

การย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

บุญยวีร์ หาญณรงค์

สกุลรัตน์ หมัดยูกีบ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by Ag-doped
TiO₂ on PET film under Visible light

Poonyawee Harnnarong

Sakulrat Madyoukob

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR

THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์
เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ภายใต้แสงที่มองเห็นได้
โดย นางสาวปณยวีร์ หาญณรงค์
นางสาวสกุลรัตน์ หมดยุคกับ
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

เกรียงศักดิ์

.....ประธานกรรมการ
(รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

จ. พ.

.....กรรมการ
(ดร.นริศรา ทองบุญชู)

สันติ วัฒนานุสรณ์

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ภายใต้แสงที่มองเห็นได้	
โดย	นางสาวปุณยวีร์ หาญณรงค์	รหัสนักศึกษา 62010567
	นางสาวสกุลรัตน์ หมัดยุกกับ	รหัสนักศึกษา 62010905
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์	
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ด้วยเทคนิคสเปกโตรริง ที่มีเงื่อนไขของชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และเวลาในการเจือที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง โดยใช้สีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 ppm แทนสารอินทรีย์ในการใช้พิจารณาตลอดการทดลอง เริ่มต้นทำการทดลองในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที และทำการทดลองต่อภายใต้แสงที่มองเห็นได้เป็นเวลา 120 นาที โดยมีการเก็บตัวอย่างทุกๆ 20 นาที และนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู จากนั้นจึงแปลงผลเพื่อนำมาพิจารณาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ผลลัพธ์พบว่าแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินให้ผลลัพธ์ในการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้เจือโลหะเงิน และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด XC.120 ที่มีการเจือโลหะเงินโดยเคลือบทั้ง 2 ด้าน ซึ่งให้ประสิทธิภาพ Photocatalytic Activity ดีที่สุด โดยให้ผล %Conversion สูงสุด 50.72% และ Rate constant สูงสุดที่ $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

Report Title Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by Ag-doped TiO₂ on PET film under Visible light

By Poonyawee Harnnarong
Sakulrat Madyoukob

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2022

Advisor Assoc.Prof.Dr.Kriangsak Kraiwattanawong

Abstract

This work aimed to study the photocatalyst performance of silver-doped titanium dioxide (Ag-doped TiO₂) on PET film by a sputtering technique. There were 22 samples in which different titanium dioxide types and sputtering times, used methylene blue at 2 ppm concentration instead of organic matter for consideration throughout the experiment. The experiment was initially carried out in the dark for 60 min and continued under visible light for 120 min. Samples were collected every 20 min and the absorbance was determined by a UV-Vis Spectrophotometer to analyze the concentration of methylene blue solution. The results were then converted to methylene blue dye's degradation. The results showed that Ag-doped TiO₂ films produced better photodegradation results than the undoped TiO₂. And the catalyst that gave the best results was Ag-doped TiO₂ (XC.120) with silver doping on both sides, which provides photocatalytic activity was the best, yielding the highest %Conversion of 50.72% and the highest rate constant of $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำปริญญาานิพนธ์ ยิ่งไปกว่านั้นท่านยังคอยช่วยเหลือสนับสนุน ช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และคอยให้กำลังใจเสมอตลอดระยะเวลาของการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือการทดลองประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ ช่วยให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้งานและคอยดูแลตลอดการทำปริญญาานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยอนุเคราะห์ด้านการทำเอกสารเพื่อใช้เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดการทำปริญญาานิพนธ์

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

สารบัญ	ก
สารบัญรูป.....	ค
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1. ไทเทเนียมไดออกไซด์	3
2.2 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีตเตอร์ริง.....	5
2.4 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process)	5
2.5 สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic Dyes).....	8
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	12
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	12
3.3 การเตรียมแผ่นฟิล์ม	12
3.4 การเจือ TiO ₂ และ Ag บนแผ่นฟิล์ม.....	12
3.5 แผนการทดลอง.....	13
3.6 วิธีการทดลอง.....	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	18
4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic Activity).....	19
4.3 ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปจากการย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (%Conversion).....	24
4.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่ง (1st Oder Rate of reaction)	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	36
5.1 สรุปผลการทดลอง	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก.....	40
ภาคผนวก ก	41
ภาคผนวก ข	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส (anatase), รูไทล์ (rutile) และบรูคไคต์ (brookite) ..	3
รูปที่ 2.2 หลักการเคลือบฟิล์มบางที่ผิวชิ้นงานด้วยวิธีสเป็คเตอร์ริง	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการโฟโตแคตาไลติกด้วยแสงที่มองเห็นได้บนฟิล์มบาง TiO_2 ที่เจือด้วย Ag	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู	8
รูปที่ 2.5 แผนภาพองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	10
รูปที่ 2.6 แผนภาพองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM	10
รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	14
รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดเมื่อทำการใส่ฟิล์มที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา	15
รูปที่ 4.1 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เจือโลหะเงินภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ.....	19
รูปที่ 4.2 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25A ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ.....	20
รูปที่ 4.3 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.20 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ.....	20
รูปที่ 4.4 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.60 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ.....	21
รูปที่ 4.5 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.120 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ.....	21
รูปที่ 4.6 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา XC ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	22
รูปที่ 4.7 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา YD ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZE ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	23
รูปที่ 4.9 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการเจือโลหะเงินภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	30
รูปที่ 4.10 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25A ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	30
รูปที่ 4.11 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.20 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	31
รูปที่ 4.12 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.60 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	32
รูปที่ 4.13 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.120 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	32
รูปที่ 4.14 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา XC ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	33
รูปที่ 4.15 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา YD ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	34
รูปที่ 4.16 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZE ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ	34
รูปที่ ก.1 ภาพอุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	41
รูปที่ ก.2 ภาพแผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	41
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง P25 และ P25A.....	43
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง P25B, XC และ ZE.20	43
รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง YD.20 และ YD.60	43
รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง YD.120	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง ZE.60.....	44
รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง ZE.120	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง	13
ตารางที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าเครื่องมือตรวจวัด Uv-vis spectrophotometer	16
ตารางที่ 4.1 แสดงชื่อและเงื่อนไขต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด.....	18
ตารางที่ 4.2 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ไม่มีการเจือโลหะเงิน (P25 Undoped TiO ₂).....	24
ตารางที่ 4.3 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ	25
ตารางที่ 4.4 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.20).....	26
ตารางที่ 4.5 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.60).....	26
ตารางที่ 4.6 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.120).....	27
ตารางที่ 4.7 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C	27
ตารางที่ 4.8 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D.....	28
ตารางที่ 4.9 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E.....	29
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทุกวันนี้โลกกำลังเผชิญกับปัญหามลพิษทางน้ำที่หนักขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม โดยผลกระทบดังกล่าวมีสาเหตุอันเนื่องมาจากการสะสมของสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่ถูกทิ้งลงแหล่งน้ำจากกิจกรรมการใช้ชีวิตและอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น สำหรับสารอินทรีย์ปนเปื้อนหากปล่อยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพตามธรรมชาติจะต้องใช้เวลานานและก่อให้เกิดน้ำเน่าเสียขึ้นได้ ดังนั้นการบำบัดน้ำก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรตระหนักและหาวิธีแก้ปัญหาและทำการควบคุมอย่างจริงจัง

ในปัจจุบันกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสำหรับสารอินทรีย์ปนเปื้อนมีการพัฒนาและมีความหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางชีวภาพ หรือกระบวนการทางเคมี อาทิเช่น การกรอง การใช้เยื่อเลือกผ่าน การย่อยสลายทางชีวภาพ โดยแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่อีกกระบวนการหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมคือ การย่อยสลายสารอินทรีย์ปนเปื้อนโดยวิธีปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ คือแสงแดดจากดวงอาทิตย์ ทำได้โดยง่าย ราคาไม่แพง ใช้หลักการการถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) จะถูกกระตุ้นไปยังแถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction band) และทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยตัวเร่งที่นิยมเลือกนำมาใช้คือไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ถึงอย่างนั้นกระบวนการนี้ยังคงมีข้อจำกัดของช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีความพยายามในการคิดค้นและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำมากมาย โดยส่วนใหญ่มักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผง (powder) ซึ่งมักพบปัญหาในเรื่องของการกำจัดหลังการใช้งานและการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ในงานวิจัยฉบับนี้จึงสังเกตเห็นถึงปัญหาดังกล่าวและให้ความสนใจที่จะทดสอบผลการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในรูปแบบของแผ่นฟิล์ม โดยการใช้การเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ คือ แผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โดยวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ อันได้แก่ ปัจจัยจากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาบนแผ่นฟิล์มและความแตกต่างของระยะเวลาในการเจือสารเร่งปฏิกิริยาโลหะเงินบนแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพ Photocatalytic Activity ด้วยการพิจารณาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์ม PET และตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ในเงื่อนไขต่างๆภายใต้แสงที่มองเห็นได้

2. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์ม PET และตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ในเงื่อนไขต่างๆ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

3. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์ม PET และตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ในเงื่อนไขต่างๆ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET เงื่อนไขต่างๆ

2. ศึกษาผล Photocatalytic Activity, Conversion และ Rate constant ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ในเงื่อนไขต่างๆ ภายใต้สภาวะการฉายแสงที่มองเห็นได้ (Visible light)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเรียนรู้และนำข้อมูลจากผลทดลองไปศึกษาและช่วยพิจารณาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในรูปแบบแผ่นฟิล์มได้

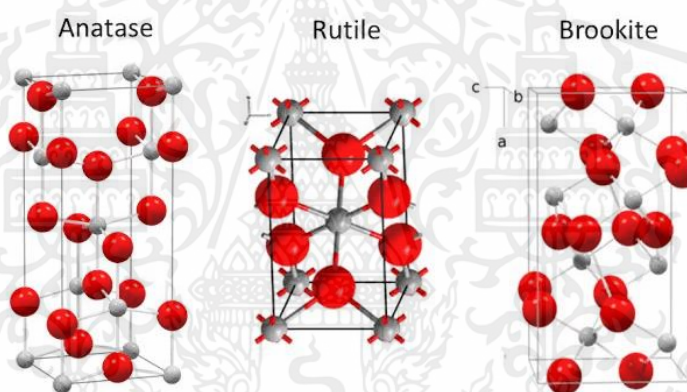
2. ได้ทราบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะเงินบนแผ่นฟิล์ม PET ที่สภาวะเงื่อนไขใดให้ผลการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ได้ดีที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ [1]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก และจัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ไทเทเนียมไดออกไซด์ อยู่ในรูปของผลึกที่สำคัญ 3 รูป คือ อะนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคต์ (brookite) โดยเฟสอะนาเทสและรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ส่วนบรูคไคต์ จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) โดยทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_6 octahedral) อะตอมไทเทเนียม (Ti) หนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน (O) หกอะตอม โครงสร้างแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับวิธีการบิดเบี้ยวของการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณ ขอบ มุม และหน้า แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส (anatase), รูไทล์ (rutile) และบรูคไคต์ (brookite) [2]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นที่นิยมในการถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากเป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมี ราคาถูก ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [3] สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย การบำบัดอากาศ แต่มีข้อเสียคือ TiO_2 มีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ที่กว้าง (ประมาณ 3.0 eV สำหรับเฟสอะนาเทส, 3.2 eV สำหรับเฟสรูไทล์) ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีในช่วงของแสงยูวีที่มีคลื่นความยาวแสงต่ำกว่า 387 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเพียง 4% จากช่วงความยาวคลื่นแสงที่พบในการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และยังเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย [4] ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาโดยใช้ TiO_2 เจือร่วมกับโลหะหรือโลหะชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาเชิงแสงให้เกิดได้ดีในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ให้ดียิ่งขึ้น

