text{TiO}_2/\text{MMT}$ ปรากฏเลขคลื่นที่ 979 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบ Ti-O-Si stretching ซึ่งจะพบว่า สเปกตรัมเกิดการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ลดลงจากความยาวคลื่นเดิมเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิด hypsochromic หรือ blue-shift ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสั้นลง

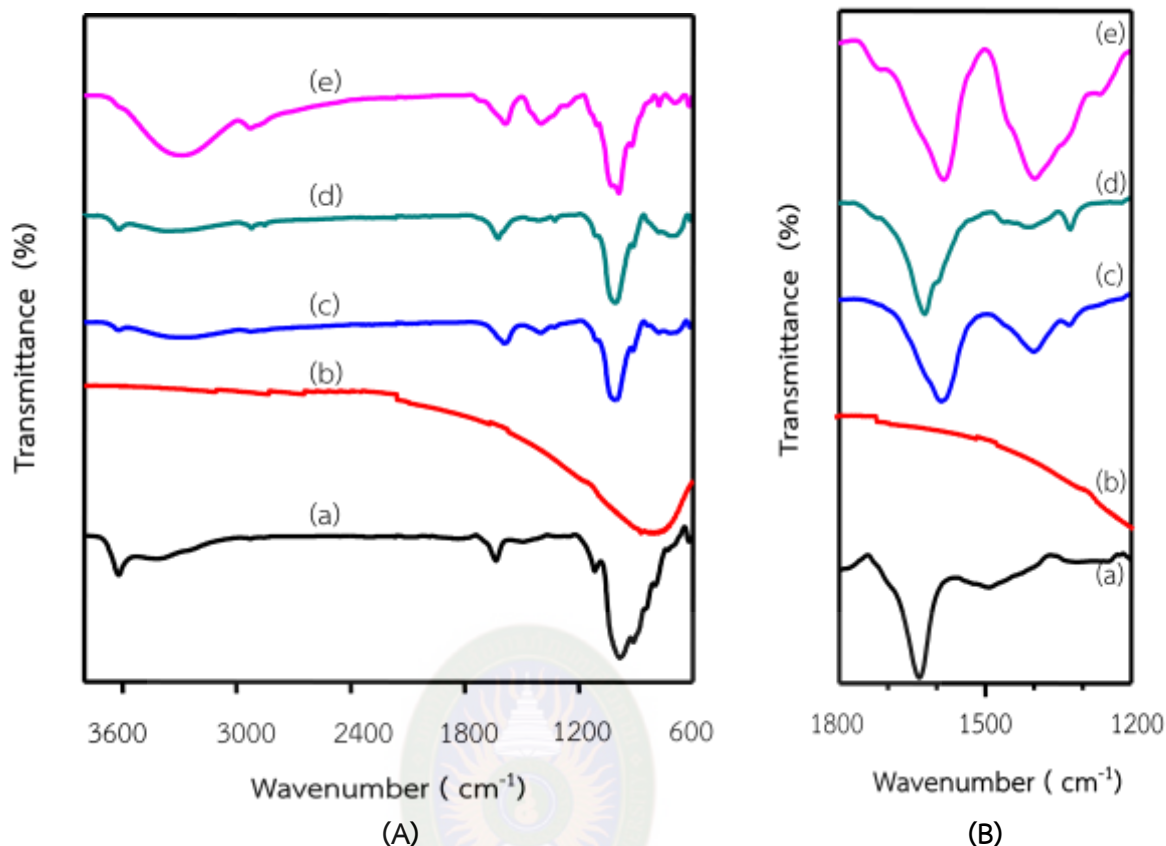


ภาพที่ 4.3 FT-IR patterns ของ MMT(a), TiO_2 (b), 40% TiO_2 /MMT(c), 50% TiO_2 /MMT(d) และ 60% TiO_2 /MMT(e)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

4.2.2 การวิเคราะห์วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์ จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO_2 &Fla/MMT)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT ที่ได้จากการเติมสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอมในวัสดุผสม TiO_2 /MMT แสดงไว้ดังภาพที่ 4.4(A)(c-e) พบพีคของวัสดุผสม 40% TiO_2 &Fla/MMT, 50% TiO_2 &Fla/MMT และ 60% TiO_2 &Fla/MMT ที่เลขคลื่น 1006 cm^{-1} , 1008 cm^{-1} และ 987 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะการสั่น Ti-O-Si stretching ของวัสดุผสม TiO_2 /MMT ที่เลขคลื่น $694 - 717\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ Ti-O stretching ที่เลขคลื่น $1585 - 1624\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ C=C (Donoldi, Paolo & Flego, 2016, p. 16) ในวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) (Rangel, Munoz, Rodriguez, Lazcano & Solans, 2017, p. 65) และที่เลขคลื่น $2920 - 2027\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดของ C-H stretching ของอะโรมาติก (Boutoumi, Boutoumi, Khalaf & David, 2013, p. 58)



ภาพที่ 4.4 FT-IR patterns (A) ช่วง $600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ และ (B) ขยายช่วง $1200 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ ของ MMT(a), TiO_2 (b), 40% TiO_2 &Fla/MMT(c), 50% TiO_2 &Fla/MMT(d) และ 60% TiO_2 &Fla/MMT(e)

ภาพที่ 4.4(B)(c-e) แสดงสเปกตรัมวัสดุผสม 40% TiO_2 &Fla/MMT, 50% TiO_2 &Fla/MMT และ 60% TiO_2 &Fla/MMT ที่เพิ่มกำลังขยายในช่วง $1200 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีคเล็กๆ ที่เลขคลื่นประมาณ $1398 - 1407 \text{ cm}^{-1}$ แสดงสเปกตรัมของ C-H bending ในสารสกัดจากเปลือกกล้วยหอม (Bueno, Bocanegra, Rooney & Hierro, 2017, p. 607) ประกอบด้วยกลุ่มฟีนอลิก (phenolic) และฟลาโวนอยด์ (flavonoids) (Vu, scarlett & Vuong, 2018, p. 242) โดยข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่และชนิดการสั่นพ้องของวัสดุผสมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งยืนยันคุณลักษณะของ TiO_2 , MMT และสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT ที่เตรียมได้

ตารางที่ 4.2

ความถี่และชนิดการสั่นพ้องของ MMT, TiO_2 , วัสดุผสม TiO_2/MMT และวัสดุผสม $TiO_2&Fla/MMT$ โดยเทคนิค FT-IR

Assignments	Wavenumber (cm^{-1})							
	MMT	TiO_2	TiO_2/MMT			$TiO_2&Fla/MMT$		
			40%	50%	60%	40%	50%	60%
Ti-O	-	788	-	-	-	717	713	694
Si-O-Si	983	-	-	-	-	-	-	-
-OH	1635	-	1635	1635	1635	-	-	-
Al-OH	3620	-	3620	3620	3620	3618	3620	3280
Ti-O-Si			985	985	979	1006	1008	987
C-H	-	-	-	-	-	1400	1407	1398
C=C	-	-	-	-	-	1591	1624	1585
C-H (aliphatic)	-	-	-	-	-	2922	2850	2927

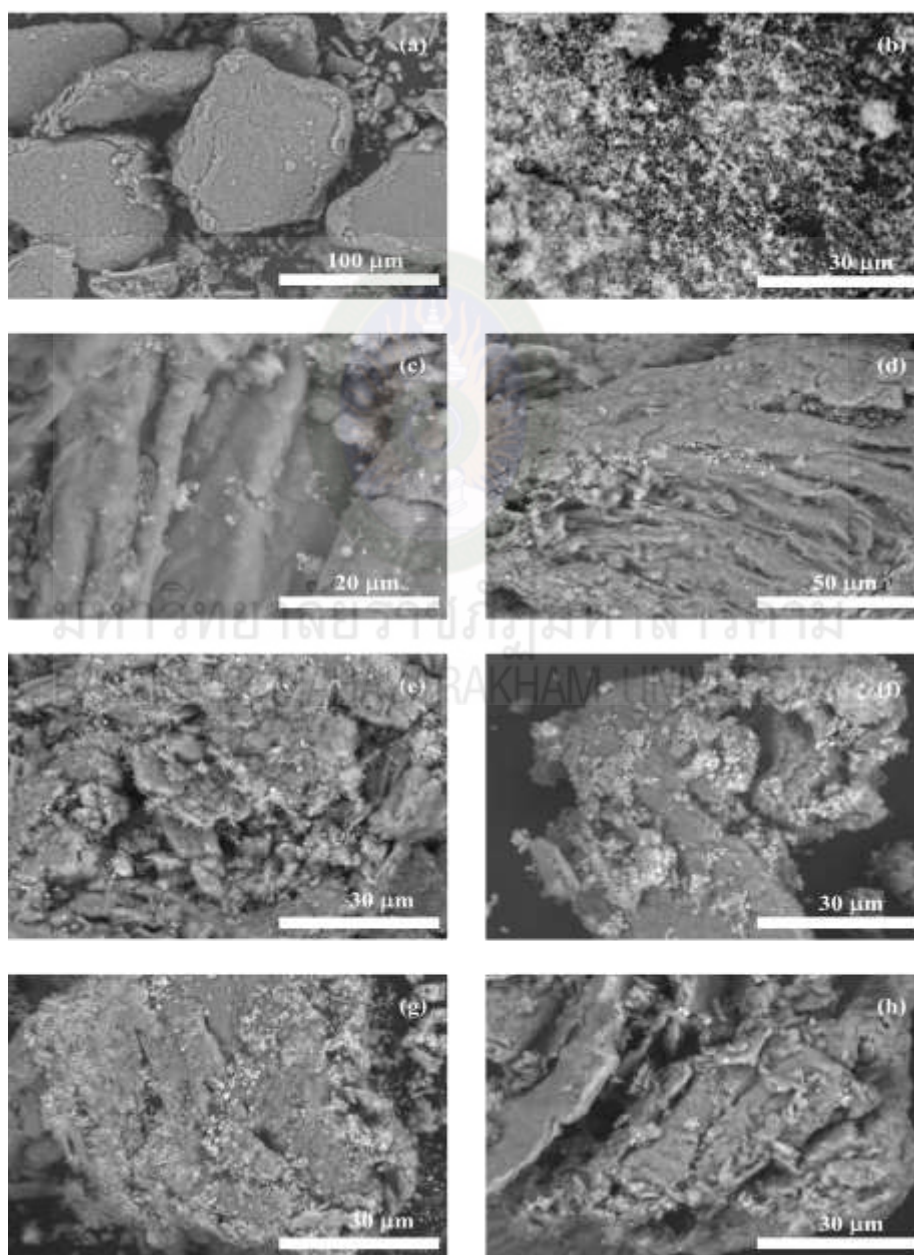
4.3 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.3.1 การวิเคราะห์วัสดุผสม TiO_2/MMT และวัสดุผสม $TiO_2&Fla/MMT$

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค SEM จากภาพที่ 4.5(a) แสดงผลจากการวิเคราะห์พบว่าพื้นผิวภายนอกของมอนต์มอริลโลไนต์ ลักษณะของมอนต์มอริลโลไนต์เกาะกลุ่มรวมกันเป็นชั้นบางๆ มีการเรียงตัวของแผ่นที่เป็นระเบียบสลับกับที่ไม่เป็นระเบียบในระหว่างชั้น (Carlos Saenz Ezquerro et al, 2015, p. 8) ขนาดอนุภาคไม่แน่นอน (Hassani et al, 2017, p. 152) โครงสร้างพื้นผิวเรียบ และมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดนาโนเมตรทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นจำนวนมาก (Djellabi et al, 2014, p. 60) ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุคอมโพสิต และพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิตใช้สำหรับย่อยสลายสีของสารอินทรีย์และของเสียในน้ำ

เมื่อนำวัสดุผสมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ไปทดสอบด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM) จากภาพที่ 4.5(c-e) จะเห็นว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งแสดงขนาดอนุภาคในช่วง 40-60 นาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของไทเทเนียมที่อยู่

บริเวณพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดเล็ก มีการกระจายอย่างเหมาะสมและรวมตัวกันในลักษณะเป็นก้อนอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสของไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้มากยิ่งขึ้น (Chen, Zhu, Zhou, Deng & Li. 2012, p. 151) และจะเห็นได้ว่าวัสดุผสม 40%TiO₂/MMT อนุภาคของ TiO₂ สามารถกระจายได้ทั่วพื้นผิวของ MMT แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ เป็น 50% และ 60% โดยน้ำหนัก อนุภาคของ TiO₂ จะอุดขั้ที่พื้นผิวของ MMT ส่งผลให้ TiO₂ เกิดการรวมตัวลดการกระจายบนพื้นผิวของ MMT



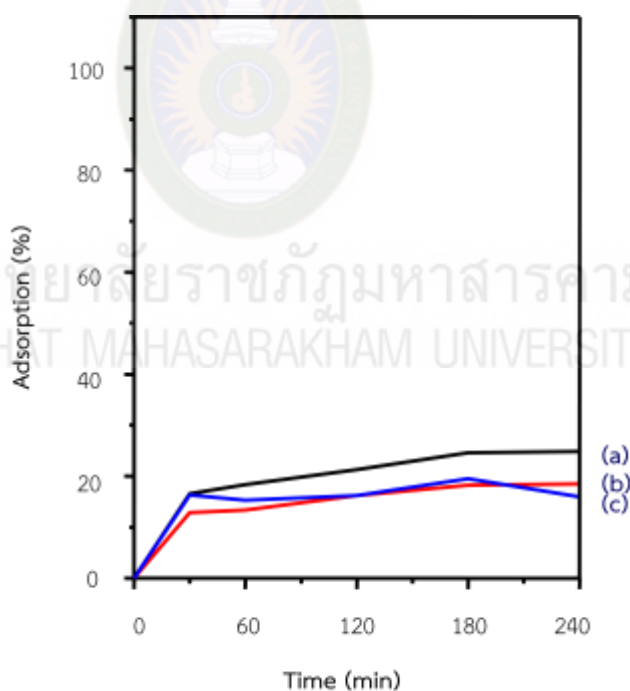
ภาพที่ 4.5 SEM แสดงลักษณะ MMT(a), TiO₂(b), 40%TiO₂/MMT(c), 50%TiO₂/MMT(d), 60%TiO₂/MMT(e), 40%TiO₂&Fla/MMT(f), 50%TiO₂&Fla/MMT(g), 60%TiO₂&Fla/MMT(h)

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลู

ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm โดยทดสอบด้วยวัสดุ TiO_2 , MMT, วัสดุผสม TiO_2/MMT และวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ ได้ผลการทดสอบดังข้อมูลต่อไปนี้

4.4.1 การดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายในที่มีด

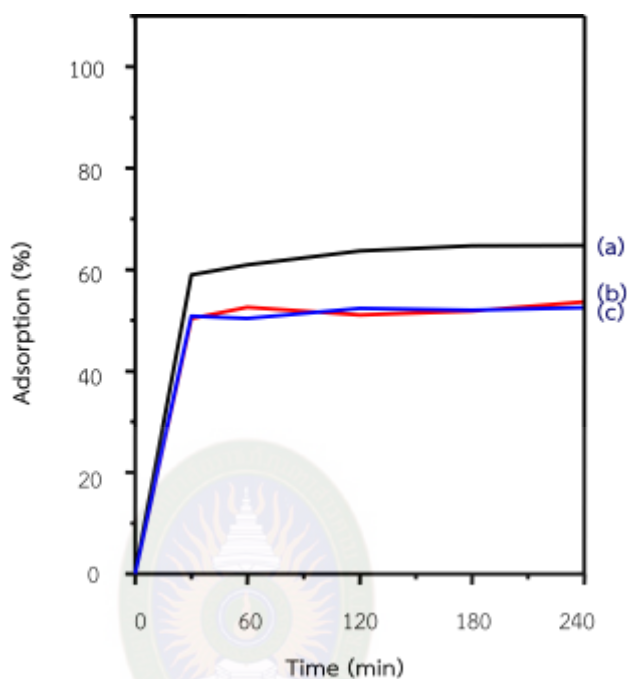
ผลการทดสอบการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วยวัสดุผสม 40% TiO_2/MMT , 50% TiO_2/MMT และ 60% TiO_2/MMT ภายใต้สภาวะที่มีด ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า วัสดุผสม 40% TiO_2/MMT มีความสามารถดูดซับสีสารละลายได้สูงสุด คือ ร้อยละ 16.61 ที่เวลา 30 นาที และอัตราการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มคงที่ ที่เวลา 180 นาที



ภาพที่ 4.6 การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40% TiO_2/MMT (a), 50% TiO_2/MMT (b) และ 60% TiO_2/MMT (c) ภายในที่มีด

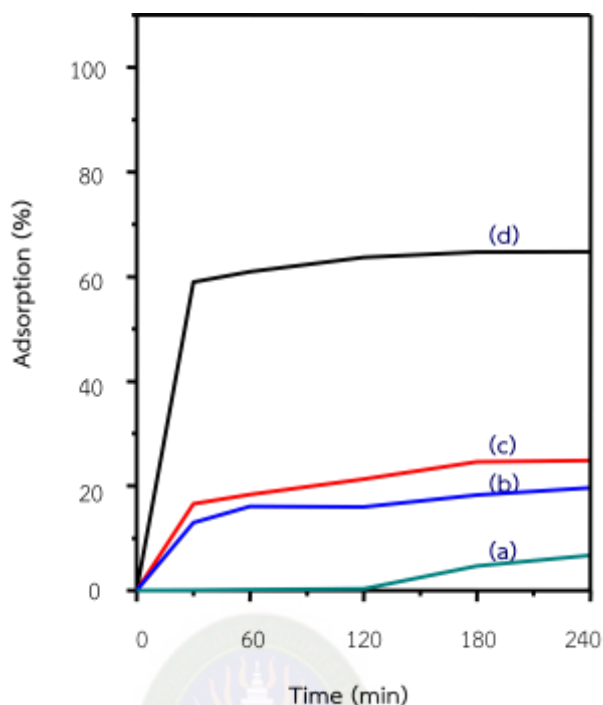
จากภาพที่ 4.7 แสดงผลการการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วยวัสดุผสม 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$, 50% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ และ 60% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$