2.2 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

จากงานวิจัยต่างๆ [3] มีการศึกษาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ด้วยการเจือร่วมกับโลหะและอโลหะ ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับการเจือตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ด้วยโลหะทรานซิชัน เช่น Cu, Co, Ni, Cr, Mn, Fe, Ru, Au, Ag, Pt ไอออนบวกของโลหะทรานซิชันสามารถที่จะแทนที่ในโครงสร้างของ TiO_2 ได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาและทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนบนพื้นผิว TiO_2 ไปยังตัวรับเพื่อทำปฏิกิริยาต่อไป ช่วยดักจับอิเล็กตรอนเพื่อยับยั้งการรวมตัวกันอีกครั้ง (recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮล ส่งผลให้ประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติกดีขึ้น สำหรับการเจือตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ด้วยอโลหะ เช่น C, N, S, B, P, F และ I จะช่วยเพิ่มความสามารถที่โดดเด่นในการขยายช่วงการดูดกลืนแสงไปยังช่วงแสงที่มองเห็นได้มากยิ่งขึ้น ช่วยให้แถบพลังงาน (Energy Bandgap) ลดลง ทั้งนี้ผลของประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับทั้งชนิดและปริมาณของโลหะและอโลหะที่เจือ

ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้การเจือด้วยโลหะ Ag เนื่องจากมีความเสถียร สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าดีและมีการพิสูจน์ว่าโลหะเงินมีความสามารถในการลดขนาดของผลึก และช่วยลดการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (recombination) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงได้ คุณสมบัติที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการย่อยสลายเชิงแสงที่โดดเด่นของโลหะ Ag คือการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance, SPR) ซึ่งช่วยขยายช่วงการดูดกลืนแสงไปยังแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) และช่วยในการดักจับอิเล็กตรอนและนำพาให้อิเล็กตรอนทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีมากยิ่งขึ้น [5]

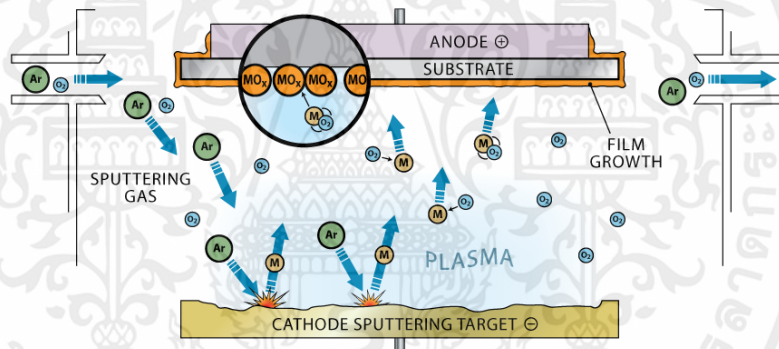
นอกเหนือจากการเลือกสารเร่งปฏิกิริยาแล้วการเลือกรูปแบบหรือพื้นผิวที่จะทำการเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญ ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของพื้นผิวที่ทำจากแผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เพราะสามารถจัดการหลังการใช้งานได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และเนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะที่เป็นผง (powder) การศึกษาในรูปแบบของฟิล์มนี้จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ แผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ (monomer) หลายๆ ตัวซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ระหว่าง terephthalic acid (TPA) กับ ethylene glycol (EG หรือ ethanediol) โดยจะมีน้ำเกิดขึ้นในปฏิกิริยา หรืออาจเกิดจากมอนอเมอร์ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง dimethyl terephthalate กับ ethylene glycol โดยจะมีเมทานอลเกิดขึ้นในปฏิกิริยา โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต PET นั้นจะได้จากอุตสาหกรรมน้ำมัน ทั้งนี้ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นมีผลต่อคุณภาพของ PET อย่างมาก ดังนั้นความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นจึงเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา และสำหรับการนำ PET มาผลิตเป็นวัสดุต่างๆ สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนและการทำให้เย็นที่อุณหภูมิที่ระยะเวลาต่างๆ เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า "heat setting"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะทำให้ได้ PET ที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น นำมาทำเป็นแผ่นฟิล์ม เป็นต้น [6]

2.3 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

เทคนิคที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง คือ เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยิมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการเคลือบฟิล์มบาง อาศัยหลักการเร่งอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงซึ่งสามารถชนกับอะตอมของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและเกิดการถ่ายโอนพลังงานทำให้อะตอมของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และถูกเร่งให้วิ่งเข้าชนกับอนุภาคของเป้าสารเคลือบ (Target atom) ที่อยู่ใกล้ขั้วแคโทด (Cathode) ทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดขึ้นไปเคลือบบนวัสดุฐานรองรับ (substrate) ที่อยู่ใกล้กับขั้วแอโนด (Anode) เทคนิคนี้มีข้อดี คือ (1) ชั้นของวัสดุที่เคลือบด้วยกระบวนการนี้จะมีระเบียบเนียน สม่ำเสมอ มีความบริสุทธิ์สูง (2) สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้อย่างแม่นยำ [7]



รูปที่ 2.2 หลักการเคลือบฟิล์มบางที่ผิวชิ้นงานด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง [8]

2.4 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) คือ กระบวนการที่เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้เกิดการออกซิเดชันและรีดักชันสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีสถานะเดียวกับสารที่ต้องการกำจัด

2. การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีสถานะต่างกับสารที่ต้องการกำจัด เป็นที่นิยมมากกว่า

เนื่องจากสามารถคัดแยกและกำจัดตัวเร่งหลังใช้งานได้ง่ายกว่า อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 หลักการของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนที่จะมีการดูดซับโมเลกุลของสารที่เป็นของเหลวหรือแก๊สลงบนพื้นผิวของแข็ง อาจเกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุล แรงแรงทางกายภาพหรือแรงแรงทางเคมี โดยจะมีการดูดซับ-คายซับจนถึงจุดสมดุล ปริมาณการดูดซับนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของตัวดูดซับ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน องค์กรประกอบทางสัณฐานวิทยา รวมไปถึงคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ

การฉายรังสี (Irradiation) เป็นขั้นตอนที่จะมีการฉายแสงในรูปแบบของพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Bandgap) เพื่อให้เกิดการกระตุ้นของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนตัวออกจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band)

2.4.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ [9]

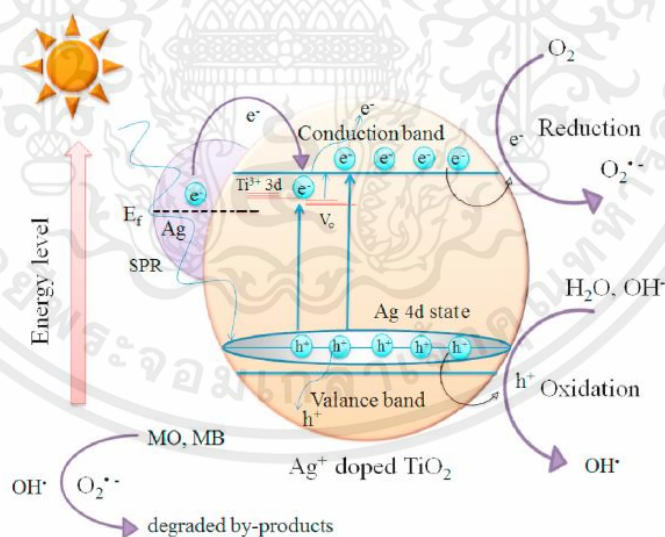
ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะ Ag จะถูกกระตุ้นภายใต้การฉายรังสีด้วยแสงที่มองเห็นได้ (สมการ 2.1) ทำให้เกิดโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์ (VB) และอิเล็กตรอนในแถบพลังงานการนำไฟฟ้า (CB) โดยคู่อิเล็กตรอน (e^-) / โฮล (h^+) จะย้ายไปยังพื้นผิวของ TiO_2 โฮลบนผิวที่เกิดจากแสงสามารถออกซิไดซ์ H_2O หรือ OH^- ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วยไอออนเงินได้เป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH^\bullet) (สมการ 2.2) และในส่วนของอิเล็กตรอนที่สร้างด้วยแสงสามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวที่ถูกดูดซับ O_2 ก่อตัวเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (O_2^\bullet) (สมการ 2.3) อนุภาค Ag^+ จะดักจับโฮล (h^+) ที่แถบวาเลนซ์เพื่อสร้าง Ag^{2+} (สมการ 2.4) และ Ag^{2+} ที่ได้จะออกซิไดซ์ H_2O หรือ OH^- ที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวเพื่อผลิต OH^\bullet (สมการ 2.5) นอกจากนั้นอนุภาค Ag^+ สามารถดักจับอิเล็กตรอนเพื่อสร้าง Ag^0 (สมการ 2.6) และจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ไปยัง O_2 (สมการ 2.7) หรือถ่ายโอนไปยังไอออน Ti^{4+} (สมการ 2.8) สร้างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^\bullet) (สมการ 2.7 และ 2.9) ซึ่งช่วยลดอัตราการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน e^-/h^+

O_2^\bullet ที่เกิดขึ้นจะดักจับโฮล (h^+) ที่แถบวาเลนซ์ (สมการ 2.10) และอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าถูกดักจับโดยพื้นผิวที่ดูดซับออกซิเจนเพื่อสร้างอนุมูล O_2^\bullet ซึ่งจะทำปฏิกิริยารีดักชันต่อไปกับพื้นผิวที่ดูดซับ H_2O เพื่อสร้างอนุมูลไฮดรอกไซด์ OH^\bullet (สมการ 2.11)

โดยอนุมูลไฮดรอกไซด์ที่สร้างด้วยแสง (OH^\bullet) (สมการ 2.2, 2.5 และ 2.11) จะเกิดการออกซิเดชันทำให้สามารถกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ได้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (สมการ 2.12)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กระบวนการโฟโตคะตาไลติกด้วยแสงที่มองเห็นได้บนฟิล์มบาง TiO₂ ที่เจือด้วย Ag [9]

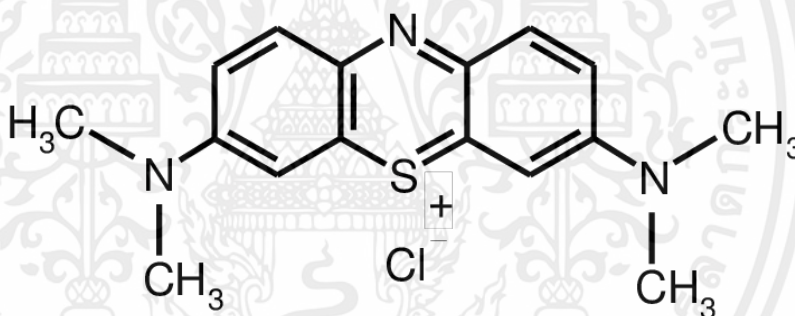
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic Dyes)

สีย้อมเบสิก เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนบวก บางครั้งจึงเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน (Cationic Dyes) สีในกลุ่มนี้มีลักษณะเด่นคือมีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง [10]

2.5.1 สีย้อมเมทิลีนบลู [11]