ภายใต้สภาวะที่มีด พบว่า วัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT มีความสามารถดูดซับสีสารละลายได้สูงสุดคือร้อยละ 58.94 ที่เวลา 30 นาที สูงกว่า 50%TiO₂&Fla/MMT และ 60%TiO₂&Fla/MMT



ภาพที่ 4.7 การดูดซับสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40%TiO₂&Fla/MMT(a), 50%TiO₂&Fla/MMT(b) และ 60%TiO₂&Fla/MMT(c) ภายในที่มีด

จากภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วยวัสดุ TiO₂, MMT, วัสดุผสม 40%TiO₂/MMT และ วัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT ภายใต้สภาวะที่มีด พบว่าวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT สามารถดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงสุดร้อยละ 58.94 ที่เวลา 30 นาที รองลงมาคือวัสดุผสม 40%TiO₂/MMT มีความสามารถดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูร้อยละ 16.61 ในขณะที่ MMT และ TiO₂ มีความสามารถดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูร้อยละ 12.94 และ 0.05 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2 /MMT(c) และ 40% TiO_2 &Fla/MMT(d) ภายในที่มีด

จากผลการศึกษาสามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม TiO_2 /MMT และ TiO_2 &Fla/MMT ที่เตรียมได้ มีความสามารถในการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติของ MMT ซึ่งเป็นวัสดุรูพรุนจึงสามารถดูดซับสีของสารละลายไว้ในรูพรุน อีกทั้งการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 และสารชีวโมเลกุลที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอมใน MMT ทำให้ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของ MMT เพิ่มขึ้น จึงช่วยเพิ่มความสามารถการดูดซับได้ดีขึ้น (Liang et al, 2017, p. 47) ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ในวัสดุผสมพบว่าอนุภาคของ TiO_2 มีแนวโน้มเกาะเป็นก้อนส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสีของเมทิลีนบลู การเตรียมวัสดุผสมที่อัตราส่วน 40% ของ TiO_2 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ MMT และเมื่อเตรียมวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT พบว่า มีค่าการดูดซับสูงขึ้น แสดงว่า flavonoid สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้ และการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารกลุ่มสกัดฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริไลนด์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ดี

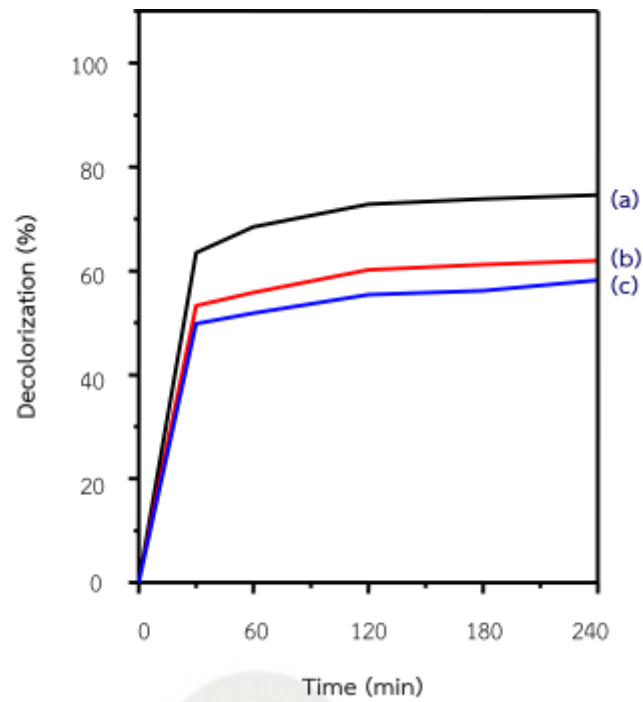
ตารางที่ 4.3

ร้อยละการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 , MMT, วัสดุผสม TiO_2/MTT และวัสดุผสม $TiO_2&Fla/MTT$ ภายในที่มีด

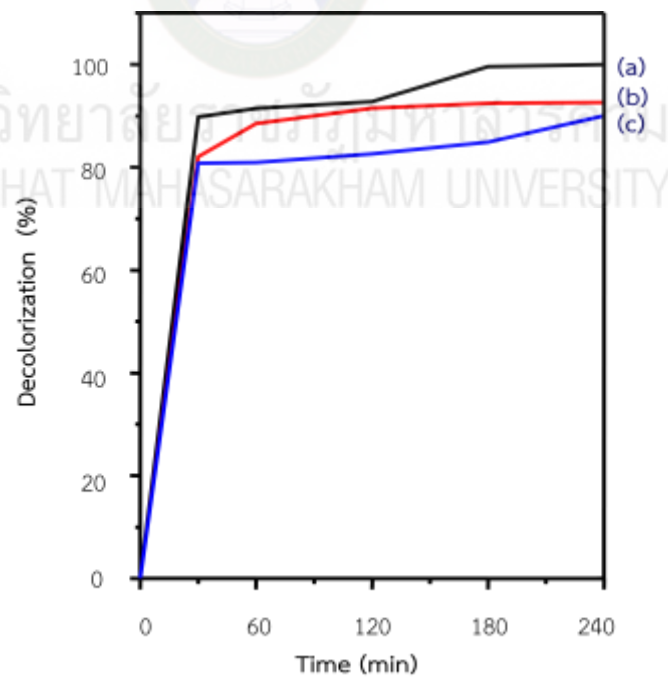
เวลา (นาทึ)	ร้อยละการดูดซับสีสารละลายเมทิลีนบลู							
	TiO_2	MMT	TiO_2/MTT			$TiO_2&Fla/MTT$		
			40%	50%	60%	40%	50%	60%
30	0.05	12.94	16.61	12.82	16.35	58.94	50.34	50.85
60	0.18	16.10	18.38	13.32	15.34	60.96	52.55	50.40
120	0.30	15.98	21.28	16.23	16.23	63.68	51.04	52.36
180	4.73	18.25	24.57	18.25	19.51	64.69	51.79	51.98
240	6.75	19.64	24.82	18.50	15.98	64.75	53.63	52.49

4.4.2 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายในแสงจากธรรมชาติ

การศึกษาผลของ TiO_2 ใน MMT ต่อความสามารถการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของเมทิลีนบลู โดยทำการศึกษาวัสดุผสมที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน คือ 40% TiO_2/MTT , 50% TiO_2/MTT และ 60% TiO_2/MTT ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4.9 พบว่าทุกอัตราส่วนของ TiO_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้อย่างสมบูรณ์ใน 240 นาที โดย 40% TiO_2/MTT สามารถย่อยสลายได้สูงสุดที่ร้อยละ 74.62 ในขณะที่ 50% TiO_2/MTT และ 60% TiO_2/MTT สามารถย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 61.92 และ 58.19 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของ TiO_2 ใน MMT ได้ดีที่สุดคือ 40% TiO_2/MTT เนื่องจากมีการกระจายของ TiO_2 บนพื้นผิวของ MMT ได้อย่างสม่ำเสมอที่สุด

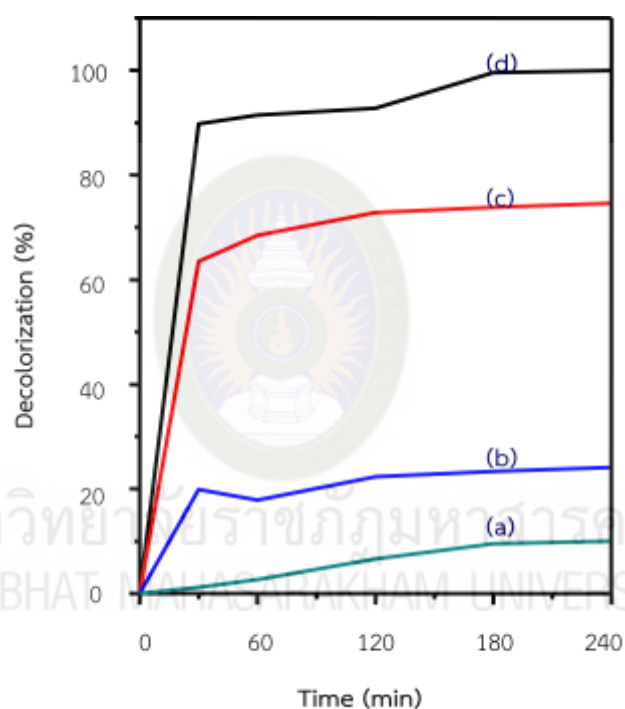


ภาพที่ 4.9 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40%TiO₂/MMT(a), 50%TiO₂/MMT(b) และ 60%TiO₂/MMT(c) ภายในแสงจากธรรมชาติ



ภาพที่ 4.10 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40%TiO₂&Fla/MMT(a), 50%TiO₂&Fla/MMT(b) และ 60%TiO₂&Fla/MMT(c) ภายในแสงจากธรรมชาติ

ทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ อัตราส่วน 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$, 50% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ และ 60% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ ภายใต้สภาวะแสงจากธรรมชาติ แสดงผลดังภาพที่ 4.10 ซึ่งพบว่าที่เวลา 240 นาที วัสดุผสม $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ ทุกอัตราส่วนสามารถย่อยสลายสีของสารละลายได้อย่างสมบูรณ์ โดย 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุดคือร้อยละ 99.95 ในขณะที่วัสดุผสม 50% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ และ 60% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุดคือร้อยละ 92.56 และ 90.03 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ มีประสิทธิภาพย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบการย่อยสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2/MMT (c) และ 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ (d) ภายในแสงจากธรรมชาติ

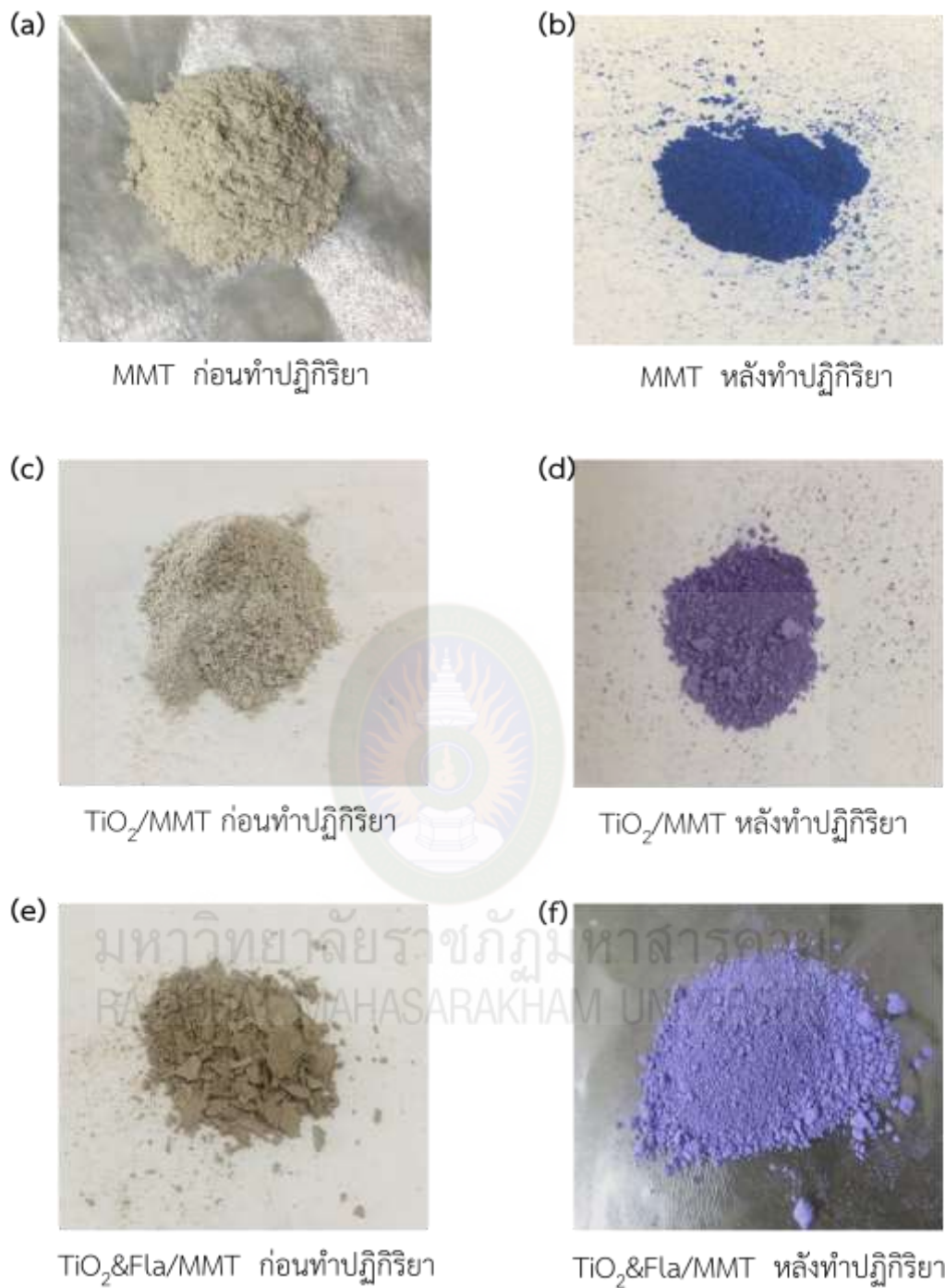
จากภาพที่ 4.11 และข้อมูลตารางที่ 4.4 แสดงผลทดสอบการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วยวัสดุ TiO_2 , MMT, 40% TiO_2/MMT และ 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ โดยทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะแสงจากธรรมชาติ พบว่า 40% $\text{TiO}_2/\text{Fla}/\text{MMT}$ มีอัตราการย่อยสลายได้สูงสุด โดยสามารถย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลา 240 นาที ได้ร้อยละ 99.95 รองลงมาคือ 40% TiO_2/MMT มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ร้อยละ 74.62 ในขณะที่ MMT มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ร้อยละ 24.06 และ TiO_2 มี

ความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ร้อยละ 10.04 แสดงให้เห็นว่า 40%TiO₂&Fla/MMT มีประสิทธิภาพย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูได้มากกว่า 40%TiO₂/MMT ถึงร้อยละ 25.33 แสดงว่าสารฟลาโวนอยด์ที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสม เนื่องจากสารฟลาโวนอยด์มีความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน โดยทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ (Heim, Tagliaferro & Bobilya, 2002, p. 576) ให้กับ TiO₂ ในวัสดุผสม ในขณะที่เดียวกันวัสดุผสม 50%TiO₂&Fla/MMT และ 60%TiO₂&Fla/MMT มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้เกือบหมด คือร้อยละ 92.56 และ 90.03 จึงเห็นได้ว่าวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด

ตารางที่ 4.4

ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO₂, MMT, วัสดุผสม TiO₂/MMT และวัสดุผสม TiO₂&Fla/MMT ภายในแสงจากธรรมชาติ

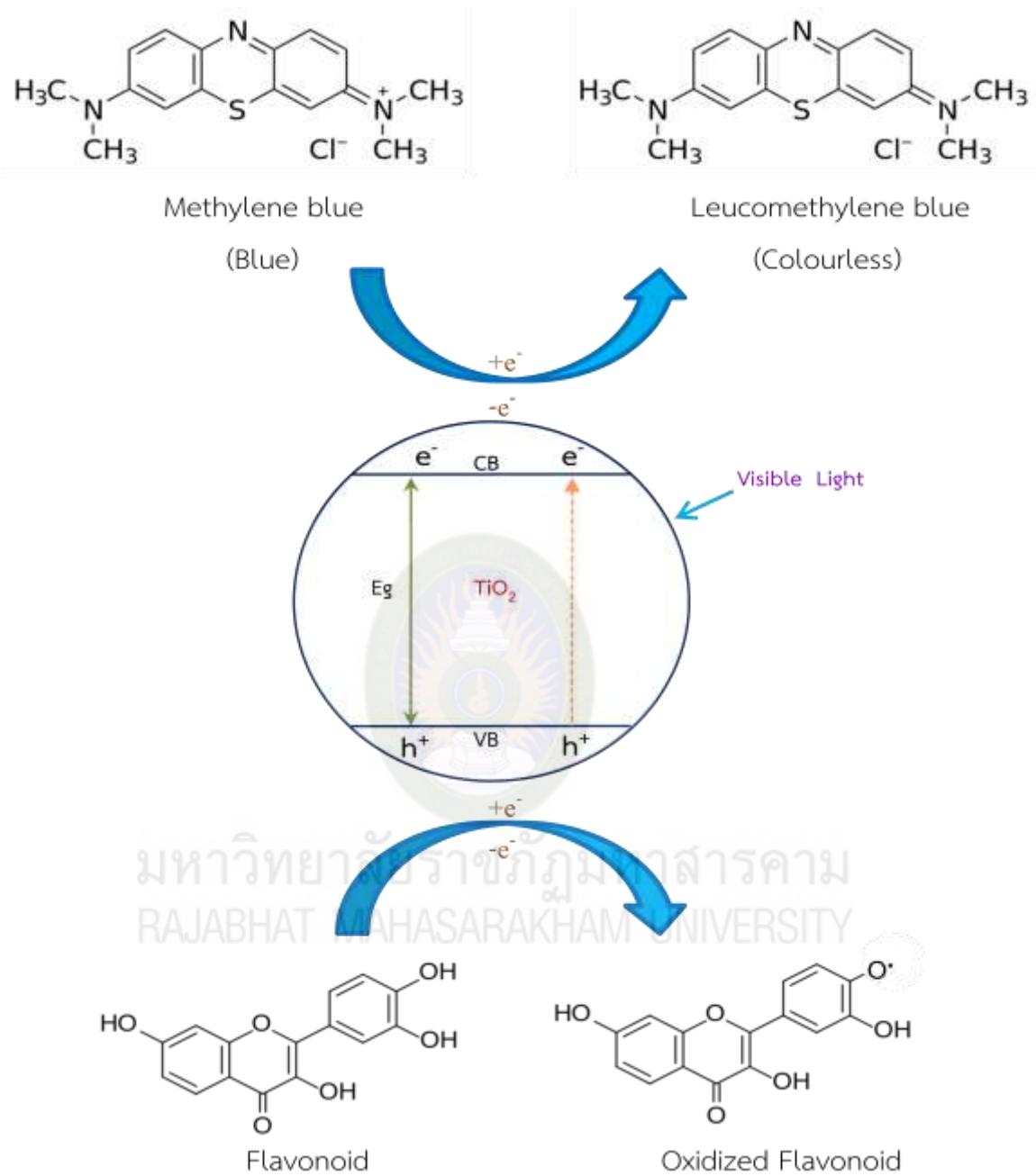
เวลา (นาที)	ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลู							
	TiO ₂	MMT	TiO ₂ /MMT			TiO ₂ &Fla/MMT		
			40%	50%	60%	40%	50%	60%
30	1.19	19.89	63.50	53.26	49.85	89.78	82.07	80.80
60	2.70	17.87	68.43	55.79	51.85	91.42	88.51	80.93
120	6.62	22.30	72.85	60.21	55.41	92.75	91.48	82.63
180	9.53	23.31	73.86	61.22	56.17	99.57	92.49	84.91
240	10.04	24.06	74.62	61.98	58.19	99.95	92.56	90.03



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย MMT ก่อนทำปฏิกิริยา (a), MMT หลังทำปฏิกิริยา(b), TiO_2/MMT ก่อนทำปฏิกิริยา(c), TiO_2/MMT หลังทำปฏิกิริยา (d), $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ก่อนทำปฏิกิริยา(e) และ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ หลังทำปฏิกิริยา(f)

จากภาพที่ 4.12 แสดงสีของวัสดุผสมจากการทดสอบภายใต้สภาวะแสงจากธรรมชาติที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm พบว่า MMT สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูได้ ซึ่งเกิดจากกระบวนการดูดซับเนื่องจาก MMT เป็นวัสดุที่มีช่องว่างระหว่างชั้นสามารถขยายตัวได้ดี (Lin, Zhu, Shen, Zhang & Dong, 2015) ยืนยันได้จากสีของ MMT หลังจากทำปฏิกิริยา เปลี่ยนจากผงสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำเงินตามสีของสารละลายเมทิลีนบลู ขณะเดียวกัน 40%TiO₂/MMT และ 40%TiO₂&Fla/MMT สามารถเกิดกระบวนการดูดซับควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สังเกตได้จากสีของวัสดุผสมหลังจากทำปฏิกิริยา ลักษณะสีของวัสดุผสมอ่อนลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีบางส่วนของเมทิลีนบลูสลายไป จากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ทำให้วัสดุผสมมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูสูงขึ้น (Djellabi et al., 2014, p. 57)

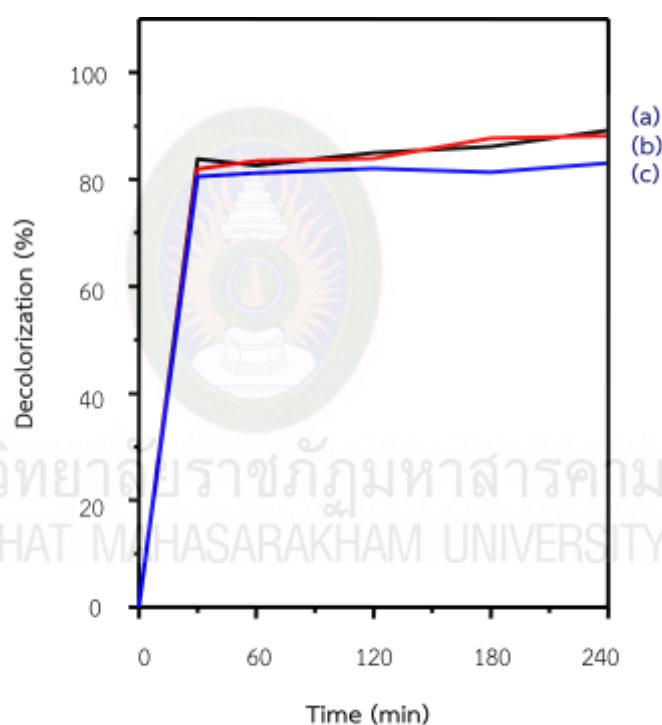
ผลจากการศึกษา พบว่าวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT ที่ได้จากการเตรียมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่สูงกว่า TiO₂ เป็นผลเนื่องมาจาก MMT เป็นวัสดุที่มีช่องว่างระหว่างชั้นมาก จึงเกิดการกระจายตัวของอนุภาคของ TiO₂ บนพื้นผิวของ MMT ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ TiO₂ ได้ โดยกลไกการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT เขียนแสดงได้ดังภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) ที่สกัดได้จากเปลือกกล้วยหอม (Rebello et al., 2014, p. 402) ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Surendra, Roopan, Arasu, Dhabi & Sridharan, 2016, p. 469) ไปยังโฮล (hole) ในเวเลนซ์แบนด์ (Valence band) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานจากแสงซึ่งมากกว่าแถบพลังงานต้องห้าม (band gap energy) อิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์แบนด์ (valence band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (conduction band) ทำให้เกิดโฮลขึ้นที่ วาเลนซ์แบนด์ จากนั้นอิเล็กตรอนจากคอนดักชันแบนด์ จะเคลื่อนที่ไปยังสารละลายเมทิลีนบลู (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) เมื่อสารละลายเมทิลีนบลูรับอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสารละลายสีน้ำเงินเป็นสารละลายที่ไม่มีสี (Oliveira et al., 2007, p. 121) ดังนั้นการเตรียมวัสดุผสม TiO₂&Fla/MMT สามารถเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกรย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 & Fla/MMT

4.4.3 การย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายในแสงยูวี

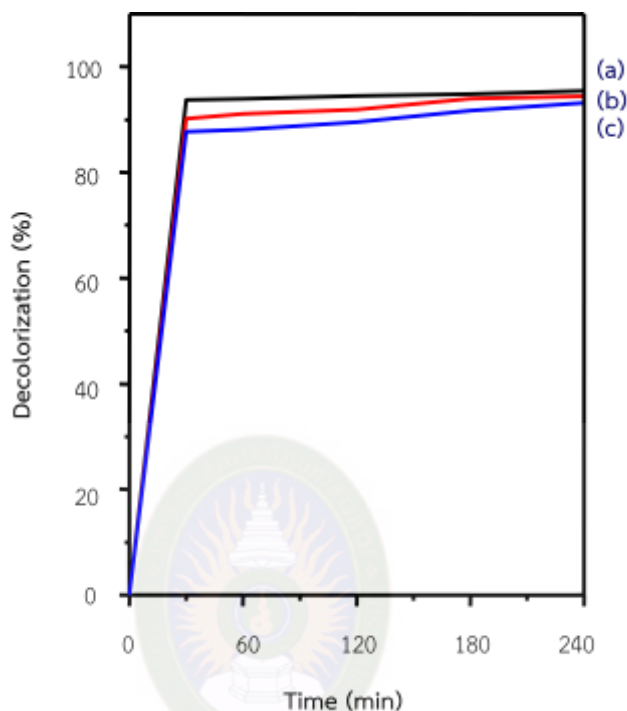
ภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วยวัสดุผสม 40%TiO₂/MMT, 50%TiO₂/MMT และ 60%TiO₂/MMT ที่เวลา 30 60 120 180 และ 240 นาที พบว่า ทุกอัตราส่วนของ TiO₂ สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูได้อย่างสมบูรณ์ใน 240 นาที โดย 40%TiO₂/MMT สามารถย่อยสลายได้สูงสุดที่ร้อยละ 89.14 ในขณะที่ 50%TiO₂/MMT และ 60%TiO₂/MMT สามารถย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 88.13 และ 83.08 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ TiO₂ ใน MMT ได้ดีที่สุด คือ 40%TiO₂/MMT



ภาพที่ 4.14 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม 40%TiO₂/MMT(a), 50%TiO₂/MMT(b) และ 60%TiO₂/MMT(c) ภายในแสงยูวี

ทำการทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยวัสดุผสม TiO₂&Fla/MMT อัตราส่วน 40%TiO₂&Fla/MMT, 50%TiO₂&Fla/MMT และ 60%TiO₂&Fla/MMT ภายในแสงยูวี แสดงผลดังภาพที่ 4.15 พบว่าที่เวลา 240 นาที 40%TiO₂&Fla/MMT มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้สูงที่สุด ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 200 ppm ซึ่งมีประสิทธิภาพการย่อย