เมทิลีนบลู (Methylene blue) เป็นสีย้อมประเภทสีย้อมเบสิก (Basic or Cationic Dyes) จัดอยู่ในกลุ่มไทอะซีน อนุพันธ์ไพโรไทอะซีน มีลักษณะเป็นผงสีน้ำเงินเข้ม ไม่มีกลิ่น มีค่า pH เท่ากับ 6 ในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C มีจุดเดือดที่ 100°C จุดหลอมเหลวที่ 190°C เมทิลีนบลูละลายในน้ำ เอทานอลและคลอโรฟอร์ม แต่ไม่ละลายในเอทิลอีเทอร์ ไซลีนและกรดโอเลอิก เมื่อละลายในน้ำและเอทานอลจะได้สารละลายสีฟ้า ถูกค้นพบครั้งแรกโดย ไฮน์ริช คาโร นักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1876 นิยมใช้ในทางการแพทย์และในทางอุตสาหกรรมสีย้อม มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 664 นาโนเมตร มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ น้ำหนักโมเลกุล 319.85 กรัมต่อโมล โครงสร้างโมเลกุล แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลู [12]

2.6 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมี มีความสัมพันธ์กับการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ๆ ดังนั้น การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้ข้อมูลที่ช่วยทำให้เข้าใจบทบาทหน้าที่ และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ และช่วยให้เห็นแนวทางการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยมีการวิเคราะห์ทางกายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุน การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ การวิเคราะห์เฟส และการวิเคราะห์ทางเคมี เช่น การวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบ การศึกษาการเกิดรีดักชันของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

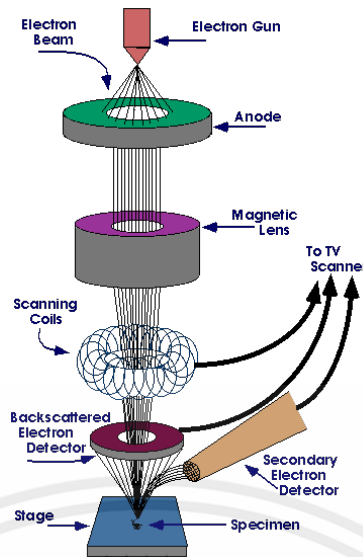
2.6.1 การวิเคราะห์อนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนแสง เมื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพแล้วมีกำลังขยายสูงกว่าการใช้แสงมาก ช่วยให้เห็นรายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งไม่สามารถเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบ่งเป็น 2 แบบ คือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ตัวย่อคือ SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope ตัวย่อคือ TEM) โดยทั่วไปความละเอียดของภาพจาก SEM มีความคมชัดน้อยกว่าของ TEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคที่วัดอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ที่เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ไปที่ตัวอย่างรูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องนี้มีมีส่วนประกอบอยู่ในท่อสุญญากาศ โดยส่วนประกอบแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

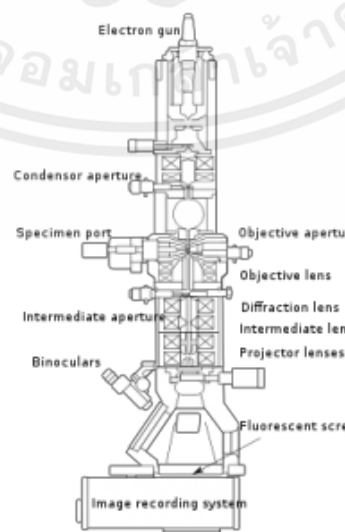
- 1) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยทั่วไปใช้ขดลวดทั้งสแตน อิเล็กตรอนที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์คืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ
- 2) เลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดและความเข้มเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มขนาดของกำลังขยาย
- 3) ขดลวดสำหรับการส่องกราด (Scan coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนววนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างที่เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 4) เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพขั้นต้น อาศัยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของภาพได้โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- 5) ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (Detector) ตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยจะเก็บสัญญาณภาพแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ



รูปที่ 2.5 แผนภาพองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM [14]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านคือ อิเล็กตรอนสามารถส่องผ่านวัสดุได้ ถ้าวัสดุไม่หนาจนเกินไป ปริมาณอิเล็กตรอนที่ผ่านออกมาจะขึ้นกับความหนาแน่นและความหนาของวัสดุ เมื่อวัดอิเล็กตรอนที่ผ่านออกมาจะได้ภาพสองมิติ รูปที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยภายในเป็นสุญญากาศ ลักษณะการทำงานจะเหมือนกับกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาเพียงแต่ใช้อิเล็กตรอนแทนแสง การทำงานของเครื่องมือเริ่มจากการให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีพลังงานและความเข้มสูงผ่านเลนส์รวมแสง กลายเป็นลำอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวอย่างการลดลงของความเข้มของแสงที่ผ่านออกมา ภาพถ่ายที่ได้จาก TEM สามารถใช้วัดขนาดของอนุภาคหลายอนุภาคได้ และพล็อตกราฟความถี่กับอนุภาคขนาดต่างๆ กับเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค จะสามารถหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติ กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
รูปที่ 2.6 แผนภาพองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEM [15]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกที่เป็นของแข็ง โดยลักษณะของแข็ง แบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบผงและแบบผลึกเดี่ยว ส่วนใหญ่จะทำการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง เนื่องจากการเตรียมผลึกเดี่ยวทำได้ยาก การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ชนิดของวัสดุ เนื่องจากสามารถบอกได้ว่าโครงสร้างมีความเป็นผลึกหรืออสัณฐาน (amorphous) เมื่อเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของสารตัวอย่างกับรูปแบบในฐานข้อมูล สามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในวัสดุได้ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) เป็นการพล็อตกราฟระหว่างความเข้ม (Intensity) กับตำแหน่งพีคที่มีค่ามุม 2θ สารชนิดเดียวกันจะมีรูปแบบเหมือนกัน คือ มีพีคที่มุมต่างๆเหมือนกัน และลำดับของพีคตามความสูงจะเหมือนกัน ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของเทคนิคนี้คือ จะขึ้นกับปริมาณธาตุที่สนใจในตัวอย่าง หากมีปริมาณน้อยเกินไปจะไม่ปรากฏพีค ข้อจำกัดอีกอย่างคือพีคในสเปกตรัมจะคมชัดเมื่อวัสดุนั้นมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในช่วงกว้าง ถ้าไม่เช่นนั้นพีคจะกว้างออก (Broadening)

2.6.3 เทคนิคการสะท้อนแสงกระจายของรังสียูวี-แสงขาว (UV-Vis diffuse reflectance, DRS)

ช่องว่างระหว่างพลังงาน (Bandgap Energy, E_g) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ต้องการเพื่อกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮล การวัดค่า E_g ใช้เทคนิคการสะท้อนแสงกระจายของรังสียูวี-แสงขาว โดยเมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดกาดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่า ซึ่งค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลดูดกลืนแสง โดยค่า E_g สามารถหาได้จากการพล็อตกราฟของค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง
 - PET Film (เปล่า)
 - Undoped TiO₂@PET Film
 - Ag doped TiO₂@PET Film
2. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
3. สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้ที่บแสงขนาด 50x60x90 เซนติเมตร
2. ปิเปต ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
3. ปีกเกอร์ ปริมาตร 100 และ 200 มิลลิลิตร
4. ขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร
5. แท่งแก้วคนสาร
6. เครื่องกวนผสม (stirring) และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirrer) ขนาด 4 เซนติเมตร
7. Batch reactor (หลอดแก้วด้านใน, ครอบแก้วด้านนอก)
8. หลอดไฟ LED
9. เข็มและหลอดฉีดยา (Syring) สำหรับเก็บตัวอย่าง 30 เซนติเมตร
10. ขวดแก้วสีชาสำหรับเก็บตัวอย่าง ปริมาตร 6 มิลลิลิตร
11. คิวเวทท์ (Cuvette)
12. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 4 ตำแหน่ง
13. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

3.3 การเตรียมแผ่นฟิล์ม

ฟิล์ม PET ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแล้ว ขนาด 5x10 เซนติเมตร

3.4 การเจือ TiO₂ และ Ag บนแผ่นฟิล์ม

ใช้เทคนิคสปีดเตอร์ริงในการเจือสารลงบนแผ่นฟิล์ม โดยควบคุมเวลาในการเคลือบและเจือโลหะที่ต่างกัน เลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากสามารถกำหนดปริมาณความเข้มข้นของสารที่เจือจากระยะเวลาในการสปีดเตอร์ริงได้แม่นยำกว่าการเตรียมด้วยวิธีอื่นๆ โดยกระบวนการเตรียมได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แผนการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง

ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ตัวแปรต้น (ชนิดตัวเร่ง)	ตัวแปรควบคุม
ผลของการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ	- PET Film (ฟิล์มเปล่า)	- เวลาสมดุลดูดซับ-คายซับ
	- ตัวเร่งที่ไม่เจือโลหะเงิน (P25 Undoped TiO ₂)	60 นาที
	- P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด P25 และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ	- เวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยแสง 120 นาที
	- P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด P25 ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ	- อุณหภูมิ
	- XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C	- ความเร็วรอบเครื่องปั่นกวาน 250 รอบต่อนาที
	- YD เคลือบ 2 ด้าน ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D	- ปริมาณสารละลายเมทิลีนบลู 150 มิลลิลิตร
	- ZE เคลือบ 2 ด้าน ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วิธีการทดลอง

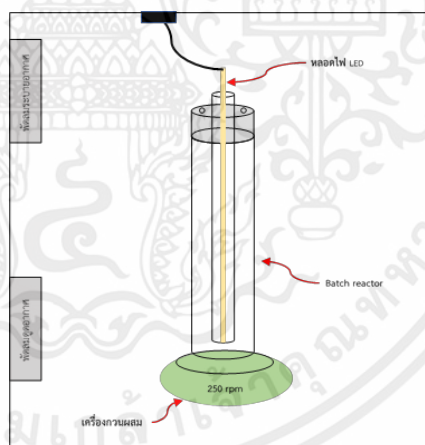
3.6.1 การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 ppm ด้วยวิธีการดังนี้

1. ชั่งผงสีย้อมเมทิลีนบลู 0.04 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ BOECO Germany และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 40 ppm (Stock solution)
2. เจือจางสารละลายจาก Stock solution โดยการปิเปตและทำการปรับปริมาตรให้ได้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 ppm เพื่อใช้ในการทดลอง
3. ในการเตรียมสารละลายทุกครั้ง สารละลายที่เตรียมจะถูกนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อตรวจสอบความเสถียรในการเตรียมสารละลายอยู่เสมอ โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู 2 ppm จะอยู่ที่ประมาณ 0.30-0.37

3.6.2 Photocatalytic

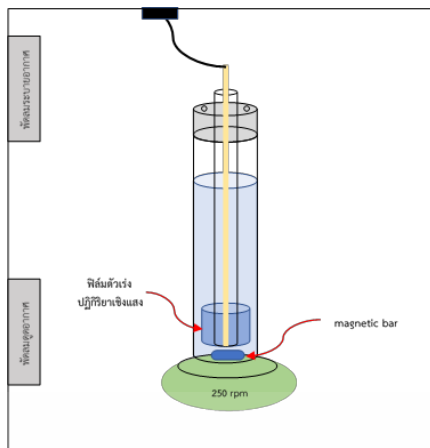
1. จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

2. ตรวจสอบตำแหน่งให้ระยะห่างระหว่างปลายหลอดไฟและขอบล่างของฟิล์มตัวเร่งอยู่ที่ประมาณ 0.5 เซนติเมตร
3. ใส่ magnetic bar ขนาด 4 เซนติเมตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นใส่ฟิล์มที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ ตามด้วยสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 ppm ปริมาณ 150 มิลลิลิตร (ทำในที่มืด) ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นทำการเปิดเครื่องปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 400 rpm ในตอนเริ่มต้นเพื่อให้ฟิล์มลอยตัวและทำการลดแรงปั่นกวนลงเป็น 250 rpm คงที่ตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดเมื่อทำการใส่ฟิล์มที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา

4. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่ทำการทดลองในที่มืดเป็นเวลา 60 นาทีเพื่อให้เกิดสมดุลการดูดซับและคายซับ โดยเก็บตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาที่ห่อด้วยฟอยล์ ทุกๆ 20 นาที ที่ 20, 40 และ 60 นาที ตามลำดับ ด้วยเข็มไซริงเก็บตัวอย่าง
5. เปิดพัดลมระบายอากาศและทำการฉายแสงด้วยหลอดไฟ LED เป็นเวลา 120 นาที โดยเก็บตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาที่ห่อด้วยฟอยล์ ทุกๆ 20 นาที ที่ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที ตามลำดับ ด้วยเข็มไซริงเก็บตัวอย่าง
6. นำตัวอย่างไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer เพื่อดูผลการดูดกลืนแสง
7. ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบผล
8. ทำการทดลองซ้ำกับฟิล์มชนิดเดิม เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการนำกลับมาใช้ใหม่

3.6.3 การวัดประเมินผล

ในการศึกษาครั้งนี้จะมีการวัดผล 2 ส่วนคือ วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง 5 ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5, 2, 2.5, 4 และ 5 ppm ตามลำดับ เพื่อนำไปจัดทำกราฟมาตรฐาน ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลู และการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เก็บจากการทำปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษา ทั้งในช่วงมืดเป็นเวลา 60 นาที และช่วงที่ฉายแสงด้วยแสงที่มองเห็นได้เป็นเวลา 120 นาที โดยการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองส่วนจะดำเนินการแบบเดียวกัน อธิบายขั้นตอนและรายละเอียดได้ต่อไปนี้

1. ตรวจสอบตัวอย่างด้วยเครื่อง Uv-vis spectrophotometer Evolution 201

2. ใช้โหมดการ Scan Wave length ของสารตั้งแต่ความยาวคลื่น 300-750 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้น้ำกลั่นเป็นสารละลาย blank , ใช้คิวเวทซ์ชนิดพลาสติก
4. ตั้งค่าการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าเครื่องมือตรวจวัด Uv-vis spectrometer Evolution 201

Data mode	Absorbance
Factor	1.00
Smooth	None
Derivative	None
Start wavelength (nm)	750.00
End wavelength (nm)	300.00
Bandwidth (nm)	1
Integration time (s)	0.10
Data interval (nm)	1.00
Scan speed (nm/min)	600.00
Estimated time (s)	80.3

5. นำผลค่าการดูดกลืนแสงที่ 664 nm มาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผล

3.6.3.1 การวัดผลหาค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีย้อมเมทิลีนบลู

ในการศึกษาจะทำการทดลองตรวจสอบหาค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อกำหนดความยาวคลื่นอ้างอิงที่จะนำมาใช้พิจารณาสำหรับการทำกราฟสารละลายมาตรฐานรวมถึงนำไปใช้ในการวิเคราะห์การย่อยสลายสีย้อมของสารละลายเมทิลีนบลูที่เกิดขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆต่อไป โดยทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง Uv-vis spectrometer Evolution 201

3.6.3.2 การวัดผลการแปรผันของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ทำการวัดผลค่าการดูดกลืนแสงและนำข้อมูลที่ได้จากตรวจสอบด้วยเครื่อง Uv-vis spectrometer Evolution 201 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆที่ทำการศึกษา มาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นที่ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง โดยแนวโน้มนั้นจะสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการทดลองและสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3.3 การวัดผล Photocatalytic Activity

วัดผล Photocatalytic Activity โดยการวัดผลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง Uv-vis spectrometer Evolution 201 และนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ มาแปลงข้อมูลเป็นความเข้มข้นด้วยกราฟสารละลายมาตรฐานและทำการสร้างกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลาการฉายแสงด้วยแสงที่มองเห็นได้ เพื่อเปรียบเทียบผล Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่างๆ

3.6.3.4 การวัดผลการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

เมื่อทำการทดลองแล้วนำตัวอย่างไปตรวจวัดผล สามารถวิเคราะห์ผลการย่อยสลายของสีย้อมได้โดยการแปลงข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ให้เป็นเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการย่อยสลายหรือ %Conversion ได้โดยสามารถหาประสิทธิภาพการย่อยสลายได้จากสมการที่ 3.1 [16]

$$\%Eff = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\% \approx \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ	C_0	คือ	ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาเริ่มต้น
	C_t	คือ	ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาใดๆ
	A_0	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาเริ่มต้น
	A_t	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดๆ

หลังจากทำการแปลงผลข้อมูลแล้วจึงนำผลข้อมูลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ มาสร้างกราฟประสิทธิภาพการย่อยสลายกับเวลา เพื่อทำการเปรียบเทียบกันเพื่อสังเกตและวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู จากนั้นทำการสรุปผลว่าการเจือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโลหะเงินสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ Photocatalytic Activity ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือหรือไม่ อย่างไร

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม PET ขนาด 5x10 เซนติเมตร ที่เคลือบสารเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์และโลหะเงิน ด้วยเทคนิคสปีดเตอร์ริง ในการทดลองนี้มีตัวอย่างทั้งสิ้น 22 ตัว ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิดของโลหะเงิน รูปแบบการเคลือบและเวลาที่ใช้ในการเจือด้วยเทคนิคสปีดเตอร์ริง ระบุรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงชื่อและเงื่อนไขต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

เงื่อนไข	ลักษณะการเคลือบ	ชนิด TiO ₂	ชนิด Ag	เวลาที่ใช้เคลือบ TiO ₂	เวลาที่ใช้เจือโลหะเงิน	ชื่อตัวเร่งปฏิกิริยา
1	2 ด้าน	P25	-	60 วินาที	-	P25.60
2	1 ด้าน	P25	A	ใช้เวลาเท่ากัน (60 วินาที)	20, 60, 120 และ 150 วินาที	P25A-20, P25A-60, P25A-120 และ P25A-150
3	2 ด้าน	P25	B	20, 60 และ 120 วินาที	20, 60 และ 120 วินาที	P25B.20-60 และ P25B.20-120
						P25B.60-20, P25B.60-60 และ P25B.60-120
						P25B.120-20, P25B.120-60 และ P25B.120-120
4	2 ด้าน	X	C	20, 60 และ 120 วินาที	ใช้เวลาเท่ากัน (60 วินาที)	XC.20, XC.60 และ XC.120
5	2 ด้าน	Y	D	20, 60 และ 120 วินาที	ใช้เวลาเท่ากัน (60 วินาที)	YD.20, YD.60 และ YD.120
6	2 ด้าน	Z	E	20, 60 และ 120 วินาที	ใช้เวลาเท่ากัน (60 วินาที)	ZE.20, ZE.60 และ ZE.120

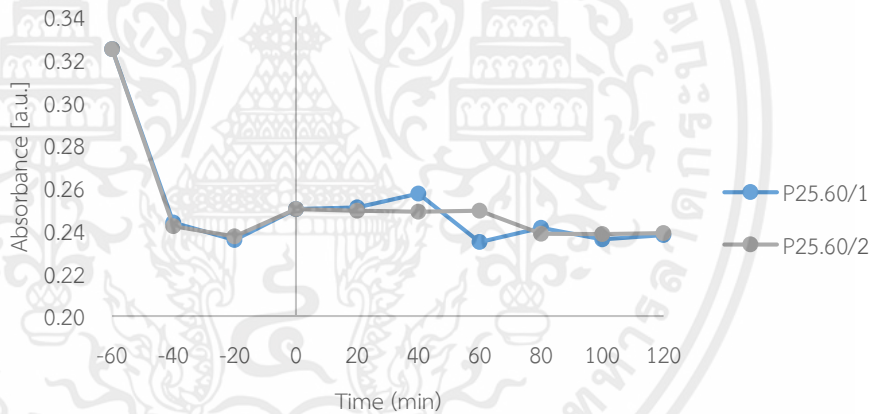
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic Activity)

ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ด้วยแสงที่มองเห็นได้ในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยทำที่สภาวะควบคุมเดียวกัน (ความเข้มข้นเริ่มต้น, อุณหภูมิ, ปริมาณ, เวลา) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน สรุปผลในรูปแบบ Photocatalytic Activity เพื่อดูแนวโน้มพฤติกรรมของการย่อยสลายสีย้อมที่เวลาในการทดลองต่างๆ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงจะสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารละลาย

4.2.1 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการเจือโลหะเงิน (P25 Undoped TiO₂)

พฤติกรรมการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เจือโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าในช่วงมืดจะมีการดูดซับคายซับของฟิล์มตัวเร่งอย่างชัดเจน ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงการฉายแสงที่มองเห็นได้ ความเข้มข้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่

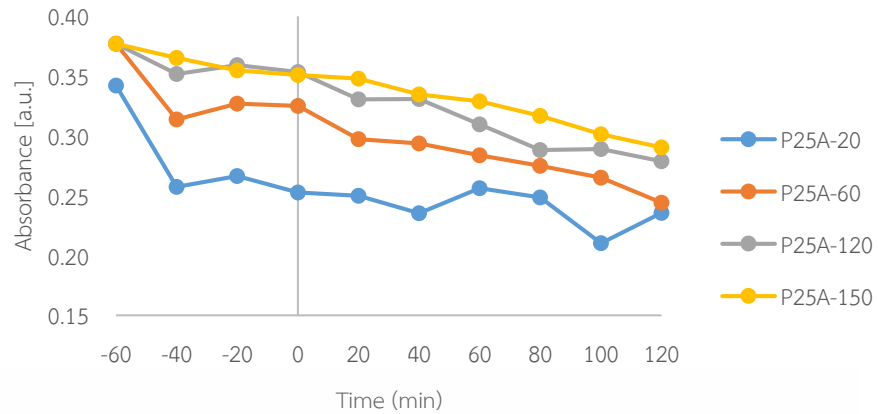


รูปที่ 4.1 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เจือโลหะเงินภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.2.2 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ

พฤติกรรมการย่อยสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าในช่วงมืดจะมีการดูดซับคายซับของฟิล์มตัวเร่งเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงการฉายแสงที่มองเห็นได้ความเข้มข้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยแนวโน้มที่ลดลงจะชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเจือโลหะเงินชนิด A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

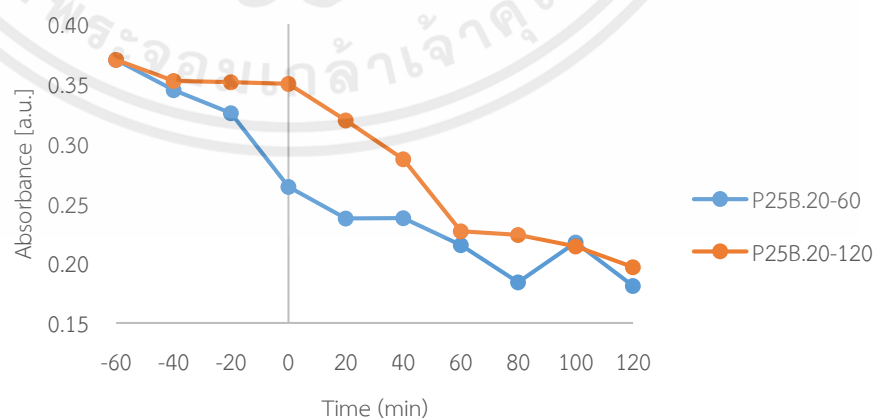


รูปที่ 4.2 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25A ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.2.3 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ

พฤติกรรมการย่อยสลายสีของตัวเร่งปฏิกิริยา P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่เวลาการเคลือบ 20, 60 และ 120 วินาที ผลลัพธ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือความเข้มข้นมีแนวโน้มลดลงแปรผันตรงกับเวลาที่เจือโลหะเงินชนิด B แสดงผลดังรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อมีการเจือโลหะเงินเพิ่มแนวโน้มความเข้มข้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดกว่าตัวเร่งที่ไม่เจือโลหะและดีกว่าตัวเร่งที่เคลือบเพียงด้านเดียว

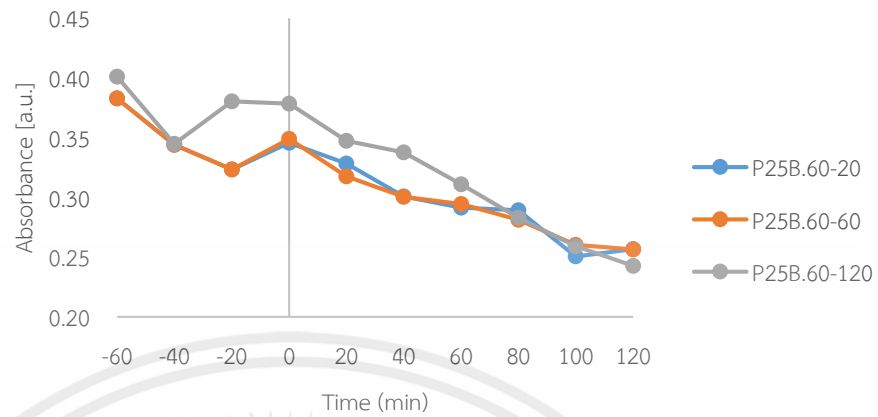
4.2.3.1 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.20)



รูปที่ 4.3 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.20 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

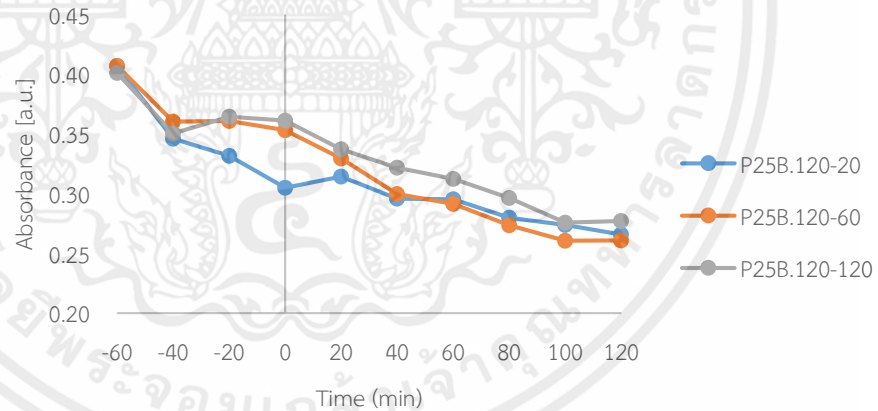
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.60)



รูปที่ 4.4 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.60 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.2.3.3 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.120)

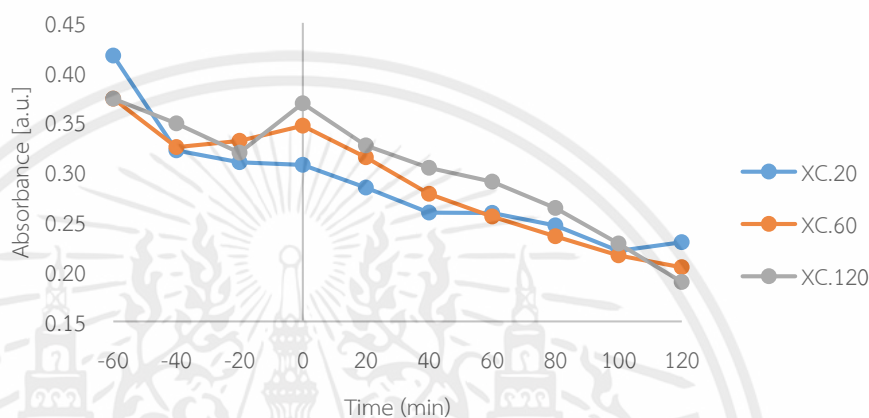


รูปที่ 4.5 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.120 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C

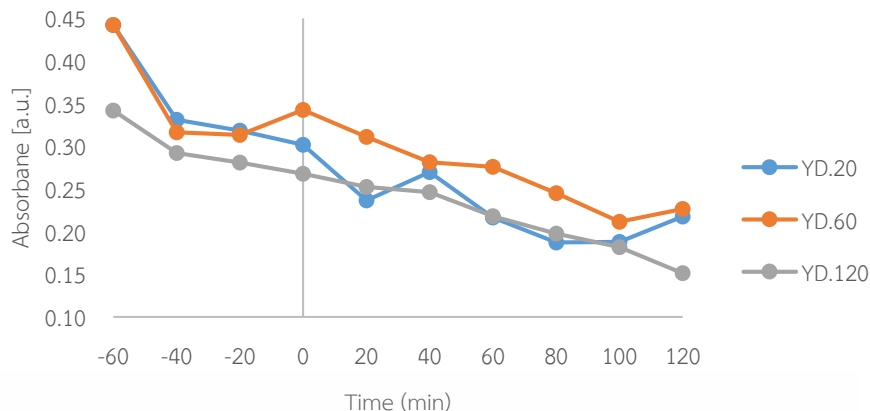
พฤติกรรมของการย่อยสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือด้วยโลหะเงินชนิด C แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูมีแนวโน้มลดลงแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเจือไทเทเนียม ชนิด XC และลดลงต่ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ



รูปที่ 4.6 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา XC ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.2.5 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ YD เคลือบ 2 ด้านด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D

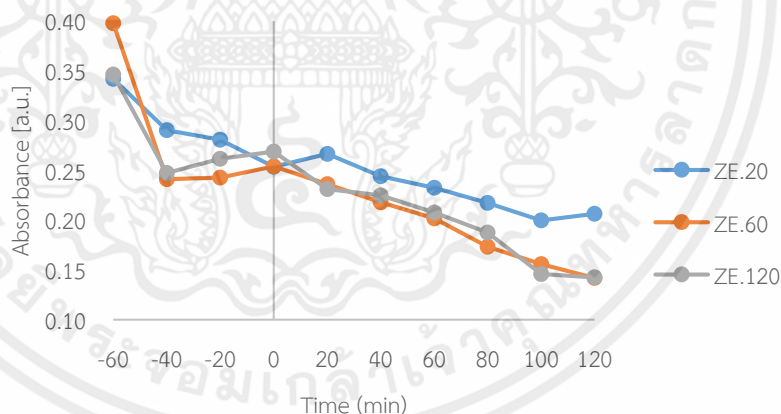
จากรูปที่ 4.7 พฤติกรรมของการย่อยสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบ 2 ด้านด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D พบว่าที่เวลาเคลือบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y 20 และ 60 วินาที มีพฤติกรรมลดลงของความเข้มข้นไม่ต่างกัน มากนัก วิเคราะห์ได้ว่าที่เวลาดังกล่าวอาจยังไม่ใช่เวลาที่สามารถนำมาเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลง ได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูมีแนวโน้มลดลงชัดเจนเมื่อเจือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่ 120 วินาที



รูปที่ 4.7 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา YD ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.2.6 Photocatalytic Activity ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E

พฤติกรรมการย่อยสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E มีแนวโน้มลดลงชัดเจนแปรผัน ตรงกับเวลาที่ใช้ในการเจือไทเทเนียมชนิด Z แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 Photocatalytic Activity ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา ZE ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความเข้มข้นสีข้อมเมทิลินบลูที่เปลี่ยนแปลงไปจากการย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (%Conversion)

การพิจารณาผล %Conversion จะทำให้ทราบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีข้อมเมทิลินบลูได้มากเพียงใด แปรผกผันกับความเข้มข้นและค่าการย่อยสลายสีข้อมเมทิลินบลู (Photodegradation) เมื่อ %Conversion มาก แสดงว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นดี

4.3.1 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือโลหะเงิน (P25 Undoped TiO₂)

จากการทดลองพบว่าการย่อยสลายสีข้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ไม่มีการเจือโลหะเงินให้ค่า %Conversion ต่ำมาก เฉลี่ยอยู่ที่ 4% แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 ที่ไม่มีการเจือโลหะเงิน (P25 Undoped TiO₂)

Time (min)	%Conversion	
	Blank	
	P25.60/1	P25.60/2
0	0.00	0.00
20	0.27	0.28
40	2.61	0.48
60	5.61	0.28
80	3.18	4.24
100	5.15	4.30
120	4.43	4.08

4.3.2 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ

จากการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4.3 พบว่าการย่อยสลายสีข้อมเมทิลินบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเวลาเท่ากัน และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาต่างกัน พบว่าตัวเร่ง P25A.60 ที่เจือโลหะเงินเป็นเวลา 60 วินาที ให้ค่า %Conversion สูงสุด 23.02% สำหรับตัวเร่งในเงื่อนไขนี้ข้อสังเกตว่าตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดกลับไม่ได้ใช้เวลาเจือนานที่สุด วิเคราะห์ได้ว่าที่เวลา 60 วินาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งออกมาดีที่สุดในการเจือโลหะเงินสำหรับเงื่อนไขนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับตัวเร่ง P25A.20 เป็นที่น่าสังเกตว่าที่เวลา 100 นาที %Conversion สูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญและลดลงต่ำหลังจากนั้น กรณีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มองเห็นได้ดีที่สุดที่เวลา 100 นาที แต่ถึงกระนั้นก็ยังเป็น %Conversion ที่ต่ำกว่าการเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาอื่นๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ

Time (min)	%Conversion			
	P25A			
	P25A-20	P25A-60	P25A-120	P25A-150
0	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.97	7.90	5.98	0.80
40	6.23	8.93	5.95	4.31
60	1.28	11.74	11.52	5.84
80	1.49	14.24	17.14	9.07
100	15.25	17.06	16.98	13.16
120	6.13	23.02	19.64	16.08

4.3.3 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเงื่อนไขต่างกันทั้งเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และเวลาในการเจือโลหะเงิน P25B พบว่าการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งจะแปรผันตรงกับเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และเวลาในการเจือโลหะเงิน โดยเงื่อนไขของตัวเร่งที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เวลา 20 วินาที พบว่าการเจือโลหะเงินชนิด B เป็นเวลา 120 วินาที จะให้ผลดีที่สุด (45.80%) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.4 และในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เวลา 60 วินาที พบว่าการเจือโลหะเงินชนิด B เป็นเวลา 120 วินาที ให้ผลดีที่สุด (37.40%) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.5

ในขณะที่กรณีของตัวเร่งที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 นาที พบว่าการเจือโลหะเงินชนิด B ที่ 60 วินาทีให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.6 ต่างจากแนวโน้มที่กล่าวมาก่อนหน้าในกรณีนี้วิเคราะห์ได้ว่าเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและช่วยให้ตัวเร่งมีประสิทธิภาพมากขึ้นเช่นเดียวกัน อาจสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ด้วยการเพิ่มเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ให้นานมากขึ้นแทนการเจือโลหะเงินด้วยเวลานาน

4.3.3.1 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.20)

ตารางที่ 4.4 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.20)

Time (min)	%Conversion	
	P25B.20	
	P25A.20-60	P25A.20-120
0	0.00	0.00
20	10.58	9.11
40	10.52	18.81
60	19.61	36.86
80	32.13	37.73
100	18.73	40.65
120	33.33	45.80

4.3.3.2 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.60)

ตารางที่ 4.5 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.60)

Time (min)	%Conversion		
	P25B.60		
	P25B.60-20	P25B.60-60	P25B.60-120
0	0.00	0.00	0.00
20	5.29	9.46	8.58
40	13.61	14.56	11.26
60	16.47	16.36	18.62
80	17.10	20.37	26.32
100	28.83	26.62	32.83
120	26.93	27.76	37.40

4.3.3.3 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 นาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.120)

ตารางที่ 4.6 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่ เวลาการเจือต่างๆ (P25B.120)

Time (min)	%Conversion		
	P25B		
	P25B.120-20	P25B.120-60	P25B.120-120
0	0.00	0.00	0.00
20	3.23	6.97	6.91
40	3.13	15.81	11.36
60	3.32	18.25	14.10
80	8.60	23.54	18.69
100	10.75	27.37	24.66
120	13.48	27.34	24.26

4.3.4 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C

จากการผลทดลองแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.7 พบว่าการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลาต่างกัน และโลหะเงินชนิด C ที่เวลาเดียวกัน พบว่าตัวเร่ง XC.120 ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ X ที่ 120 วินาที ให้ค่า %Conversion สูงสุด 50.72% สำหรับตัวเร่งในเงื่อนไขนี้ข้อสังเกตว่าตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุด แปรผันตรงกับเวลาการเคลือบ และเป็นตัวเร่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในบรรดาทุกเงื่อนไข

ตารางที่ 4.7 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C

Time (min)	%Conversion		
	XC		
	XC.20	XC.60	XC.120
0	0.00	0.00	0.00
20	7.82	9.56	11.99
40	16.46	20.66	18.31
60	16.51	27.58	22.22
80	20.85	33.53	29.72
100	29.57	39.34	39.84
120	26.62	42.95	50.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D

จากผลการทดลองแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.8 พบว่าการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ด้วยเวลาต่างกัน และเจือโลหะเงินชนิด D ที่ 60 วินาที พบว่าตัวเร่ง YD.120 ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y เป็นเวลา 120 วินาที ให้ค่า Conversion สูงสุด 42.83% สำหรับตัวเร่งในเงื่อนไขนี้ข้อสังเกตว่า ตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดแปรผันตรงกับเวลาเคลือบที่นานที่สุด

ตารางที่ 4.8 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D

Time (min)	%Conversion		
	YD		
	YD.20	YD.60	YD.120
0	0.00	0.00	0.00
20	10.36	9.80	5.76
40	5.81	18.82	8.02
60	0.00	20.59	18.32
80	22.88	29.96	25.78
100	11.15	40.28	31.66
120	29.86	35.73	42.83

4.3.6 %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E

จากผลการทดลองแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.9 พบว่าการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z ด้วยเวลาต่างกัน และเจือโลหะเงินชนิด E ที่ 60 วินาที พบว่าตัวเร่ง ZE.60 ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z 60 วินาที ให้ค่า %Conversion สูงสุด 46.73% ซึ่งใกล้เคียงกับผลของตัวเร่งเงื่อนไขเดียวกันที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z ด้วยเวลา 120 วินาที (46.37%) อาจสรุปได้ว่าเวลาที่เลือกใช้ในการเจือนี้ยังไม่มากพอที่จะทำให้เห็นความแตกต่างของผลลัพธ์ซึ่งอาจเพิ่มเวลาในการเจือได้อีก

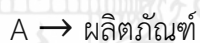
ตารางที่ 4.9 แสดงผล %Conversion ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E

Time (min)	%Conversion		
	ZE		
	ZE.20	ZE.60	ZE.120
0	0.00	0.00	0.00
20	5.36	7.46	13.90
40	4.00	14.97	16.15
60	8.85	21.73	22.44
80	15.30	33.64	29.82
100	22.65	40.94	45.10
120	19.88	46.73	46.37

4.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่ง (1st Oder Rate of reaction) [17]

วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อพิจารณาและเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการหาค่าคงที่อัตรา (Rate Constant (k)) เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว

ปฏิกิริยา



อัตราการเกิดปฏิกิริยา

$$r = \frac{-d[A]}{dt} = k[A]$$

จัดสมการใหม่เป็น

$$\frac{d[A]}{[A]} = -kdt$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ ถึง $t = t$

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt$$

จะได้ (เมื่อ $[A]_0$ เป็นความเข้มข้นของ A ที่เวลา $t = 0$)

$$\ln [A] - \ln [A]_0 = -kt$$

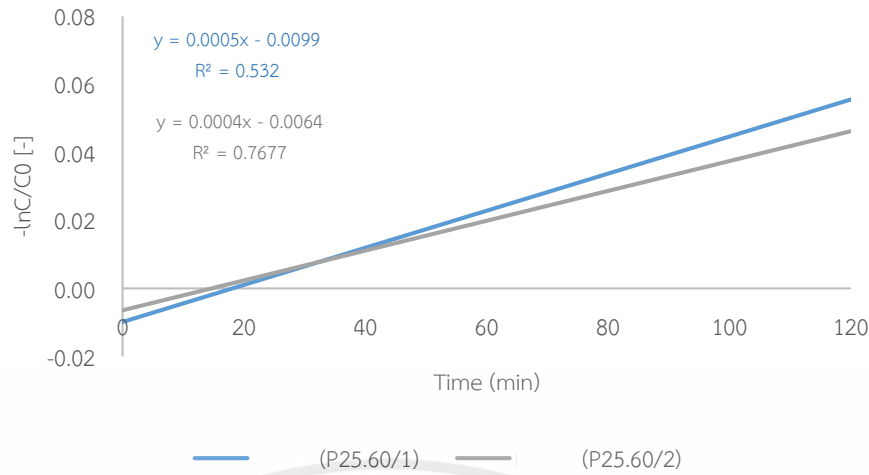
หรือ

$$2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt$$

4.4.1 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการเจือโลหะเงิน (P25 UndopedTiO₂)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้เจือโลหะเงินจะให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำมาก ประมาณ $4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มองเห็นได้ ไม่ได้

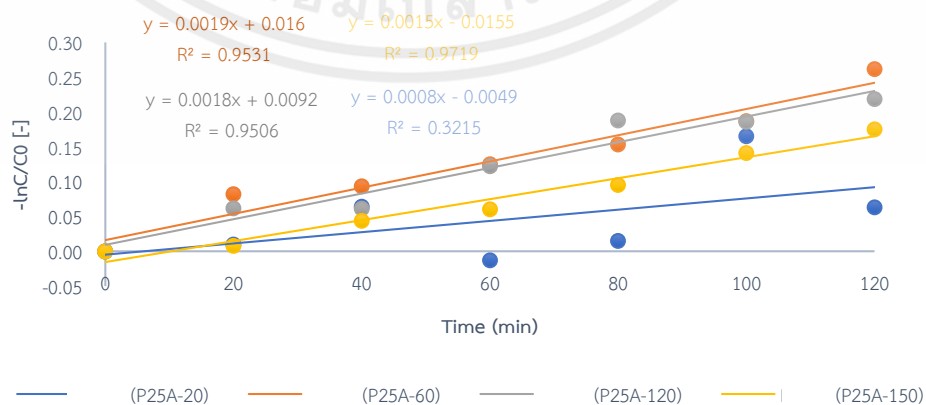
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการเจือโลหะเงินภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.4.2 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25 เคลือบด้านเดียวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) และเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือต่างๆ

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเงื่อนไขนี้ พิจารณาปัจจัยของเวลาในการเจือโลหะเงินชนิด A ที่เวลาต่างๆ ตัวเร่ง P25A-20, P25A-60, P25A-120 และ P25A-150 ให้ค่า Rate constant 8×10^{-4} , 1.9×10^{-3} , 1.8×10^{-3} และ $1.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ โดยตัวเร่ง P25A-60 ที่เจือโลหะชนิด A ที่เวลา 60 วินาที ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด $1.9 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเวลาในการเจือส่งผลต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายได้จริงและแสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาเจือโลหะมากไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเสมอไป ในกรณีนี้อาจสรุปได้ว่าเวลา 60 วินาที คือเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขนี้ หากเจือน้อยหรือมากกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25A ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

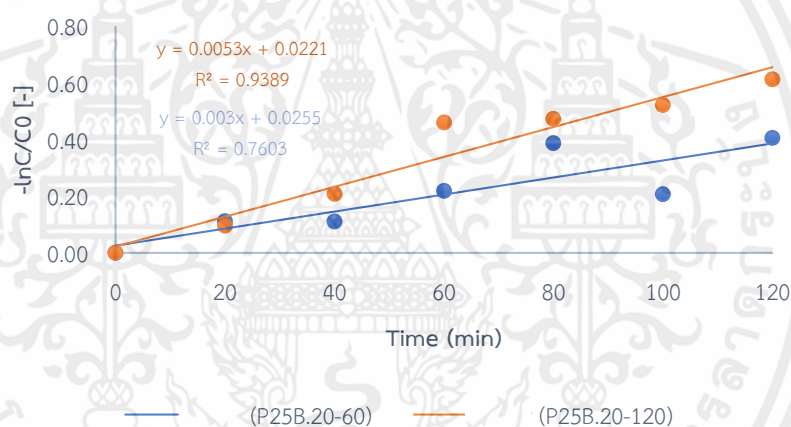
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยา P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ

เมื่อพิจารณาปัจจัยของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เคลือบ สามารถวิเคราะห์ภาพรวมได้ว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และปริมาณของโลหะเงินที่แปรผันตรงกับเวลาในการเคลือบนั้น ส่งผลกับประสิทธิภาพของตัวเร่ง โดยให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการเคลือบทั้ง 2 ด้านของฟิล์ม

4.4.3.1 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 20 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.20)

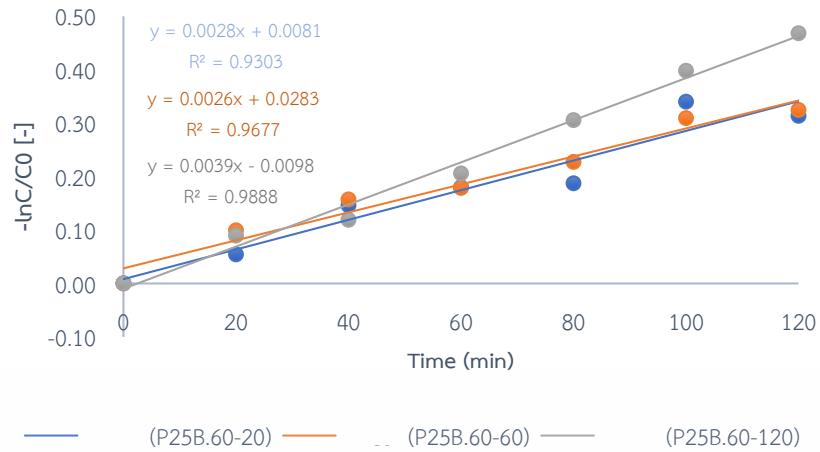
สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเงื่อนไขนี้ พบว่าตัวเร่ง P25B.20-60 และ P25B.20-120 ให้ค่า Rate constant 3×10^{-3} และ $5.3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ พบว่าตัวเร่ง P25B.20-120 ที่เจือโลหะชนิด B ที่เวลา 120 วินาที ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีกว่า แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.20 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.4.3.2 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.60)

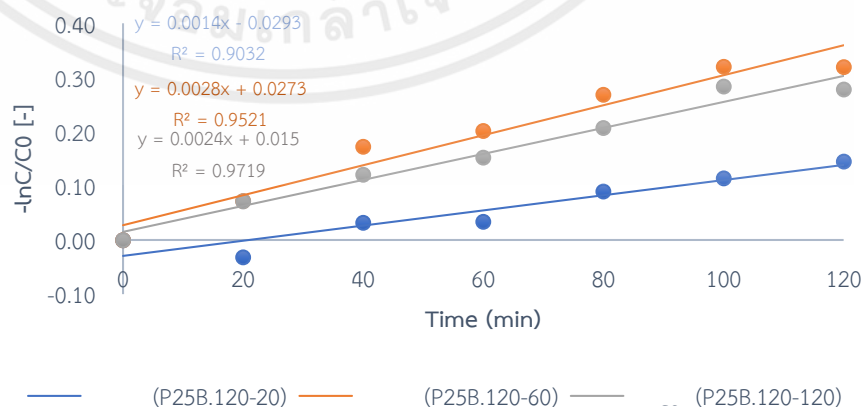
สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเงื่อนไขนี้ พบว่าตัวเร่ง P25B.60-20, P25B.60-60 และ P25B.60-120 ให้ค่า Rate constant 2.8×10^{-3} และ 2.6×10^{-3} และ $3.9 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ สรุปได้ว่าตัวเร่ง P25B.60-120 ที่เจือโลหะชนิด B นานที่สุด ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งในเงื่อนไขเดียวกัน แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25B.60 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.4.3.3 เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือต่างๆ (P25B.120)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเงื่อนไข พบว่าตัวเร่ง P25B.120-20, P25B.120-60 และ P25B.120-120 ให้ค่า Rate constant 1.4×10^{-3} และ 2.8×10^{-3} และ $2.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ สรุปได้ว่าตัวเร่ง P25B.120-60 ให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งในเงื่อนไขเดียวกัน แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.13 เป็นที่น่าสนใจว่าในกรณีนี้ตัวเร่งที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดกลับไม่ได้ใช้เวลาในการเจือโลหะเงินนานที่สุดเหมือนเงื่อนไขอื่นๆ วิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยของเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงที่มองเห็นได้ กล่าวคือ โดยปกติไทเทเนียมไดออกไซด์จะกระตุ้นได้ไม่ดีภายใต้แสงที่มองเห็นได้แต่หากเคลือบในปริมาณที่มากพอ (แปรผันตรงกับเวลาเคลือบ) ก็สามารถที่จะช่วยให้ตัวเร่งมีประสิทธิภาพให้ถูกกระตุ้นได้ดีขึ้น

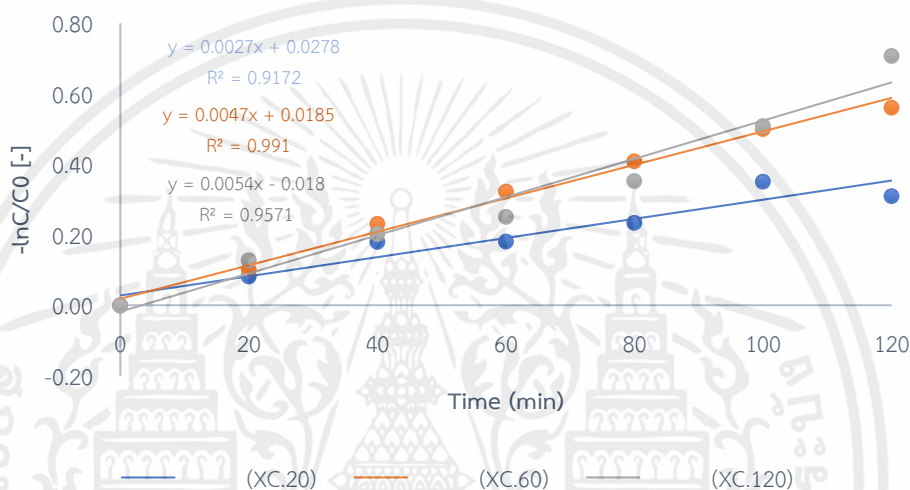


รูปที่ 4.13 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

P25B.120 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด X ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด C

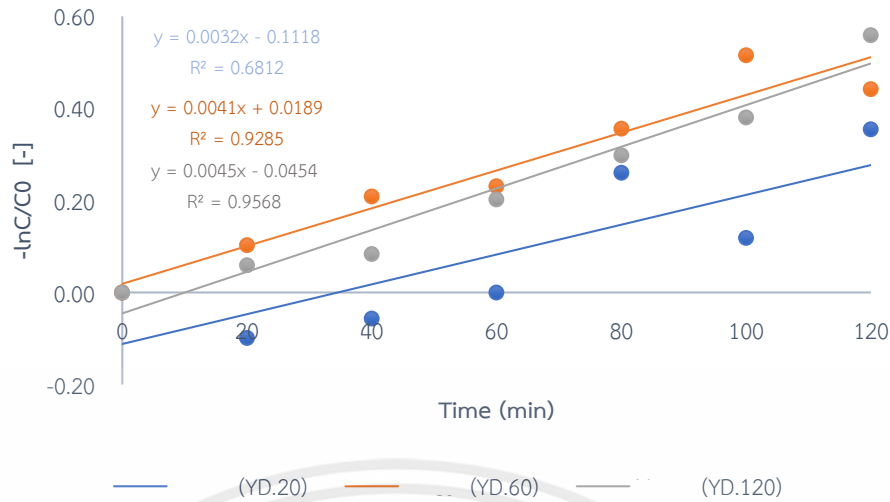
เมื่อพิจารณาปัจจัยของชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเงื่อนไขนี้ พบว่า ตัวเร่ง XC.20, XC.60 และ XC.120 ให้ค่า Rate constant 2.7×10^{-3} และ 4.7×10^{-3} และ $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวเร่งไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y เคลือบที่ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด C ให้ผลประสิทธิภาพการย่อยสลายเชิงแสงภายใต้แสงที่มองเห็นได้ดีที่สุดในบรรดาทุกเงื่อนไข โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา XC ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.4.5 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยา YD เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด D

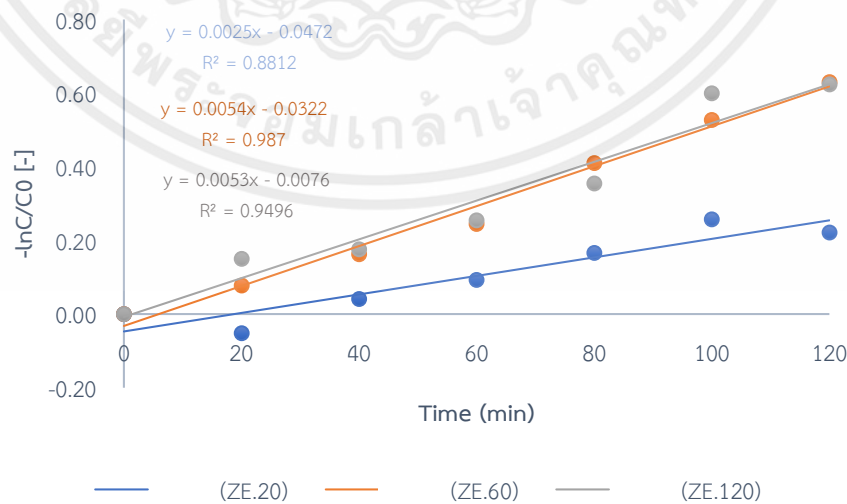
สำหรับเงื่อนไขนี้พบว่าตัวเร่ง YD.20, YD.60 และ YD.120 ให้ค่า Rate constant 3.2×10^{-3} และ 4.1×10^{-3} และ $4.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ พบว่าการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ไม่ได้ให้ผลลัพธ์โดดเด่นไปกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอื่นๆเท่าใดนัก แต่ภายในเงื่อนไขเดียวกัน ตัวเร่ง YD.120 ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่ 120 วินาที ให้ผลประสิทธิภาพการย่อยสลายเชิงแสงภายใต้แสงที่มองเห็นได้สูงสุด โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา $4.5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา YD ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

4.4.6 Rate Constant ของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบต่างๆ และเจือโลหะเงินชนิด E

สำหรับเงื่อนไขนี้พบว่าตัวเร่ง ZE.20, ZE.60 และ ZE.120 ให้ค่า Rate constant 2.5×10^{-3} และ 5.4×10^{-3} และ $5.3 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 วิเคราะห์ที่ได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z เคลือบที่ 60 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด E ที่ 60 วินาที ให้ผลประสิทธิภาพการย่อยสลายเชิงแสงโดยมีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ โดยให้ผลเท่ากับตัวอย่างที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z ในข้อ 4.4.4 แต่มีข้อสังเกตว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 60 วินาที



รูปที่ 4.16 Rate constant ของการย่อยสลายสารละลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZE ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยโลหะเงินด้วยแสงที่มองเห็นได้ภายใต้ตัวแปรควบคุมเดียวกันตลอดการทดลอง กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 2 ppm ปริมาณ 150 มิลลิลิตร ทำการทดลองในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที และฉายแสงที่มองเห็นได้เป็นเวลา 120 นาที

ผลการทดลองฟิล์มเปล่าที่ไม่ได้เคลือบสารเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงพิสูจน์ให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มที่ใช้เป็นสับเซสตรตในการทดลองนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เมื่อเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เจือโลหะกับที่เจือโลหะพบว่าตัวเร่งที่เจือโลหะเงินให้ผล %Conversion และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดีกว่าตัวเร่งที่ไม่เจือ แสดงให้เห็นว่าโลหะเงินมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งได้ เมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบสารเร่งปฏิกิริยาและเจือโลหะ 1 ด้าน และ 2 ด้าน พบว่าการเจือทั้ง 2 ด้านนั้นให้ผลที่ดีกว่าอย่างมีนัยยะสำคัญเนื่องจากแสงสามารถสัมผัสกับตัวเร่งได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการสปีดเตอร์ริงต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเจือ เมื่อใช้เวลาเจือนานขึ้นก็ให้ผลในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้น

ตลอดการทดลองแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่พิจารณาออกได้เป็น 6 เงื่อนไขหลักและแยกย่อยออกเป็น 22 ตัวอย่าง สำหรับเงื่อนไขตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการเจือโลหะ (P25 Undoped TiO_2) ให้ค่า Conversion 4% ตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดในเงื่อนไขของตัวเร่งปฏิกิริยา P25A เคลือบด้านเดียว ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเวลาเท่ากัน และโลหะเงินชนิด A ที่เวลาการเจือ 20, 60, 120 และ 150 วินาที คือ P25A-60 (Conversion 23.02%) ตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดในเงื่อนไขของตัวเร่งปฏิกิริยา P25B เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เวลาการเคลือบ 20, 60 และ 120 วินาที และโลหะเงินชนิด B ที่เวลาการเจือ 20, 60, และ 120 วินาที คือ P25B.20-120 (Conversion 45.80%) , P25B.60-120 (Conversion 37.40%) , P25B.120-60 (Conversion 27.34%) ตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดในเงื่อนไขของตัวเร่งปฏิกิริยา XC เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลาการเคลือบ 20, 60 และ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด C คือ XC.120 (Conversion 50.72%) ตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดในเงื่อนไขของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ YD เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Y ที่เวลาการเคลือบ 20, 60 และ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด D คือ YD.120 (Conversion 42.83%) และตัวเร่งที่ให้ผลดีที่สุดในเงื่อนไขของตัวเร่งปฏิกิริยา ZE เคลือบ 2 ด้านด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Z ที่เวลาการเคลือบ 20, 60 และ 120 วินาที และเจือโลหะเงินชนิด E คือ ZE.60 (Conversion 46.73%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูภายใต้แสงที่มองเห็นได้ดีที่สุดในบรรดาตัวอย่างที่ทำการพิจารณา คือ XC.120 ซึ่งมีเงื่อนไขใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด X ที่เวลา 120 วินาที ร่วมกับการเจือโลหะเงินชนิด C ผลลัพธ์ได้ค่า %Conversion 50.72% และให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาสูงสุด $5.4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ และวิเคราะห์ว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำหรือไม่ เพราะสาเหตุใด
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงปริมาณและองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์และโลหะเงินที่ใช้เจือ โดยการนำตัวเร่งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลกับประสิทธิภาพของตัวเร่งอย่างไร
3. ควรมีการศึกษาการออกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับระบบที่ทำการศึกษาวิจัย เพื่อให้มีความถูกต้อง และลดข้อผิดพลาดต่างๆลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดร.นัตตา เวชชากุล, บทความ ไทเทเนียมไดออกไซด์ กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ. (2012)
- [2] DaNa, **Crystal Structures of Nanomaterials** [Online]. Available:
- [3] Haoran Dong , Guangming Zeng , Lin Tang , Changzheng Fan , Chang Zhang , Xiaoxiao He , Yan He , **An overview on limitations of TiO₂-based particles for photocatalytic degradation of organic pollutants and the corresponding countermeasures**, (2015) <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.038>
- [4] P. Nyamukamba, L. Tichagwa, S. Mamphweli and L. Petrik, **Silver/Carbon Codoped Titanium Dioxide Photocatalyst for Improved Dye Degradation under Visible Light**, (2017) <https://doi.org/10.1155/2017/3079276>
- [5] Devagi Kanakaraju , Feniellia Diwvya anak Kutiang , Ying Chin Lim , Pei Sean Goh, **Recent progress of Ag/TiO₂ photocatalyst for wastewater treatment: Doping, co-doping, and green materials functionalization**, (2022) <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101500>
- [6] Food Network Solution ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร, **Polyethylene terephthalate (PET) / พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต**, [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1912/pet-polyethylene-terephthalate>
- [7] SYNCHROTRON THAILAND, **การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)**, (2022), [Online]. Available: <https://www.slri.or.th/bl6a/process/film-deposition/12-process/44-sputtering.html>
- [8] LNK UNIVERSITY OF MICHIGAN WIKI, **Sputter Deposition.png**, [Online]. Available: https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/File:Sputter_Deposition.png
- [9] D. Komaraiah , E. Radha , J. Sivakumar , M.V. Ramana Reddy , R. Sayanna, **Photoluminescence and photocatalytic activity of spin coated Ag⁺ doped anatase TiO₂ thin films**, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110401>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ลักษณะทั่วไปของการย้อมสี [Online]. Available:
https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/enenv0250at_ch2.pdf
- [11] Wikipedia, **เมทิลีนบลู**, [Online]. Available
<https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%99%E0%B8%9A%E0%B8%A5%E0%B8%B9>
- [12] Seyed Hassan Sharifi Pajaie, Saltanat Archin, Ghasem Asadpour, **Chemical structure of methylene blue**, [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-methylene-blue_fig2_324315140
- [13] จตุพร วิทยาคุณ and นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, **Catalysis: Fundamentals and Applications** (First Revised Version). 2018.
- [14] **Scanning Electron Microscope** - Radiological and Environmental Management - Purdue University, [Online]. Available:
<https://www.purdue.edu/ehps/rem/images/old%20rs%20graphics/sem2.gif>
- [15] **Transmission Electron Microscope(TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน | กล้องจุลทรรศน์ microscope กล้องไมโครสโคป กล้องสเตอริโอ**, [Online]. Available:
<http://microscopes.in.th/wp-content/uploads/2011/11/Transmission-Electron-MicroscopeTEM1.png>
- [16] Dali Rani Sarker a,b, Md Nizam Uddin, Md Elias a,c, Zidnia Rahman , Ratan Kumar Paul , Iqbal Ahmed d Siddiquey , Md Abul Hasnat , Mohammad Razaul Karim, Md Azharul Arafath , **P-doped TiO₂-MWCNTs nanocomposite thin films with enhanced photocatalytic activity under visible light exposure**, (2021)
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100364>
- [17] อันดับของปฏิกิริยา [Online]. Available: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/kinetics/first_order.htm

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered stupas or pagodas, each resting on a decorative base. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์' (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (Phra Chomklao Jao Kun Thara Ladkrabang).

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ภาพอุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.2 ภาพแผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

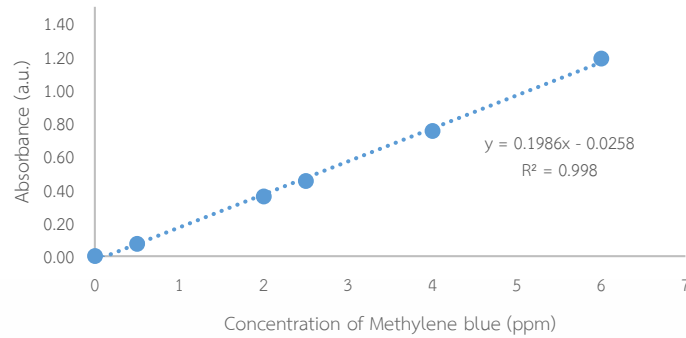


ภาคผนวก ข

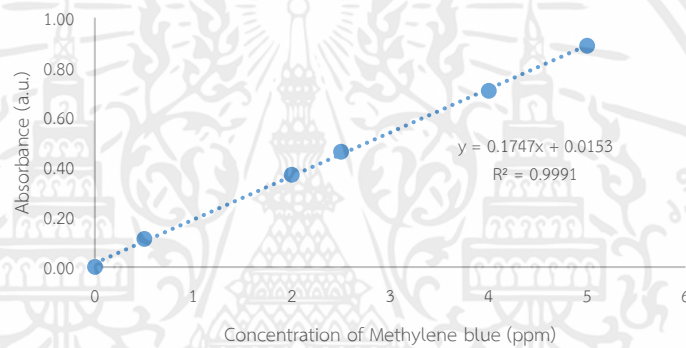
การคำนวณความเข้มข้นของสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

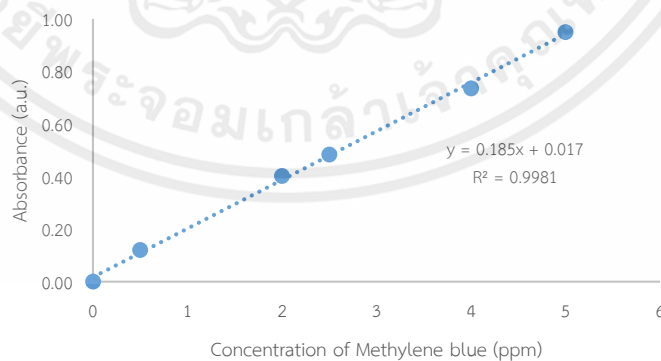
ข.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง P25 และ P25A

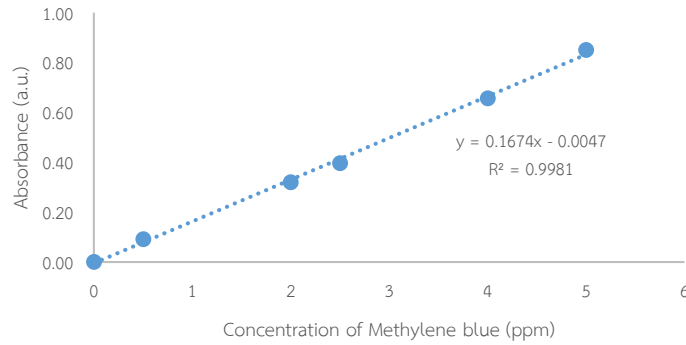


รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง P25B , XC และ ZE.20

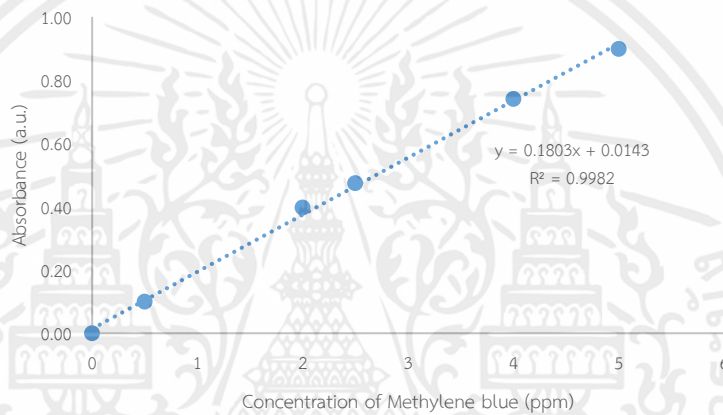


รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง YD.20 และ YD.60

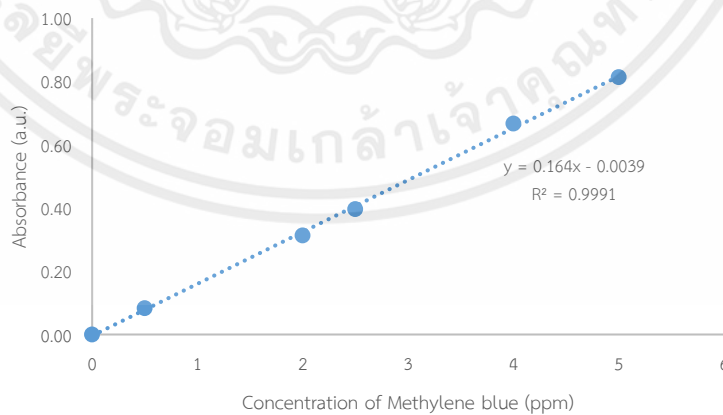
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง YD.120



รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง ZE.60



รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูสำหรับตัวเร่ง ZE.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (ppm)																						
	blank		P25A				P25B.20		P25B.60			P25B.120			XC			YD			ZE		
	P25. 60/1	P25. 60/2	P25 A- 20	P25 A- 60	P25 A- 120	P25 A- 150	P25B. 20-60	P25B. 20- 120	P25B. 60-20	P25B. 60-60	P25B. 60- 120	P25B. 120-20	P25B. 120-60	P25B. 120- 120	XC. 20	XC. 60	XC. 120	YD.20	YD.60	YD.120	ZE. 20	ZE. 60	ZE. 120
0	1.39	1.39	1.40	1.77	1.91	1.90	1.42	1.92	1.89	1.91	2.08	1.66	1.93	1.98	1.67	1.9	2.02	1.54	1.76	1.63	1.36	1.33	1.66
20	1.39	1.39	1.39	1.63	1.79	1.88	1.27	1.74	1.79	1.73	1.90	1.71	1.80	1.84	1.54	1.72	1.78	1.70	1.59	1.53	1.44	1.23	1.43
40	1.43	1.38	1.32	1.61	1.80	1.82	1.27	1.56	1.63	1.63	1.85	1.61	1.63	1.75	1.4	1.5	1.65	1.63	1.43	1.50	1.31	1.13	1.40
60	1.31	1.39	1.42	1.56	1.69	1.79	1.14	1.21	1.58	1.60	1.69	1.60	1.58	1.70	1.4	1.37	1.58	1.54	1.40	1.33	1.24	1.04	1.29
80	1.35	1.33	1.38	1.51	1.58	1.72	0.97	1.19	1.57	1.52	1.53	1.52	1.48	1.61	1.32	1.26	1.42	1.19	1.23	1.21	1.16	0.88	1.17
100	1.32	1.33	1.19	1.46	1.58	1.65	1.16	1.14	1.35	1.40	1.40	1.48	1.40	1.49	1.18	1.15	1.22	1.37	1.05	1.11	1.06	0.78	0.91
120	1.33	1.33	1.32	1.36	1.53	1.59	0.95	1.04	1.38	1.38	1.30	1.43	1.40	1.50	1.23	1.08	1.00	1.08	1.13	0.93	1.09	0.71	0.89