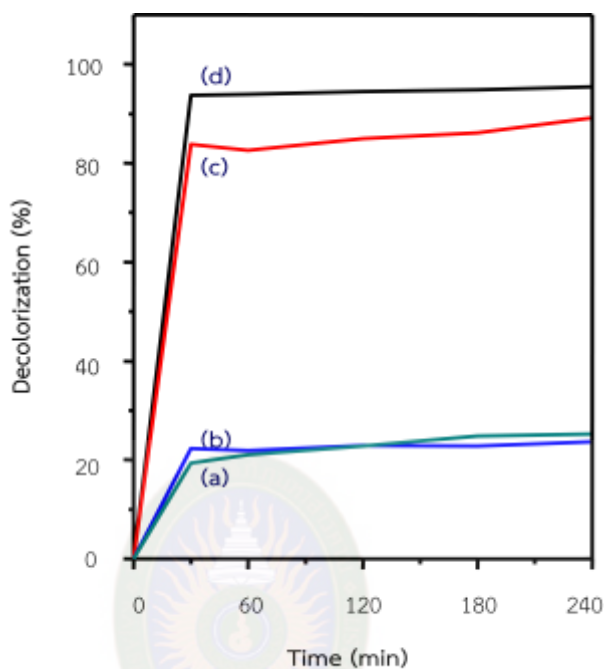
สลายสีของเมทิลีนบลูได้มากถึงร้อยละ 95.46 ในขณะที่ 50%TiO₂&Fla/MMT และ 60%TiO₂&Fla/MMT สามารถย่อยสลายสีสารละลายได้ร้อยละ 94.45 และ 93.19 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.15 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูด้วยวัสดุ 40%TiO₂&Fla/MMT(a), 50%TiO₂&Fla/MMT(b) และ 60%TiO₂&Fla/MMT(c) ภายในแสงยูวี

ภาพที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm ด้วย TiO₂, MMT, 40%TiO₂/MMT และ 40%TiO₂&Fla/MMT โดยทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะแสงยูวี พบว่าวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT มีอัตราการย่อยสลายได้สูงสุด โดยมีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูร้อยละ 95.46 ที่เวลา 240 นาที รองลงมาคือ 40%TiO₂/MMT มีความสามารถในการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 89.14 สอดคล้องกับการทดสอบการย่อยสลายสีภายใต้สภาวะแสงจากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบโดยใช้ MMT พบว่า ทำให้สีของสารละลายเมทิลีนบลูลดลงได้ร้อยละ 23.69 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีด ยืนยันความสามารถในการดูดซับของ MMT และ TiO₂ พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายสีเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 25.20 สูงขึ้นจากการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีด แสดงให้เห็นว่าในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูเกี่ยวข้องกับกลไก 2 แบบ คือกลไกการดูดซับและกลไกการย่อยสลายด้วยแสง และวัสดุผสม 40%TiO₂&Fla/MMT มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีได้สูงสุด ให้ผลไปในทางทิศทาง

เดียวกันกับการทดสอบภายใต้สภาวะแสงจากธรรมชาติ สามารถสรุปข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูภายในแสงยูวี ได้ดังตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบการย่อยสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 (a), MMT(b), 40% TiO_2 /MMT(c) และ 40% TiO_2 &Fla/MMT(d) ภายในแสงยูวี

ตารางที่ 4.5

ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลูด้วย TiO_2 , MMT, วัสดุผสม TiO_2 /MMT และวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT ภายในแสงยูวี

เวลา (นาที)	ร้อยละการย่อยสลายสีสารละลายเมทิลีนบลู							
	TiO_2	MMT	TiO_2 /MMT			TiO_2 &Fla/MMT		
			40%	50%	60%	40%	50%	60%
30	19.39	22.30	83.83	81.94	80.49	93.76	90.15	87.69
60	21.03	21.92	82.63	83.46	81.12	93.95	91.04	88.07
120	22.80	22.93	84.97	83.90	82.07	94.51	91.92	89.52
180	24.82	22.80	86.11	87.69	81.37	94.83	94.01	91.73
240	25.20	23.69	89.14	88.13	83.08	95.46	94.45	93.19

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลู ด้วยวัสดุผสม TiO_2 , MMT, TiO_2/MMT และ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ภายใต้สภาวะที่มีแสงจากธรรมชาติและแสงยูวี ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้น 200 ppm ที่เวลา 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที ในสภาวะที่มีแดด พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีมีแนวโน้มคือ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT} > \text{TiO}_2/\text{MMT} > \text{MMT} > \text{TiO}_2$ และผลจากการทดสอบในสภาวะแสงจากธรรมชาติ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีมีแนวโน้มคือ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT} > \text{TiO}_2/\text{MMT} > \text{MMT} > \text{TiO}_2$ ซึ่ง TiO_2 สามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูได้น้อยกว่าการดูดซับสีของ MMT ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากพื้นที่ผิวและสมบัติการดูดซับของ TiO_2 น้อยกว่า MMT และการศึกษาในสภาวะแสงยูวีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีมีแนวโน้มคือ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT} > \text{TiO}_2/\text{MMT} > \text{TiO}_2 > \text{MMT}$ แสดงให้เห็นว่า การเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมสามารถส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในการย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูโดยเกิดกลไกการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็ง เพื่อใช้สำหรับเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกย่อยสลายสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 ppm และ 200 ppm โดยศึกษาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ของวัสดุผสม TiO_2/MMT (อัตราส่วน 40% TiO_2/MMT , 50% TiO_2/MMT , 60% TiO_2/MMT) และ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ (อัตราส่วน 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$, 50% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$, 60% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$) ภายใต้สภาวะที่มีด แสงจากธรรมชาติ และแสงยูวี ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สามารถเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO_2/MMT) อัตราส่วน 40% TiO_2/MMT , 50% TiO_2/MMT และ 60% TiO_2/MMT และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ ($\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$) อัตราส่วน 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$, 50% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$, 60% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ด้วยวิธีการกระจายตัวอย่างง่ายของของแข็งได้

5.1.2 วัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู ภายใต้สภาวะที่มีด แสงจากธรรมชาติและแสงยูวี ซึ่งพบว่าวัสดุผสม 40% $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีได้สูงสุดร้อยละ 99.95 ที่เวลา 240 นาที ภายในแสงจากธรรมชาติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ที่หลากหลายช่วยเพิ่มการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวและภายในรูพรุนของมอนต์มอริลโลไนต์

5.2.2 ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ร่วมกับสารสกัดอินทรีย์ชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นตัวถ่ายโอนอิเล็กทรอนิกส์

5.2.3 ศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารสกัดกลุ่มฟลาโวนอยด์จากเปลือกกล้วยหอมในมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการศึกษาที่แตกต่างจากเทคนิคของผู้วิจัย

5.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของสีย้อมชนิดอื่น ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2535). *ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)*. สืบค้นจาก http://www2.diw.go.th/research/Law/Env_Standard/Water/2-2539.pdf
- กษิติศ เกษตรกุลชีพ. (2556). *การศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกด้วยอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของอนุพันธ์คีโตนว่องไวแสงร่วมกับตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโนเมตร*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ขวัญใจ กนกเมธากุล. (2535). *เคมีของผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ*. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2533). *ยากับสมุนไพร*. กรุงเทพฯ : ธรรมการพิมพ์.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. (2548). *การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์*. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉลาด บรรเทาและชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. (2548). *การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์*. ขอนแก่น : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชุติมา แกมกิจ. (2555). *การเตรียมนาโนเคลย์ระหว่างโคโตซานละลายน้ำกับมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับประยุกต์ใช้งานในการดูดซับสีย้อม*. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชวีศรี ทรัพย์เมธากุล. (2550). *การปรับแต่งผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- โชติรส ประสานแสง. (2557). *การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อขนาดอนุภาคและสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของเส้นใยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง*. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ธีระวิทย์ พลโคกก่อ. (2559). *การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีซอลเจลและกลั่นไหลกลับสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นัตตา เวชชากุล. (2553). *การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแก้วลอย*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นัตตา เวชชากุล. (2555). *การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี (TPA), 38 (221), 53-55.*

- นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์และคณินดา ตั้งคณาภิรักษ์. (2550). *หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรีวัชร นามด้วง. (2559). *การดูดซับสีรีแอกทีฟเรด โดยไฮออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์*. อุบลราชธานี : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ปิยวรรณ วงศ์สถาน. (2559). *เม็ดแอลจีเนตที่ฝังตรึงด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับการกำจัดสี้อมด้วยกระบวนการดูดซับ-การสลายที่เร่งปฏิกิริยาด้วยแสง*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พิรพงษ์ ยศประยูรศักดิ์. (2551). *สมบัติโฟโตแคตาไลติกของเส้นลวดนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พัชรภรณ์ พิมพ์จันทร์ และลัดดาวัลย์ จำเริญพัฒน์. (2547). *การตรวจหาฟลาโวนอยด์ในเปลือกกล้วยหอม (*Musa sapientum* Linn.Fam)*. มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- ภัทรานิตฐ์ ทองเทพ. (2558). *การพัฒนาเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการกำจัดสี้อมอินทรีย์*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2554). *วัสดุพูนคืออะไร*. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 20(1), 60-69.
- วรรณพงษ์ เตรียมโพธิ์. (2553). *นาโนเทคโนโลยี*. *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว*, 32, 233 - 271.
- วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2548). *นาโนเทคโนโลยี:คลื่นลูกใหม่แห่งศตวรรษที่ 21*. กรุงเทพฯ : ฐานการพิมพ์.
- ศุภย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2560). *แผนที่นำทางการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย พ.ศ.2560-2564* (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- ศรัญญา ทองอุ่น. (2555). *การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน*. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศรัญญา ชัยวิเชียร. (2556). *การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุนาโนคอมโพสิต $BiVO_4/CeO_2$ ชนิดใหม่เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุภกร ภู่เกิด, อุดมทิพราชและทิพวรรณ สายพิณ. (2549). *วัสดุนาโน (Nanomaterial)*. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 8(1), 27-40.

- ศศิมา จันสุ. (2556). *การสังเคราะห์คอปเปอร์(I)ออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์โพโตคะตะลิสต์และสมบัติการเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศิริประภา ชัยเนตร, ภัทรา วงษ์พันธ์กมลและครรชิต คงคาเงิน. (2559). *การดูดซับเมทิลีนบลูจากเปลือกไข่*. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). (2561). *นาโนเทคโนโลยี*. สืบค้นจาก <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7081-nanotechnology>
- สมจิตร พุดดี. (2553). *การสังเคราะห์ท่อนาโนไททานเนียมและการประยุกต์ใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์, นันทนา จิรธรรมนุกุล และนริศรา กุลปรีชานันท์. (2550). *การดัดแปรดินมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อใช้เป็นสารหน่วงไฟในผ้าฝ้าย*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. (2553). *ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน (Nano Safety) สำหรับเจ้าหน้าที่ ผู้ประกอบการและนักวิชาการ (พิมพ์ครั้งที่ 1)*. กรุงเทพฯ : อักษรกราฟฟิกแอนด์ดีไซน์.
- อารีพร อ่อนตาม. (2558). *การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุไฮบริดไทเทเนียมไดออกไซด์กับแคดเมียมซิลิไซด์*. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา.
- อัญชลี สุทธิประการ, เอิบ เขียวรีนรมย์ และสมศรี วัชรสินธุ์. (2534). *องค์ประกอบและสัณฐานวิทยาของแร่ขนาดอนุภาคดินเหนียวในดินนาของประเทศไทย: ความสัมพันธ์ระหว่างความอุดมสมบูรณ์กับแร่ดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบของดินนาบางชนิดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Bonoldi, L. Paolo, L. D. Flego, C. (2016). Vibrational spectroscopy assessment of kerogen maturity in organic-rich source rocks. *Vibrational Spectroscopy*, 87, 14-19.
- Boutoumi, N. K. Boutoumi, H. Khalaf, H. David, B. (2013). Synthesis and characterization of TiO₂-monmorillonite/Polythiophene-SDS nanocomposite: Application in the sonophotocatalytic degradation of rhodamine 6G. *Applied Clay Science*, 80-81, 56-62.
- Bueno, J. N. Bocanegra, B. B. Rooney, A. Hierro, J. M. H. (2017). Study of phenolic extractability in grape seeds by means of ATR-FTIR and Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 232, 602-609.
- Cater, M. C. Gregorich, E.G. (2008). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. (2). United States of America : Taylor & Francis Group.

- Chen, D. Zhu, Q. Zhou, F. Deng, X. Li, F. (2012). Synthesis and photocatalytic performance of the TiO₂ pillared montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 186-193.
- Das, J. Velusamy, P. (2014). Catalytic reduction of methylene blue using biogenic gold nanoparticles from *Sesbania grandiflora* L. *Journal of the Taiwan Institute of Chemistry Engineers*, 45, 2280-2285.
- Djellabi, R. Ghorab, M. F. Morandi, G. C. S. Gatta, S. Oldani, V. Michele, A. D. Bianchi, C. L. (2014). Photoactive TiO₂-montmorillonite composite for degradation of organic dyes in water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 295, 57-63.
- Etcheverry, M. Cappa, V. Trelles, J. Zanini, G. (2017). Montmorillonite-alginate beads : Natural mineral and biopolymers based sorbent of paraquat herbicides. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 5868-5875.
- Ezquerro, C. S. Ric, G. I. Minana, C. C. Bermejo, J. S. (2015). Characterization of montmorillonite modified with organic divalent phosphonium cations. *Applied Clay Science*, 111, 1-9.
- Hassani, A. Khataee, A. Karaca, S. Karaca, C. Gholami, P. (2017). Sonocatalytic degradation of ciprofloxacin using synthesized TiO₂ nanoparticles on montmorillonite. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 251-262.
- Heim, K. E. Tagliaferro, A. R. Bobilya, D. J. (2002). Flavonoid antioxidants: chemistry metabolism and structure-activity relationships,. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 13, 572-584.
- Huo, M. Guo, H. Jiang, Y. Ju, H. Xue, B. Li, F. (2018). A facile method of preparing sandwich layered TiO₂ in between montmorillonite sheets and its enhanced UV-light photocatalytic activity. *Journal of photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 358, 121-129.
- Kameshima, Y. Tamura, Y. Nakajima, A. Okada, K. (2009). Preparation and Properties of TiO₂/montmorillonite composites. *Applied Clay Science*, 45, 20-23.
- Kumar, S. and Pandey, A. K. (2013). Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview. *The Scientific Journal*, (-), 1-16

- Liang, H. Wang, Z. Liao, L. Chen, L. Li, Z. Feng, J. (2017). High performance photocatalysts : Montmorillonite supported-nano TiO₂ composites. *Optik*, 136, 44-51.
- Lin, F. Zhu, G. Shen, Y. Zhang, Z. Dong, B. (2015). Study on the modified monmorillonite for adsorbing formaldehyde. *Applied Surface Science*, 356, 150-156.
- Liu, J. Li, Z. Zuo, S. Yu, Y. (2007). Preparation and photocatalytic activity of silver and TiO₂ nanoparticles/montmorillonite composites. *Applied Clay Science*, 37, 275-280.
- Liu, Z. Jian, Z. Fang, J. Xu, X. Zhu, X. Wu, S. (2011). Low-temperature reverse microemulsion synthesis, characterization, and photocatalytic performance of nanocrystalline titanium dioxide. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1-8.
- Naskar, M. Roy, M. Ghosh, S. (2015). Ligand-assisted soft-chemical synthesis of self-assembled shaped mesoporous Co₃O₄: Efficient visible light photocatalyst. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17.
- Oliveira, L. C. A. Goncalves, M. Guerreiro, M. C. Ramalho, T. C. Fabris, J. D. Pereira, M. C. Sapag, C. (2007). A new catalyst material based on niobia/iron oxide composite on the oxidation of organic contaminants in water via heterogeneous Fenton mechanisms. *Applied Catalysis A: General*, 316, 117-124.
- Papadopoulou, E. Gale, N. Thompson, J. F. Fleming, T. Brown, T. Bartlett, P. N. (2016). Specifically horizontally tethered DNA probes on Au surfaces allow labelled and label-free DNA detection using SERS and electrochemically driven melting. *Chemical Science*, 7, 386-393.
- Pelissari, F. M. Sobral, P. J. A. Menegalli, F. C. (2014). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from banana peels. *Cellulose*, 21, 417-432.
- Rangel, R. D. R. Munoz, M. P. G. Rodriguez, M. Lazcano, T. A. R. Solans, C. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles in oil-in-water microemulsion and nano-emulsion using geranium leaf aqueous extract as a reducing agent. *Colloids and Surfaces A*, 5(36), 60-67.

- Rebello, L. P. G. Ramos, A. M. Pertuzatti, P. B. Barcia, M. T. Munoz, N. C. Gutierrez, I. H. (2014). Flour of banana (*Musa AAA*) peel as a source of antioxidant phenolic compounds. *Food Research International*, 55, 397-403.
- Rossetto, E. Petkowicz, D. I. Santo, J. H. Z. Pergher, S. B. C. Penha, F. G. (2010). Bentonite impregnated with TiO_2 for photodegradation of methylene blue. *Applied Clay Science*, 48, 602-606.
- Sun, H. Peng, T. Liu, B. Xian, H. (2015). Effects of montmorillonite on phase transition and size of TiO_2 nanoparticle in TiO_2 /montmorillonite nanocomposite. *Applied Clay Science*, 114, 440-446.
- Surendra, T. V. Roopan, S. M. Arasu, M. V. Dhabhi, N. A. A. Sridharan, M. (2016). Phenolic compounds in drumstick peel for the evaluation of antibacterial, hemolytic and photocatalytic activity. *Journal of Photocatalytic & Photobiology, B: Biology*, 161, 463-471.
- Vu, H. T. Scarlett, C. J. Vuong, Q. V. (2018). Phenolic compounds within banana peel and their potential uses: A review. *Journal of Functional Foods*, 40, 238-248.
- Zainal, Z. Lee, C. Y. Hussein, M. Z. Kassim, A. (2005). Electrochemical-assisted photodegradation of dye on TiO_2 thin films: Investigation on the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 197-203.



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารและการคำนวณ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

1. การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

1.1 สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm

เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยชั่ง ผงสี ย้อมเมทิลีนบลู 0.02 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นถึงขีดปริมาตร เขย่า สารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน

การคำนวณ

จากสูตร

$$\text{ppm} = \frac{\text{มวลของตัวละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \times 10^6$$

$$200 \text{ ppm} = \frac{\text{มวลของตัวละลาย}}{100 \text{ ml}} \times 10^6$$

$$\text{มวลของตัวละลาย} = \frac{200 \text{ ppm}}{10^6} \times 100 \text{ ml}$$

$$\text{มวลของตัวละลาย} = 0.02 \text{ กรัม}$$

2. การเตรียมวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO_2/MMT)

2.1 เตรียมวัสดุผสม 40% TiO_2/MMT เตรียมโดยซังไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.024 กรัม มาบดผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณ 0.6 กรัม

การคำนวณ

$$\begin{array}{l} \text{วัสดุผสม } 100 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } 40 \text{ กรัม} \\ \text{วัสดุผสม } 0.06 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } \frac{40 \text{ กรัม} \times 0.06 \text{ กรัม}}{100 \text{ กรัม}} \\ = 0.024 \text{ กรัม} \end{array}$$

2.2 เตรียมวัสดุผสม 50% TiO_2/MMT เตรียมโดยซังไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.030 กรัม มาบดผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณ 0.6 กรัม

การคำนวณ

$$\begin{array}{l} \text{วัสดุผสม } 100 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } 50 \text{ กรัม} \\ \text{วัสดุผสม } 0.06 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } \frac{50 \text{ กรัม} \times 0.06 \text{ กรัม}}{100 \text{ กรัม}} \\ = 0.030 \text{ กรัม} \end{array}$$

2.3 เตรียมวัสดุผสม 60% TiO_2/MMT เตรียมโดยซังไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.036 กรัม มาบดผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณ 0.6 กรัม

การคำนวณ

$$\begin{array}{l} \text{วัสดุผสม } 100 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } 60 \text{ กรัม} \\ \text{วัสดุผสม } 0.06 \text{ กรัม มีไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ } \frac{60 \text{ กรัม} \times 0.06 \text{ กรัม}}{100 \text{ กรัม}} \\ = 0.036 \text{ กรัม} \end{array}$$



ภาคผนวก ข

ภาพการดำเนินงานกิจกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

1. การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน (TiO₂NPs)



ภาพที่ ข.1 ซั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัม นำไปอบไล่ความชื้น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ ข.2 เเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ข.3 จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน เฟสอนาเทส

2. การเตรียมวัสดุผสม (TiO₂/MMT)



ภาพที่ ข.4 กวนวัสดุผสม TiO₂/MMT เป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ ข.5 เเผาวัสดุผสม TiO₂/MMT ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ข.6 วัสดุผสม TiO₂/MMT มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อน

3. การเตรียมวัสดุผสม (TiO₂&Fla/MMT)



ภาพที่ ข.7 กวนวัสดุผสม TiO₂&Fla/MMT เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



ภาพที่ ข.8 เเผาวัสดุผสม TiO₂/MMT ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ ข.9 วัสดุผสม TiO₂&Fla/MMT มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม

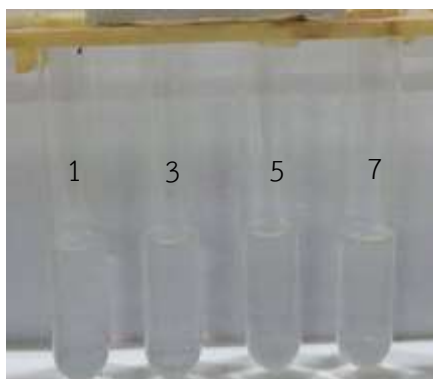
ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

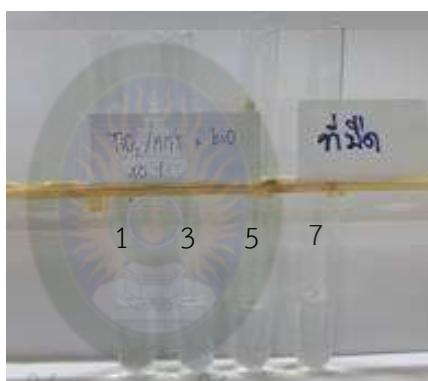


มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

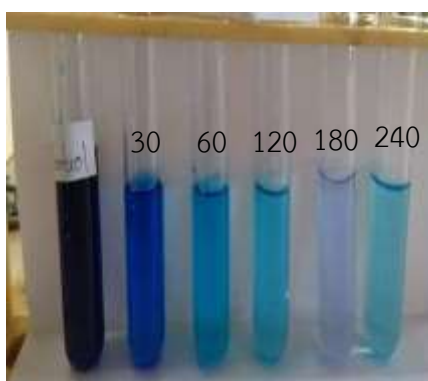
1. การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสม TiO_2 &Fla/MMT



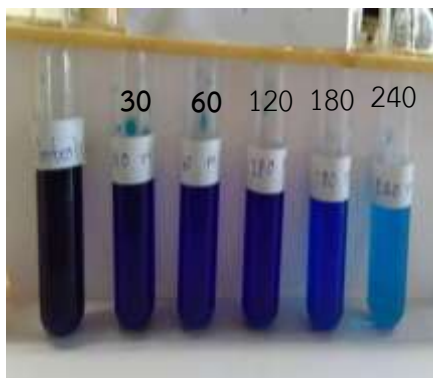
ภาพที่ ค.1 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในแสงธรรมชาติ



ภาพที่ ค.2 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในที่มืด

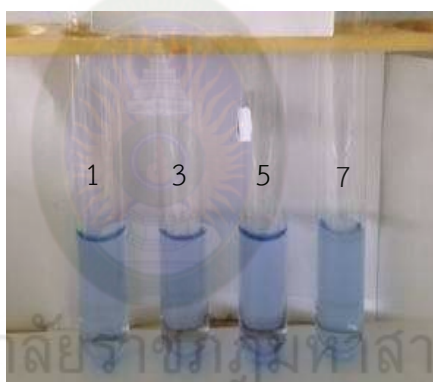


ภาพที่ ค.3 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2 &Fla/MMT ในแสงธรรมชาติ

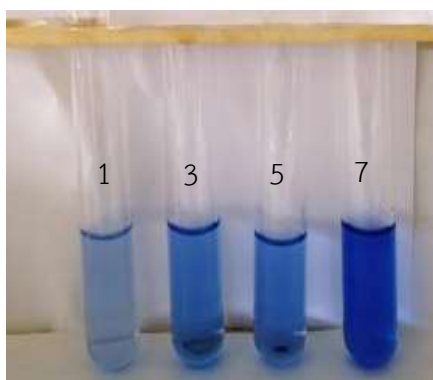


ภาพที่ ค.4 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ $\text{TiO}_2\&\text{Fla}/\text{MMT}$ ในที่มืด

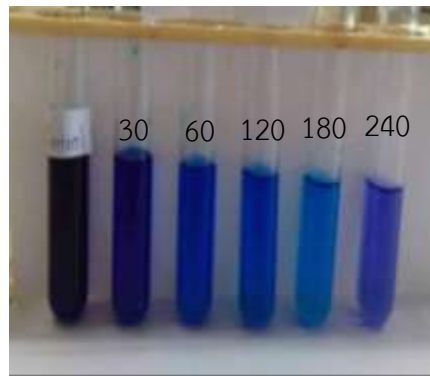
1. การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูของวัสดุผสม TiO_2/MMT



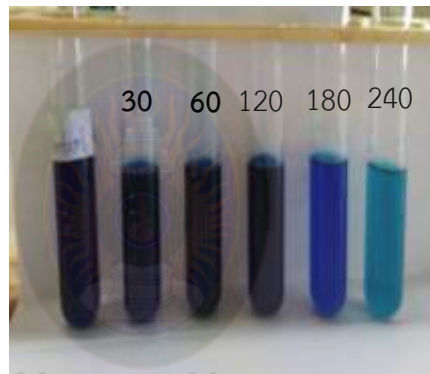
ภาพที่ ค.5 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2/MMT ในแสงธรรมชาติ



ภาพที่ ค.6 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 40 ppm ของ TiO_2/MMT ในที่มืด



ภาพที่ ค.7 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2/MMT ในแสงธรรมชาติ



ภาพที่ ค.8 การย่อยสลายสีเมทิลีนบลูเข้มข้น 200 ppm ของ TiO_2/MMT ในที่มืด

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นางสาวอาภาพร ก้วพรหม
วัน เดือน ปี เกิด	10 ตุลาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 90 หมู่ที่ 16 ตำบลสงเปลือย อำเภอนามน จังหวัดกาฬสินธุ์ 46230
สถานที่ทำงาน	โรงเรียนคำม่วง 187 หมู่ 4 ตำบลทุ่งคลอง อำเภอคำม่วง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46230
ตำแหน่ง	ครู
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2558	ครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สาขาวิชา เคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
พ.ศ. 2562	ครุศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเคมีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม