

การย่อยสลายสี้อมโรตามีนปีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก  
โดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การย่อยสลายสี้อมโรตามีนปีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก  
โดยใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF RHODAMINE B  
USING METAL-ORGANIC FRAMEWORK



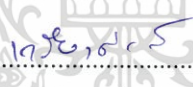
A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การย่อยสลายสีย้อมโรตามีนปีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้  
วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์  
โดย นางสาวสิรภัทร นิลวิเชียร  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

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

  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

  
.....กรรมการ  
(อ.บุญชัย โชติวิริยาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้วัสดุ โครงข่ายโลหะอินทรีย์
โดย	นางสาวสิริภัทร นิลวิเชียร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

### บทคัดย่อ

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks: MOFs) เป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของไอออนโลหะและสารอินทรีย์ โครงสร้างของวัสดุมีไอออนของโลหะเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการกระตุ้น (Active site) อีกทั้งเป็นวัสดุที่มีรูพรุน ทำให้มีคุณสมบัติด้านการดูดซับ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาซีนไดคาร์บอกซิเลท (Fe-MOF) โดยใช้กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกภายใต้ช่วงแสงวิซิเบิลในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) ซึ่งเป็นตัวแทนสีย้อมประจวบกวศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสีย้อมและค่าพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม ทำการทดลองการย่อยสลายด้วยแสงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด Fe-MOF สามารถย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีได้เนื่องจากการย่อยสลายของสีย้อมโรดามีนบีแต่ละช่วงเวลามีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงลดลงซึ่งเป็นการสลายหมู่แอลคิล (Deethylation) ในโครงสร้างของสีย้อมและวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่ศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา การย่อยสลายสีย้อมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ที่สภาวะการทดลอง 5 ppm ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 97.91 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมเป็น 10 ppm พบการคายซับพร้อมกับการย่อยสลายเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายจากแหล่งกำเนิดแสงใน 1 ชั่วโมงแรกของการฉายแสงและร้อยละการย่อยสลายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมธรรมชาติเป็นค่าพีเอชที่เกิดการย่อยสลายมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 94.13 แต่ในกรณีสารละลายพีเอช 12 ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถย่อยสลายสีย้อมได้เพียงร้อยละ 12.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Using Metal-Organic Framework
By	Miss Siraphat Nilvichean
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Kriangsak Kraiwattanawong

## Abstract

Metal-organic frameworks (MOFs) are compounds consisting of metal ions coordinated to organic ligands. MOFs possess the qualities of being a suitable catalyst with its high surface area and metal active sites. The aim of this thesis was study capability of iron naphthalenedicarboxylate metal-organic framework (Fe-MOF) to degrade Rhodamine B (RhB) as a cationic dye with photocatalytic process in visible light. The catalytic activities are found to be affected by the various operating parameters. Effects of amount of catalyst initial RhB concentration and pH on photodegradation reaction for 6 hours are investigated. The results showed that Fe-MOF can efficiently catalyze the photodegradation of RhB dye because the maximum absorption band are shift to lower wavelength, which is the decomposition of alkyl (Deethylation) in the structure of the dye. The degradation efficient of RhB is found to increase as the amount of the catalyst dosage increases. At concentration of 5 ppm RhB and 0.5 g/L catalyst, its efficiency was 97.91 %. The efficiency of degradation of RhB tended to decrease with increasing the concentration of RhB. When increasing concentration of RhB to be 10 ppm, desorption and photodegradation was occurred in first hour irradiation because of heat from light source. Effect of pH at 10 ppm RhB, catalyst can efficiently catalyze natural pH 5 of RhB (94.13 %). Both of pH 2 and 10 efficiency was about 80%. In case of pH 12, catalyst can degrade dyes by only 12.09 %.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำสอนและให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์ อีกทั้งท่านยังช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ ความรู้ คำแนะนำตลอดการทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือรวมถึงความรู้ในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ นางสาวมินตรา เจริญพร เพื่อนร่วมอาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนเพื่อนร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ได้ให้การช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวที่ได้เปิดโอกาสให้ผู้จัดทำได้รับการศึกษาเล่าเรียน คอยสนับสนุนและให้กำลังใจผู้จัดทำจนสำเร็จการศึกษา

สิรภัทร นิลวิเชียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	4
2.1.1 หลักการของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	4
2.1.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์.....	5
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	7
2.2 วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์.....	7
2.3 สีย้อมโรดามีนบี.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	12
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.3 การดูดซับสารละลายโรดามีนบีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13
3.4 การย่อยสลายสารละลายโรดามีนบีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก.....	13
3.5.1 การศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโรดามีนบี.....	14
3.5.3 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย.....	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	16
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์.....	16
4.2 ผลการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	17
4.2.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18
4.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม.....	18
4.2.3 ผลของพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม.....	20
4.3 ผลการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี.....	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	24
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	24
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	25
เอกสารอ้างอิง.....	26
ภาคผนวก ก.....	29
ภาคผนวก ข.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมโรดามีนบี ในแต่ละช่วงเวลาการฉายแสง.....	22
ตารางที่ ข.1.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลาย สีย้อมโรดามีนบี 5 ppm.....	32
ตารางที่ ข.1.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลาย สีย้อมโรดามีนบี 5 ppm.....	32
ตารางที่ ข.1.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลาย สีย้อมโรดามีนบี 5 ppm.....	33
ตารางที่ ข.2.1 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 10 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อม ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	34
ตารางที่ ข.2.2 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 20 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อม ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	34
ตารางที่ ข.2.3 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 25 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อม ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	35
ตารางที่ ข.3.1 ผลของ pH 2 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	36
ตารางที่ ข.3.2 ผลของ pH 5 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	36
ตารางที่ ข.3.3 ผลของ pH 10 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	37
ตารางที่ ข.3.4 ผลของ pH 12 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	37

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของลิแกนด์อินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมโรดามีนบี.....	9
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF.....	16
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF.....	17
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF.....	17
รูปที่ 4.4 การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วย Fe-MOF ที่ความเข้มข้นสีย้อม 5 ppm.....	18
รูปที่ 4.5 การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วย Fe-MOF ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	19
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีนบี 10 ppm ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร เมื่อถูกดูดซับและได้รับแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	20
รูปที่ 4.7 การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วย Fe-MOF ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	21
รูปที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีนบี 5 ppm เมื่อฉายแสงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร.....	22
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมโรดามีนบี.....	30
รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมโรดามีนบีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ.....	33
รูปที่ ข.2 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมโรดามีนบีที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	35
รูปที่ ข.3 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 5 ppm ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ pH ต่างๆ.....	38

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอขยายตัวสูงขึ้น ทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าและผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย การส่งออกสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มในครึ่งปี 2560 สามารถทำรายได้เข้าสู่ประเทศสูงถึง 2,098.34 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.73 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อน [1] ในอีกด้านหนึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำเป็นผลกระทบที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำ สารเคมีและสีสังเคราะห์ปริมาณมาก สีย้อมที่เหลือตกค้างจากกระบวนการย้อมสีจะถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำทิ้ง หากไม่มีการกำจัดสีย้อมตกค้างก่อนปล่อยทิ้ง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศ แหล่งน้ำมีกลิ่นเหม็นและทำลายทัศนียภาพ

สีย้อมเป็นสารให้สีที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ด้วยโครงสร้างที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวกอะลิฟาติกและวงแหวนอะโรมาติกหลายวงมาต่อกันซึ่งมีความเสถียรต่อแสง ความร้อน สีเหล่านี้ยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อน สภาพคงตัวสูง ยากต่อการย่อยสลายและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำตามธรรมชาติในการอุปโภคและบริโภค เช่น สีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) ทำให้เกิดฝุ่นที่ผิวหนัง อาเจียนและอ่อนแรงคล้ายเป็นอัมพาต การทำงานของระบบทางเดินอาหาร ไตและตับเสีย [2]

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทยมีหลากหลายแตกต่างกันไปตามลักษณะของน้ำเสีย อาศัยกระบวนการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี เช่น กระบวนการตกตะกอนทางเคมี กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ กระบวนการเหล่านี้สามารถกำจัดสีของสีย้อมได้แต่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า [3] กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจสามารถย่อยสลายสีย้อม อาศัยการทำงานของสารกึ่งตัวนำภายใต้แสง ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้และตัวเร่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตัวเองหลังจากปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ ตัวเร่งที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง ช่วงความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (น้อยกว่า 400 นาโนเมตร) ซึ่งมีน้อยกว่า 10% ของแสงอาทิตย์ทั้งหมด [4] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยนำมาเจือด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะทรานสิชัน เช่น เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) และ วานาเดียม (V) เป็นต้น ซึ่งโลหะทรานสิชันเหล่านี้จะสามารถเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนของตัวเร่ง [5] ทำให้เห็นว่าโลหะทรานสิชันแต่ละชนิดมีความสำคัญในการช่วยให้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น เหล็กเป็นโลหะที่หาง่าย ราคาถูกและความเป็นพิษต่ำ เหล็กจึงเหมาะที่จะเลือกมาศึกษาเป็นส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไป

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks: MOFs) เป็นสารประกอบของโลหะและสารอินทรีย์รวมอยู่ด้วยกันเป็นลักษณะโครงข่ายต่อเนื่อง วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์หลายชนิดจัดเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง มีลักษณะการดูดซับและคายซับที่โดดเด่น ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้งานเป็นตัวคัดเลือกโมเลกุลที่ต้องการแยกในกระบวนการดูดซับแก๊สและเป็นตัวกักเก็บโมเลกุลสารที่จำเพาะ [6] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเกิดปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ในการกำจัดสีของเมทิลลีนบลู [7] จากคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานที่กล่าวมานี้ทำให้วัสดุโครงข่ายอินทรีย์โลหะได้รับความสนใจอย่างยิ่งสำหรับการวิจัยเพื่อพัฒนา

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงในช่วงแสงวิสิเบิล (Visible light) ของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลต (Iron naphthalenedicarboxylate metal-organic framework: Fe-MOF) โดยทำการทดลองกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) ที่สภาวะต่างๆ โดยวัดความเข้มข้นของสารละลายด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพของวัสดุโครงข่ายอินทรีย์โลหะชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลตในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แสงวิสิเบิล เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในสภาวะต่างๆ ของการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีซึ่งใช้เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและทดสอบการย่อยสลายสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์สีย้อมโรดามีนบีที่สภาวะต่าง ๆ คือ ความเข้มข้นของสีย้อม 5, 10, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัมต่อลิตร และ ค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย 2, 5, 10 และ 12

2. ออกแบบการทดลองและศึกษาสภาวะต่างๆ ในการย่อยสลายสีย้อมในน้ำสีสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวัสดุโครงข่ายอินทรีย์โลหะชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลตผ่านกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ในเรื่องกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์
2. ทราบการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะต่างๆ ในการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งวัสดุโครงข่ายอินทรีย์โลหะชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลทภายใต้แสงวิซิเบิล
3. สามารถนำตัวเร่งวัสดุโครงข่ายอินทรีย์โลหะชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลทไปประยุกต์ใช้งานในวิธีอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process) [8]

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process) ที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้โดยการลดพลังงานกระตุ้น

พิจารณาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถแบ่งประเภทของปฏิกิริยาได้ 2 ประเภทดังนี้

1. การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบเอกพันธ์หรือสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นหรือสารเคมีที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของเหลว

2. การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์หรือสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะต่างกับสารตั้งต้นหรือสารเคมีที่ต้องการกำจัด ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะของแข็งและสารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว ซึ่งกระบวนการแบบสถานะต่างนี้สะดวกต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากจากตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

#### 2.1.1 หลักการของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก [8,9]

หลักการของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

การดูดซับ (Adsorption process) เป็นกระบวนการการดูดติดของอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สบนพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งอาจจะเกิดการดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพ หรือแรงทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ

การฉายแสง (Irradiation process) การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นการให้แสงในรูปของพลังงานโฟตอน โดยพลังงานที่ให้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap:  $E_g$ ) ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบนำไฟฟ้า (Conductive band potential:  $E_{CB}$ ) กับแถบวาเลนซ์ (Valance band potential:  $E_{VB}$ ) เช่น วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโรนปีทีซี (FeBTC) มี  $E_g = 2.75$  eV,  $E_{CB} = 2.31$  eV และ  $E_{VB} = -0.44$  eV [10] ค่าแถบพลังงานเป็นพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานกระตุ้น (จูล)

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

$\nu$  คือ ความถี่ (เฮิรตซ์)

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

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

### 2.1.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ [5,11]

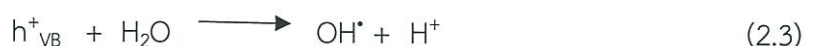
ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในการบำบัดสารอินทรีย์ทั่วไปนั้นจะเกิดบริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงในรูปของพลังงานโฟตอน โดยมีกระบวนการกระตุ้นและการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนี้

#### การกระตุ้น

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นของแสงที่เข้าไปกระตุ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างของแถบพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ ดังสมการ 2.2



ปฏิกิริยาที่แถบวาเลนซ์ สามารถอธิบายได้ว่าตัวให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในสารละลายเคลื่อนที่ไปยังโฮล ( $h^+_{VB}$ ) โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) และไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) กับซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการ 2.3 และ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

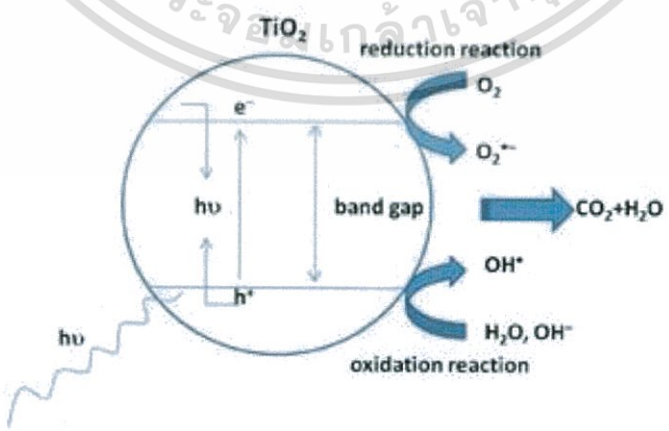
ปฏิกิริยาที่แถบนำไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอนเกิดจากออกซิเจนในสารละลาย ซึ่งเกิดเป็นไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $O_2^{\cdot-}$ ) และ  $O_2^{\cdot-}$  สามารถทำปฏิกิริยาที่แถบนำไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอนเกิดจากออกซิเจนในสารละลาย ซึ่งเกิดเป็นไอออนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $O_2^{\cdot-}$ ) และ  $O_2^{\cdot-}$  สามารถทำปฏิกิริยากับ  $H^+$  จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $HO_2^{\cdot}$ ) ดังสมการ 2.5 และ 2.6



ถ้า  $HO_2^{\cdot}$  รวมกัน ผลที่ได้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำ หรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลอาจถูกสร้างขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้เช่นกัน

**การย่อยสลายสารอินทรีย์**

จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของการดูดซับน้ำและการดูดซับหมู่ไฮดรอกซิล และจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นรูปของเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวออกเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไอออนของสารอินทรีย์ ดังสมการ 2.7



รูปที่ 2.1 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [12]

### 2.1.3.1 ความเข้มของแสงและระยะเวลาในการฉายแสง

ความเข้มแสงจะส่งผลต่อจำนวนโฟตอนที่กระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มความเข้มของแสงเป็นการเพิ่มโฟตอนจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ระยะเวลาให้แสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์มีแนวโน้มสูงขึ้น หากให้ระยะเวลาในการให้แสงนานขึ้น

### 2.1.3.2 ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจะมีโอกาสทำให้การสลายสารอินทรีย์เกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับของสารอินทรีย์มีมากขึ้น และเมื่อถูกกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เรดิเคิลที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรง แต่ปริมาณตัวเร่งที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกลดลง เนื่องจากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปบดบังแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลลดลง ทำให้ได้เรดิเคิลลดลงตามไปด้วย

### 2.1.3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก คือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกลดลง

### 2.1.3.4 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและส่งผลถึงความสามารถในการยึดเกาะของสารอินทรีย์บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

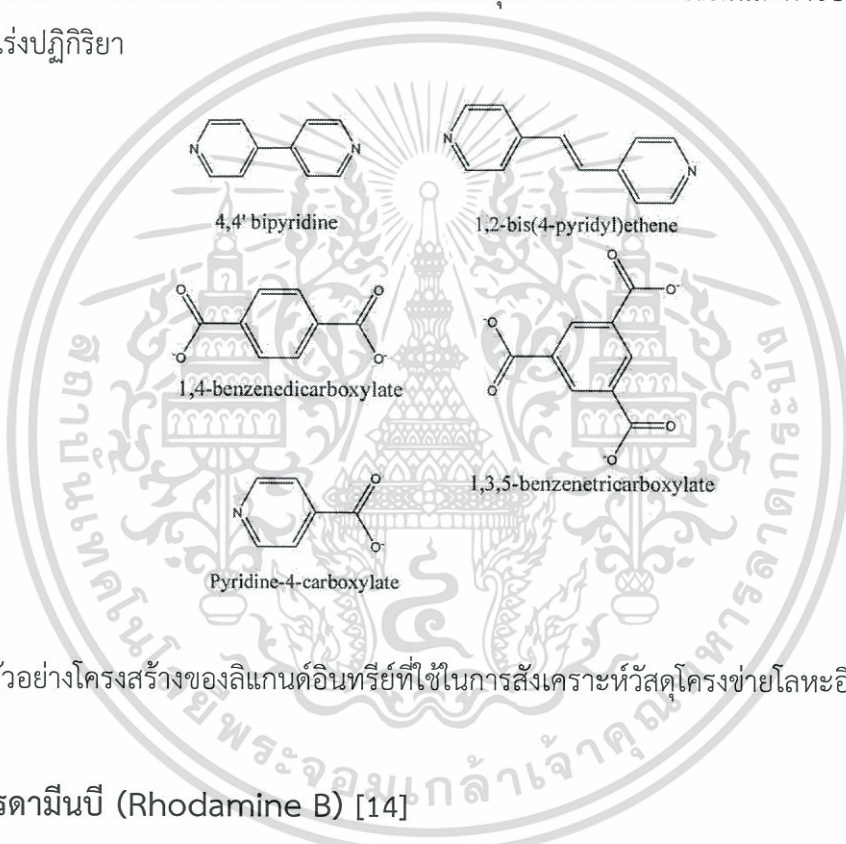
## 2.2 วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks: MOFs) [13]

วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์เป็นวัสดุที่มีโครงข่ายในระดับโมเลกุล มีความเป็นผลึกสูง ประกอบด้วยไอออนโลหะเชื่อมต่อกันด้วยลิแกนด์สารอินทรีย์ (Organic ligand) ด้วยพันธะโคเวเลนต์จนเกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่เป็นโครงข่ายต่อเนื่องไม่สิ้นสุด โดยทั่วไปแล้วลิแกนด์ที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์สามารถแบ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เป็นสามประเภทหลัก คือ ลิแกนด์อินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับโลหะในการสร้างพันธะ (Nitrogen-donor organic ligands) ลิแกนด์อินทรีย์ที่ให้ออกซิเจนเป็นตัวสร้างพันธะ (Oxygen-donor organic ligands) และ ลิแกนด์อินทรีย์ที่มีทั้งออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับโลหะในการสร้างพันธะ

นอกจากนี้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ยังสามารถปรับแต่งโครงสร้างของโครงข่ายให้มีความจำเพาะทางเคมีมากขึ้น ขนาดของรูพรุนของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ก็สามารถออกแบบตั้งแต่ก่อนการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์นำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นตัวกักเก็บโมเลกุลสาร เช่น ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



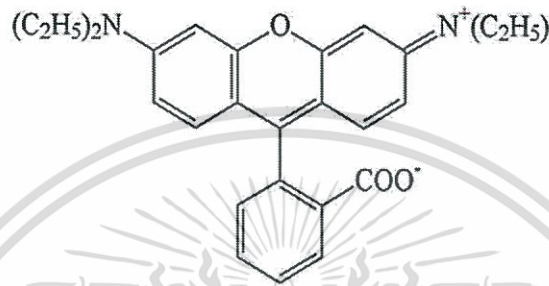
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างของลิแกนด์อินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ [13]

### 2.3 สีอ้อมโรดามีนบี (Rhodamine B) [14]

สีอ้อมอินทรีย์เป็นสารอะโรมาติกที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ โครโมฟอร์ (Chromophore) เป็นองค์ประกอบในส่วนที่มีอิเล็กตรอนอิสระภายในโครงสร้าง มีพันธะคู่ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้มองเห็นเป็นสีโดยการดูดกลืนแถบแสงขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีของสีอ้อมแตกต่างกันออกไป และอีกหนึ่งองค์ประกอบคือ ออกโซโครม (Auxochrome) เป็นตัวหนูนอิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มความเข้มสีให้กับโครโมฟอร์ เช่น  $-NH_2$ ,  $-COOH$ ,  $-SO_3H$  และ  $-OH$  เป็นต้น ออกโซโครมมีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครโมฟอร์ โดยอาจทำให้ความยาวคลื่นเพิ่มหรือลดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีย้อมโรดามีนบีเป็นสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกอยู่ในกลุ่มของสีย้อมเบสิก (Basic dye) หรือสีแคทไอออน ละลายน้ำให้สารละลายสีชมพู สเปกตรัมการดูดกลืนแสงวิชิเบิลของสารละลายสีย้อมโรดามีนบีอยู่ที่ 554 นาโนเมตร สีย้อมโรดามีนบีใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และเส้นใยอะคริลิก แต่ด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงทำให้มีความทนทานต่อการสลายตัวทางชีวภาพและสารเคมีสูง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมโรดามีนบี [14]

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์นิยมนำมาใช้งานในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Hamid Reza Mardani และคณะ [15] ได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของ ซิงค์ออกไซด์และนาอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มาเจือด้วยโลหะทรานซิชัน 2 ชนิดคือ ไอรอน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) และคอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{2+}$ ) รวมถึงศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิชิเบิลพร้อมกับใส่สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์และไอรอนซิงค์ออกไซด์ ในด้านสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับ 376, 364 และ 259 นาโนเมตรตามลำดับ และตรวจสอบค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้เท่ากับ 3.15, 2.70 และ 2.52 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ พบว่าทั้งค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและช่องว่างของแถบพลังงานมีค่าลดลงเมื่อเจือโลหะทรานซิชันลงไป และเมื่อนำซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ซิงค์ออกไซด์และไอรอนซิงค์ออกไซด์มาทดสอบประสิทธิภาพใช้การกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงวิชิเบิลเป็นเวลา 90 นาที พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเมทิลลีนบลูได้ประมาณ 50, 80 และ 95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าการเจือโลหะทรานซิชันในโลหะออกไซด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ

Lijuan Shen และคณะ [16] ได้ทำการรวบรวมการประยุกต์ใช้งานของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น การย่อยสลายสีย้อมและสารอินทรีย์ การแยกโมเลกุลของน้ำและการดักจับโมเลกุลโดยการดูดซับ ในเรื่องความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กล่าวไว้ว่าวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจ เช่น มีพื้นที่ผิวที่มากซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป็นบริเวณเร่ง (Active site) และสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะตามการใช้งานได้ การปรับปรุงวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ให้ดีขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของลิแกนด์และโลหะภายในโครงสร้างที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ตัวอย่างเช่น การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ไทเทเนียมในโครงสร้างวัสดุโครงข่ายอินทรีย์ (Ti-MOF) ภายใต้แสงวิซิเบิล และการย่อยสลายสีเมทิลลีนบลูและสีย้อมโรดามีนบีด้วย MIL-88(Fe) ภายใต้แสงวิซิเบิล

จากงานวิจัยข้างต้นโลหะทรานซิชันมีผลต่อการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง รวมถึงคุณสมบัติและความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ จึงมีนักวิจัยได้นำโลหะทรานซิชันและวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์มาศึกษาและพัฒนาต่อในด้านตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Katrien G.M. Laurier และคณะ [17] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $Fe^{3+}$  ในโครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ในการดูดกลืนคลื่นแสง และศึกษาการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน 6 จี (Rhodamine 6G) ภายใต้การฉายแสงที่ความยาวคลื่นต่างกันโดยเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาตรวจสอบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 350 ถึง 850 นาโนเมตร พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ตอบสนองในช่วงแสงยูวีที่ประมาณ 400 นาโนเมตร ส่วน  $Fe^{3+}$  ในโครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ตอบสนองในช่วงแสงวิซิเบิล ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน 6 จี โดยเปลี่ยนช่วงความยาวคลื่นแสงที่ 350, 450, 550, 650, 750 และ 850 นาโนเมตร พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายสีย้อมโรดามีน 6 จีได้ดีที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นได้ดีที่ช่วงแสงยูวี และ  $Fe^{3+}$  ในโครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์สามารถย่อยสลายสีย้อมโรดามีน 6 จีได้ดีที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรซึ่งอยู่ในช่วงแสงวิซิเบิล

Tirusew Araya และคณะ [10] ได้ศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของตัวเร่งปฏิกิริยาวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีการเติมเรซินภายใต้การฉายแสงวิซิเบิล วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอนบีทีซี (FeBTC) และ FeBTC ที่มีการเติมเรซินแอมเบอร์ไลท์ (Amberlite IRA-200 resin) 10 เปอร์เซ็นต์ลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง (A@FeBTC) การตรวจสอบการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีโดยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดูดซับสีย้อมในที่มีด 60 นาทีและฉายแสงวชิเบิล 90 นาที พบว่าที่สภาวะเดียวกัน FeBTC และ A@FeBTC สามารถดูดซับสีย้อมโรดามีนบีได้ 8.24 และ 20.24 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากแอมเบอร์ไลท์เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุบวกจึงดึงดูดสีย้อมโรดามีนบีได้ดี ส่วนประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีของทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยาได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Ayonbala Baral และคณะ [18] ทำการทดลองกำจัดสีย้อมโรดามีนบีด้วย  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> ภายใต้การฉายแสงวชิเบิล ความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีของตัวเร่งปฏิกิริยาตรวจสอบได้จากการลดลงของตำแหน่งพีคที่มีความเข้มมากที่สุด (554 นาโนเมตร) พบว่าสีย้อมถูกย่อยสลายไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ (Intermediate product) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมโรดามีนบีลดลงจากความยาวคลื่นที่ 554 นาโนเมตรเป็น 539, 534, 531, 529 และ 498 นาโนเมตร ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นขั้นตอนสลายพันธะหมู่แอลคิล (Deethylation) ของการย่อยสลายของสีย้อมโรดามีนบี การย่อยสลายยืนยันโดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ลดลง



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้สนใจที่จะทดสอบความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาซีนไดคาร์บอกซิเลท (Fe-MOF) ภายใต้แสงวิซิเบิล ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีและทดลองการย่อยสลายสีย้อมที่สภาวะต่างๆ

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุโครงข่ายอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาซีนไดคาร์บอกซิเลท (Iron naphthalenedicarboxylate metal-organic framework)
2. สีย้อมโรดามีนบี (Rhodamine B)
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid solution)
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide solution)
5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ถังทดลองทึบแสง
2. หลอดแสงจันทร์ (Mercury lamp) 500 วัตต์
3. ปีกเกอร์
4. ขวดแก้ว ขนาด 10 มิลลิลิตร
5. ขวดสีชา
6. หลอดฉีดยา (Syringe)
7. เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
8. แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar) ขนาด 10x6 มิลลิเมตร
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก 5 ตำแหน่ง
10. เครื่องวิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Visible Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
12. ที่กรองสารสำหรับไซริงค์ (Syringe filter)

### 3.3 การดูดซับสารละลายโรดามีนบีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.1 ทำการเตรียมสารละลายโรดามีนบีที่ความเข้มข้น 3, 6, 9 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำกลั่น วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิชิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกับค่าการดูดกลืนแสง

3.3.2 ทำการเตรียมสารละลายโรดามีนบี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำกลั่น เติมนลงในขวดแก้วปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทั้งหมด 7 ขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมลงในทุกๆ ขวด

3.3.3 หลังจากนั้นนำเข้าไปในกล่องที่บแสงที่ต่อกับหลอดแสงจันทร์ พร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กโดยไม่ให้แสงเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับสียอมเต็มที่และเก็บตัวอย่าง 1 ขวด กรองสารละลายเก็บในขวดสีชา

3.3.4 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายด้วยเครื่องวิชิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกผล

### 3.4 การย่อยสลายสารละลายโรดามีนบีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.1 เมื่อทำการทดลองดูดซับสารละลายโรดามีนบีแล้ว สารละลายที่เหลือเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นคงที่ ทำการเปิดไฟและจับเวลาพร้อมเก็บสารตัวอย่างทุกๆ 60 นาที ครึ่งละ 1 ขวด กรองสารละลายเก็บในขวดสีชา

3.4.2 ทำการเจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิชิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกผล

### 3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสียอมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

#### 3.5.1 การศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เตรียมสารละลายโรดามีนบี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำกลั่น เติมนลงในขวดแก้วปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทั้งหมด 7 ขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 มิลลิกรัมลงในทุกๆ ขวด

2. นำเข้าไปในกล่องที่บแสงที่ต่อกับหลอดไฟพร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กโดยไม่ให้แสง จับเวลา 3 ชั่วโมงและเก็บตัวอย่าง 1 ขวด

3. เปิดสวิตช์ไฟพร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก จับเวลาและเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง ครั้งละ 1 ขวด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายเก็บในขวดสีชา
4. เจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิชิเปิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกผล
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 มิลลิกรัม เป็น 1.5 มิลลิกรัม และ 2.5 มิลลิกรัม ตามลำดับ

### 3.5.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโรดามีนบี

1. เตรียมสารละลายโรดามีนบี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำกลั่น เติมนลงในขวดแก้วปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทั้งหมด 7 ขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5 มิลลิกรัมลงในทุกๆ ขวด
2. นำเข้าไปในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดไฟพร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กโดยไม่ให้แสง จับเวลา 3 ชั่วโมงและเก็บตัวอย่าง 1 ขวด
3. เปิดสวิตช์ พร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก จับเวลาและเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง ครั้งละ 1 ขวด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายเก็บในขวดสีชา
4. ทำการเจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิชิเปิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกผล
5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่เปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายโรดามีนบีจาก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 10, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 3.5.3 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย

1. เตรียมสารละลายโรดามีนบี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำกลั่น เติมนลงในขวดแก้วปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทั้งหมด 7 ขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5 มิลลิกรัมลงในทุกๆ ขวด
2. ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. นำเข้าไปในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดไฟพร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กโดยไม่ให้แสง จับเวลา 3 ชั่วโมงและเก็บตัวอย่าง 1 ขวด
4. เปิดสวิตช์ พร้อมกับปั่นกวนบนเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก จับเวลาและเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง ครั้งละ 1 ขวด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองสารละลายเก็บในขวดสีชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิธีเบิสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วบันทึกผล

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลาย เป็น 10 และ 12 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลท (Fe-MOF) ในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก วิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของการทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ความเข้มข้นของสารละลายตรวจวัดผ่านค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค Visible spectrophotometry

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์

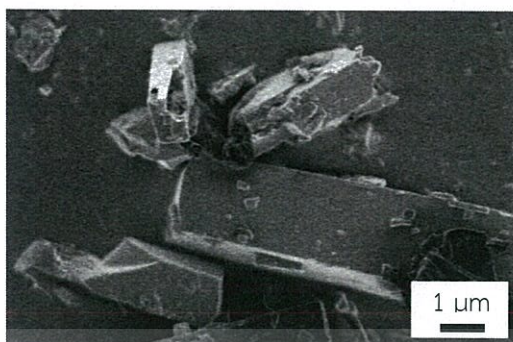
วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ Fe-MOF ที่นำมาทดสอบความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้ม มีน้ำหนักเบา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF มีลักษณะเป็นผลึกรูปทรงเหลี่ยม

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF ด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิว 1.982 ตารางเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 28.48 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุน 0.014 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม



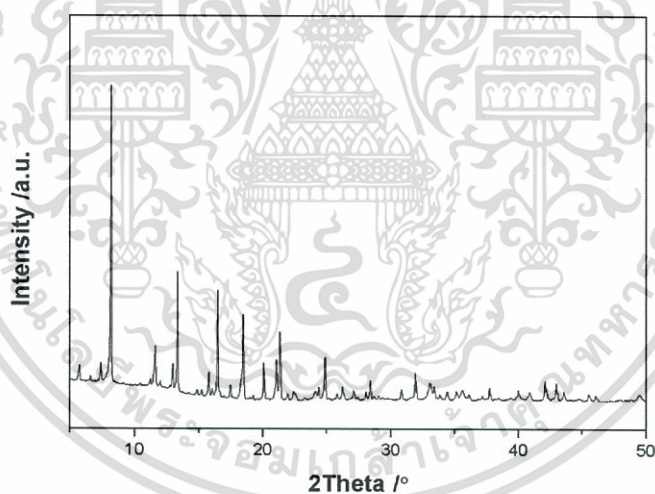
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF

การพิสูจน์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF พิกที่ 2 Theta เท่ากับ  $8^\circ$  เป็นพิกที่มีความเข้มสูงสุด ซึ่งตรงกับผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากงานวิจัยการสังเคราะห์วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ของ Jiun-Jen Chen และคณะ [19] บ่งชี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีโครงสร้างผลึกตรงตามโครงสร้างของ Fe-MOF



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF

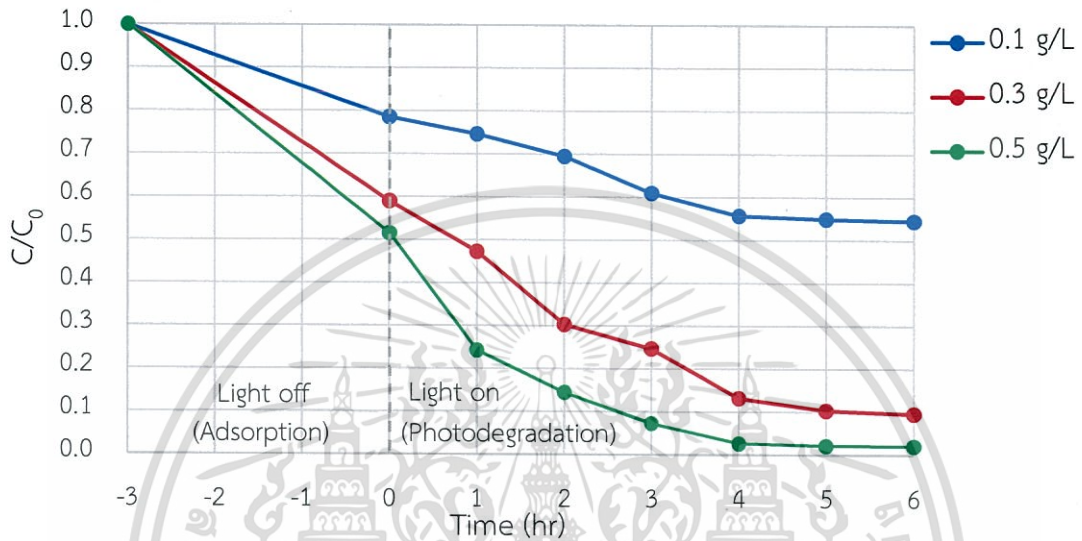
#### 4.2 ผลการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาติก

การทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ Fe-MOF ในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีที่สภาวะต่างๆ คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นสีย้อมและค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 5 ppm โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe- MOF 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมงและหลังจากนั้นฉายแสงเพื่อเป็นการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

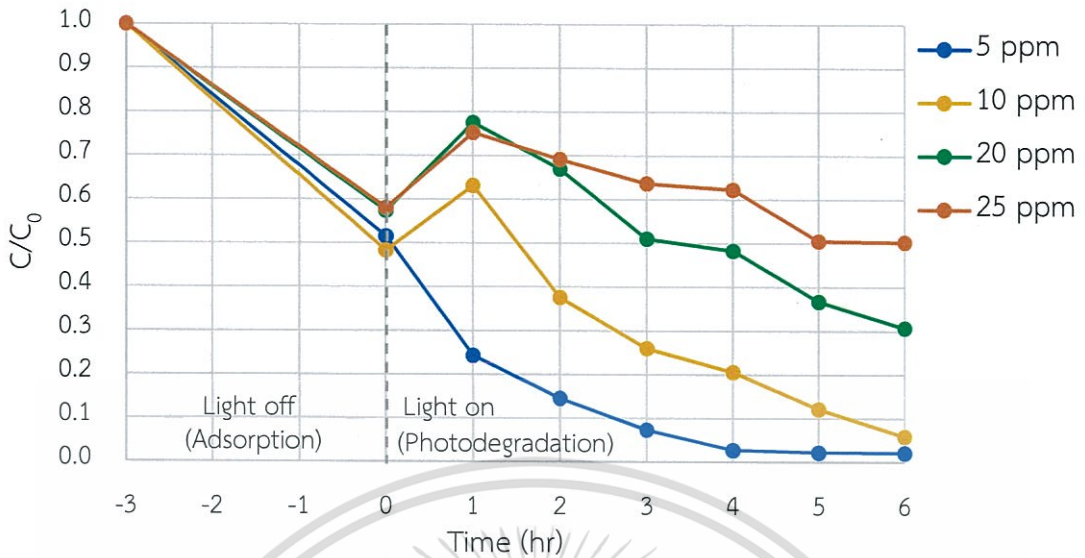


รูปที่ 4.4 การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วย Fe-MOF ที่ความเข้มข้นสีย้อม 5 ppm

รูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราการลดลงของสีย้อมโรดามีนบี 5 ppm โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ในช่วงการดูดซับ 3 ชั่วโมงและการฉายแสง 6 ชั่วโมง จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราการย่อยสลายสีย้อมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายสีย้อมเป็นการย่อยสลายที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยการดูดซับ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณตัวเร่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสีย้อมกับพื้นที่ที่ไวต่อปฏิกิริยา (Active site) ทำให้โครงสร้างของสีย้อมถูกทำลายได้มากขึ้น จากการทดลองสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ 45.47, 90.38 และ 97.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

สำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมโรดามีนบีที่มีผลต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF 0.5 กรัมต่อลิตร และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็น 5, 10, 20 และ 25 ppm ใช้เวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมงและหลังจากนั้นฉายแสงเพื่อเป็นการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



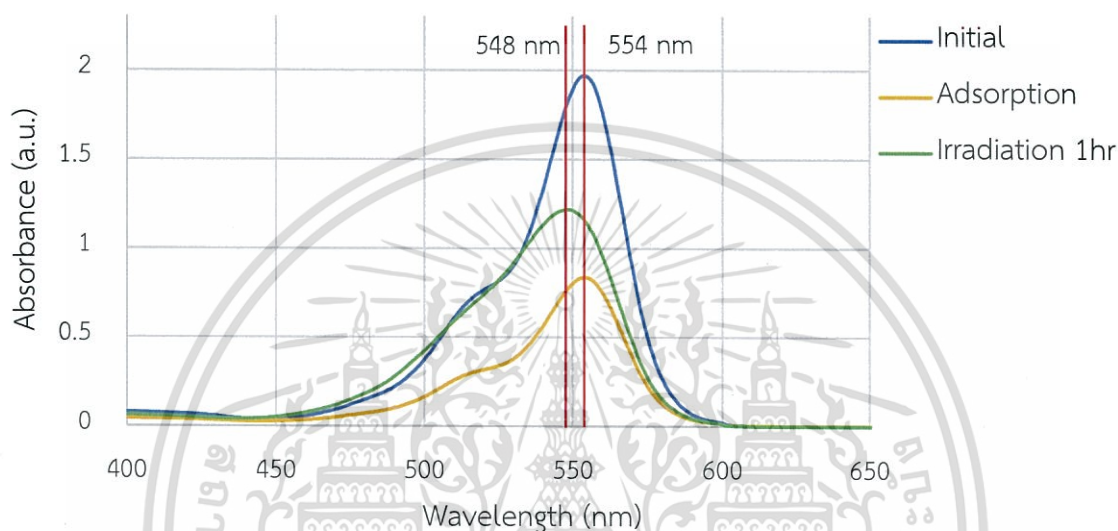
รูปที่ 4.5 การย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วย Fe-MOF ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.5 ความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 5 ppm เริ่มเกิดการย่อยสลายตั้งแต่ 1 ชั่วโมงแรกของการฉายแสงและสีย้อมถูกย่อยสลายไป 97.91 เปอร์เซ็นต์หลังจากการฉายแสง 6 ชั่วโมง

ผลของการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10, 20 และ 25 ppm เมื่อเริ่มการฉายแสง ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นหลังจากถูกดูดซับ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในระบบสูงขึ้นจาก 31 องศาเซลเซียสเป็น 70 องศาเซลเซียสใน 1 ชั่วโมงแรกและเริ่มคงที่ที่ต้นชั่วโมงที่ 2 ของการฉายแสง ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการคายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของโมเลกุลสีย้อม ทำให้การส่องผ่านของแสงเพื่อไปกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้ยากขึ้นรวมถึงตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยามีจำนวนเท่าเดิม ทำให้อัตราส่วนของโมเลกุลสีย้อมต่อตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยามีค่าลดลง ส่งผลให้การย่อยสลายสีย้อมลดลง ในกรณีชั่วโมงที่ 1 ของการฉายแสงยังคงเกิดการย่อยสลายของสีย้อม พิสูจน์ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในรูปแบบที่ 4.6 จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมน้อยกว่าอัตราการคายซับในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการฉายแสง จากการทดลองฉายแสงเพื่อย่อยสลายสีย้อม 10 ppm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ 94.13, 69.33 และ 49.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมโรดามีนบีเมื่อถูกดูดซับและหลังจากฉายแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมื่อถูกดูดซับอยู่ที่ความยาวคลื่น 554

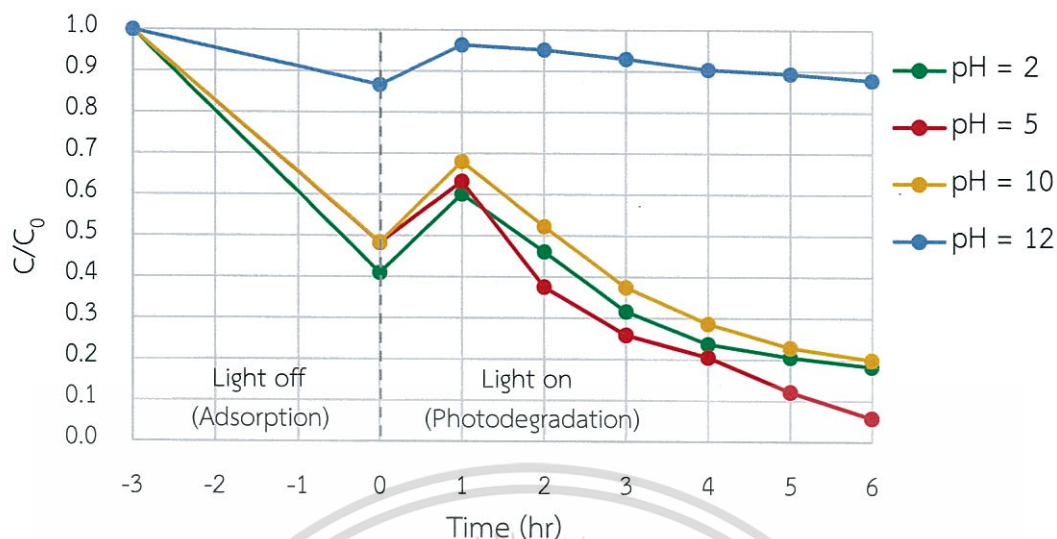
นาโนเมตร ซึ่งตรงกับค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงได้มากที่สุดของสีย้อมโรดามีนบีเริ่มต้นและมีปริมาณการดูดกลืนแสงลดลง กล่าวคือ โครงสร้างของสีย้อมโรดามีนบีไม่ได้ถูกทำลายเพียงแต่โมเลกุลของสีย้อมถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมื่อฉายแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมงอยู่ที่ 548 นาโนเมตร สเปกตรัมการดูดกลืนแสงลดลงเลื่อนไปทางช่วงยูวี แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของสีย้อมบางส่วนถูกทำลาย



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีนบี 10 ppm ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร เมื่อถูกดูดซับและได้รับแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 4.2.3 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

สำหรับการศึกษาผลของพีเอช (pH) เริ่มต้นของสีย้อมโรดามีนบีที่มีผลต่อความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF 0.5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสีย้อมสารละลาย 10 ppm ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 5 และเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายสีย้อมเป็น 2, 5, 10 และ 12 ppm ใช้เวลาการดูดซับ 3 ชั่วโมงและหลังจากนั้นฉายแสงเพื่อเป็นการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงผลการย่อยสลายในรูปที่ 4.7

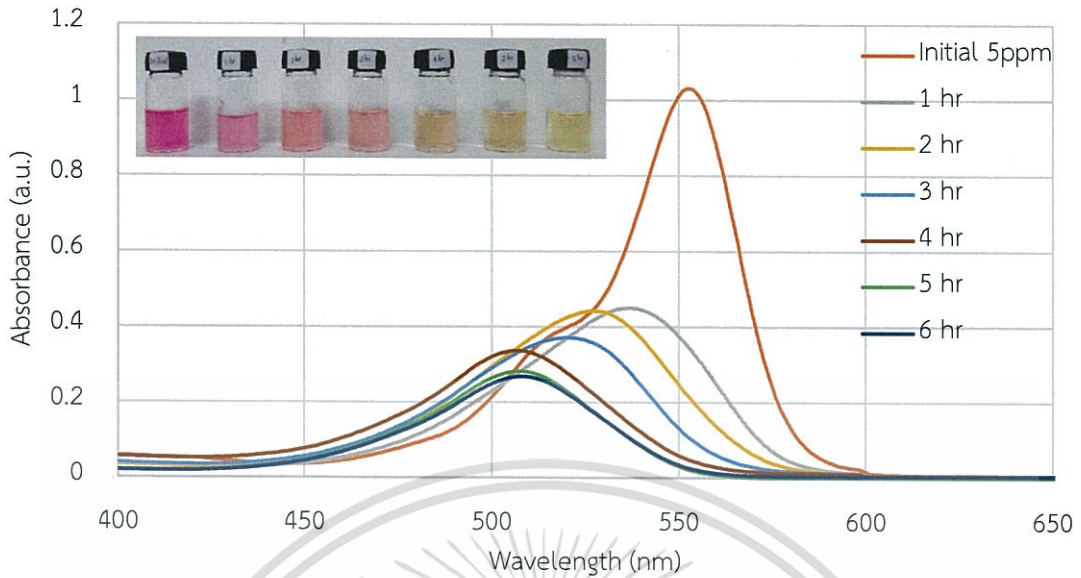


รูปที่ 4.7 การย่อยสลายสีของโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วย Fe-MOF ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

การย่อยสลายสีของโรดามีนบีที่โดยปรับ pH เริ่มต้นเท่ากับ 2, 5, 10 และ 12 ร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 81.70, 94.13, 80.02 และ 12.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถย่อยสลายได้ดีที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 ซึ่งเป็น pH ธรรมชาติของสีของโรดามีนบี แต่ pH เริ่มต้นของสีไม่ควรเกิน 10 กรณี pH เท่ากับ 12 มีสถานะความเป็นต่างในสารละลายมากเกินไปจนอาจไปยับยั้งการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียสภาพไป

#### 4.3 ผลการศึกษาการย่อยสลายของสีของโรดามีนบี

การศึกษากการย่อยสลายของสีของโรดามีนบี ศึกษาที่สถานะความเข้มข้นสีของโรดามีนบี 5 ppm ที่ถูกย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF 0.5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากที่สถานะนี้ผลการทดลองครอบคลุมช่วงการเปลี่ยนแปลงของการย่อยสลายสีของโรดามีนบีทั้งหมดที่พบในการทดลอง



รูปที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโรดามีนบี 5 ppm เมื่อฉายแสงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงและค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมโรดามีนบีในแต่ละช่วงเวลาการฉายแสง

เวลา (ชั่วโมง)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (a.u.)
เริ่มต้น	554	1.027
ฉายแสง	1	0.450
	2	0.442
	3	0.371
	4	0.336
	5	0.281
	6	0.268

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลการศึกษาการย่อยสลายของสีย้อมโรดามีนบี พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจากความยาวคลื่นจาก 554 นาโนเมตรไปจนถึง 508 นาโนเมตร สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นลดลงนั้นเป็นการทำลายพันธะหมู่แอลคิล (Deethylation) หรือหมู่

ออกซิโครมของสีย้อมโรดามีนบีซึ่งหมู่ออกซิโครมนี้ส่งผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสง [18,20] ทำให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปและปริมาณการดูดกลืนแสงลดลง จากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงซึ่งแสดงความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ละช่วงเวลาการฉายแสงข้างต้นเป็นการยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ชนิดไอรอน-แนฟทาลีนไดคาร์บอกซิเลท (Fe-MOF) ในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยตรวจสอบลักษณะพื้นฐาน พิสูจน์โครงสร้างผลึก รวมถึงวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาผลของปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นและค่า pH เริ่มต้นของสีย้อมที่ส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี

จากผลการทดลอง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF มีลักษณะเป็นผลึกรูปทรงเหลี่ยม มีพื้นที่ผิว 1.982 ตารางเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 28.48 นาโนเมตร การทดลองการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีด้วย Fe-MOF เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การย่อยสลายสีย้อมได้ดีขึ้น สภาวะในการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 ppm ย่อยสลายสีย้อมความเข้มข้น 5 ppm สามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 97.31 ในเวลาการฉายแสง 4 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี การย่อยสลายสีย้อมมีประสิทธิภาพลดลงและพบการคายซับพร้อมกับการย่อยสลายในชั่วโมงแรกของการฉายแสง เมื่อพิจารณา pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรดามีนบี pH ธรรมชาติของสีย้อมเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ร้อยละ 94.13 ในขณะที่ pH เท่ากับ 2 และ 10 ย่อยสลายได้ร้อยละ 80 แต่ในช่วงที่เป็นเบสแก่ pH 12 สีย้อมถูกย่อยสลายไปเพียงร้อยละ 12.09 ในการตรวจสอบการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีเห็นถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและปริมาณการดูดกลืนแสง แต่ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปตามความยาวคลื่นด้านยาวจาก 554 นาโนเมตรเป็น 508 นาโนเมตรที่ 6 ชั่วโมงและมีปริมาณการดูดกลืนแสงลดลงซึ่งแสดงถึงการสลายพันธะหมู่แอลคิล (Deethylation) ในโครงสร้างสีย้อม บ่งชี้ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF สามารถย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

2. ศึกษาและเปรียบเทียบผลของสีย้อมในหลากหลายประเภทหรือสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-MOF ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้อาจจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีกว่าสีย้อมโรดามีนบี

3. เปรียบเทียบความแตกต่างของลิแกนด์หรือโลหะซึ่งเป็นอะตอมกลางในโครงสร้างวัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ต่อการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. 2560. รายงานสถานการณ์สิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทย เดือนมิถุนายน 2560. สืบค้นจาก: <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2017/08/382560>. [22 ตุลาคม 2560].
- [2] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. 2555. ข่าวสารสิ่งแวดล้อม. จดหมายข่าว. 3, 8-9.
- [3] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2556. คู่มือแนวทางการจัดการน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. สืบค้นจาก: [http://www.diw.go.th/hawk/job/1\\_8.pdf](http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf). [22 ตุลาคม 2560].
- [4] Khraisheh, M., Wu, L., Al-Muhtaseb, A.H., Albadarin, A.B. and Walker, G.M. 2012. Phenol degradation by powdered metal ion modified titanium dioxide photocatalysts. *Chemical Engineering Journal*. 213, 125-134.
- [5] นัตตา เวชชากุล. 2555. การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไททาเนียมไดออกไซด์. *วารสาร Technology Promotion*. 38, 53-55.
- [6] Xia, L. and Wang, F. 2016. Prediction of hydrogen storage properties of Zr-based MOFs. *Inorganica Chimica Acta*. 444, 186-192.
- [7] Kozlova, E.A., Panchenko, V.N., Hanzan, Z., Khan, N.A., Timofeeva, M.N. and Jhung, S.H. 2016. Photoreactivity of metal-organic frameworks in the decolorization of methylene blue in aqueous solution. *Catalyst Today* 266, 136-143.
- [8] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. 2558. เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, หน้า 6-8, 24-25.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Nanda, B., Pradhan, A.C. and Parida, K.M. 2016. A comparative study on adsorption and photocatalytic dye degradation under visible light irradiation by mesoporous MnO<sub>2</sub> modified MCM-41 nanocomposite. *Microporous and Mesoporous Materials*. 226, 229-242.
- [10] Ariya, T., Chen, C., Jia, M., Johnson, D., Li, R. and Huang, Y. 2017. Selective degradation of organic dyes by a resin modified Fe-based metal-organic framework under visible light irradiation. *Optical Materials*. 64, 512-523.
- [11] Hassan, A.F., Elhadidy, H. and Abdel-Mohen, A.M. 2017. Adsorption and photocatalytic detoxification of diazinon using iron and nanotitania modified activated carbons. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 75, 299-306.
- [12] Ai, L., Zhang, C., Li, L.L. and Jiang, J. 2014. Iron terephthalate metal-organic framework: Revealing the effective activation of hydrogen peroxide for the degradation of organic dye under visible light irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental*. 148-149, 191-200.
- [13] อภิพงษ์ พุฒคำ. 2556. การประยุกต์ใช้วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์. *วารสารวิจัย มข.* 18(1), 161-177.
- [14] Rashad, M.M., Ibrahim, A.A., Rayan, D.A., Sanad, M.M.S. and Helmy, I.M. 2017. Photo-Fenton-like degradation of Rhodamine B dye from waste water using iron molybdate catalyst under visible light irradiation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 8, 175-186.
- [15] Mardani, H.R., Forouzani, M., Ziari, M. and Biparva, P. 2015. Visible light photo-degradation of methylene blue over Fe or Cu promoted ZnO nanoparticles. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 141, 27-33.

- [16] Shan, L., Liang, R. and Wu, L. 2015. Strategies for engineering metal-organic frameworks as efficient photocatalysts. *Chinese Journal of Catalysis*. 36, 2071-2088.
- [17] Laurier, K.G.M., Vermootele, F., Ameloot, R.P., Vos, D.D., Hofkens, J. and Roeyfaers, M.BJ. 2013. Iron(III)-based metal-organic frameworks as visible light photocatalysts. *Journal of the American Society*. 1-6.
- [18] Baral, A., Das, D.P., Minakshi, M., Ghosh, M.K. and Padhi, D.K. 2016. Probing Environmental Remediation of RhB Organic Dye Using a-MnO<sub>2</sub> under Visible- Light Irradiation: Structural, Photocatalytic and Mineralization Studies. *Chemistry Select*. 4277-4285.
- [19] Chen, J.J., Chen, Y.T., Raja, D.S., Kang, T.K., Tseng, P.C. and Lin, C.H. 2015. Metal-Organic Frameworks to Metal/Metal Oxide Embedded Carbon Matrix: Synthesis, Characterization and Gas Sorption Properties. *Materials*. 5336-5347.
- [20] Ganesh, R.S., Durgadevi, E., Navaneethan, Sharma, S.K., Binitha, H.S., Ponnusamy, S., Muthamizhchelvan, C. and Hayakawa, Y. Visible light induced photocatalytic degradation of methylene blue and rhodamine B from the catalyst of CdS nanowire. *Chemical Physic Letter*, 126-134.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

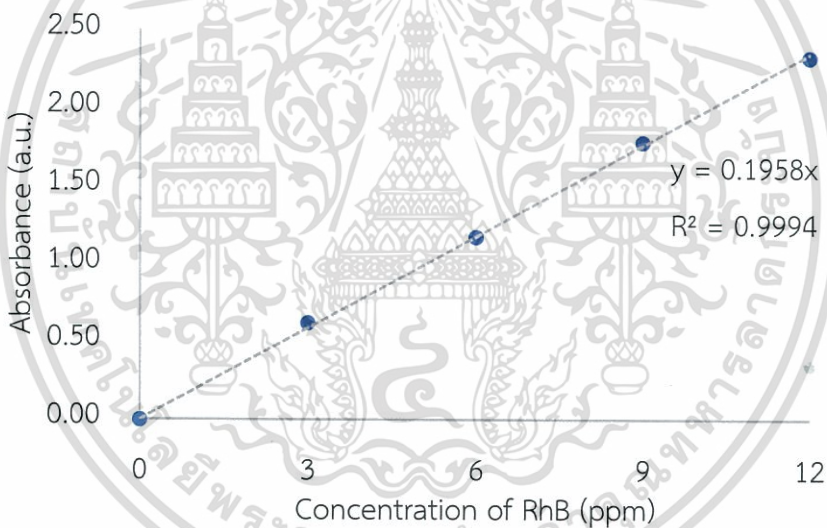
### ก.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายสี้อมโรดามีนบี

1. เตรียมสารละลายสี้อมโรดามีนบี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเตรียมกราฟมาตรฐานและสารละลายสำหรับการทดลอง

2. ปิเปตสารละลายสี้อมโรดามีนจากข้อที่ 1 มา 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสี้อมโรดามีนบีสำหรับทำกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 3, 6, 9 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. นำสารละลายสี้อมโรดามีนความเข้มข้น 3, 6, 9 และ 12 มิลลิกรัมต่อลิตรไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิซิบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร

4. จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ทั้ง 4 ความเข้มข้นมาพล็อตกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสง



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานสารละลายสี้อมโรดามีนบี



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี

ตารางที่ ข.1.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี 5 ppm

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (a.u.)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.005	5.13
ดูดซับ	0.790	4.05
ฉายแสง	1	0.750
	2	0.698
	3	0.613
	4	0.560
	5	0.553
	6	0.548


ตารางที่ ข.1.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี 5 ppm

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (a.u.)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.008	5.15
ดูดซับ	0.595	3.04
ฉายแสง	1	0.477
	2	0.306
	3	0.249
	4	0.133
	5	0.105
	6	0.097

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตรต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี 5 ppm

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (a.u.)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.005	5.13
ดูดซับ	0.518	2.65
ฉายแสง	1	0.244
	2	0.145
	3	0.073
	4	0.027
	5	0.022
	6	0.021

เวลา (ชั่วโมง)	เริ่มต้น	ดูดซับ	การย่อยสลาย					
			0	1	2	3	4	5
Catalyst 0.1 g/L								
Catalyst 0.3 g/L								
Catalyst 0.5 g/L								

รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมโรดามีนบีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี

ตารางที่ ข.2.1 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 10 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.977	10.10
ดูดซับ	0.956	4.88
ฉายแสง	1	1.249
	2	0.743
	3	0.514
	4	0.407
	5	0.240
	6	0.116


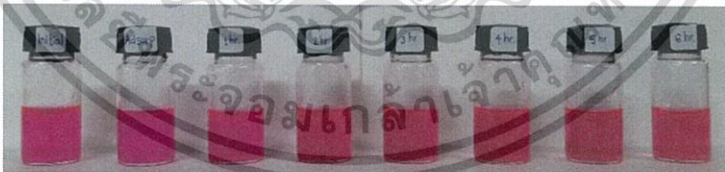
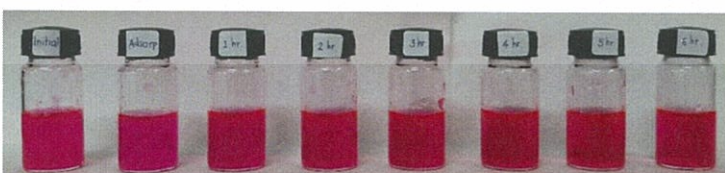
ตารางที่ ข.2.2 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 20 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.940	19.82
ดูดซับ	1.114	11.38
ฉายแสง	1	1.505
	2	1.300
	3	0.990
	4	0.938
	5	0.712
	6	0.595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2.3 ผลของความเข้มข้นสีย้อมโรดามีนบี 25 ppm ต่อการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น		0.995	25.41
ดูดซับ		0.578	14.76
ฉายแสง	1	0.749	19.13
	2	0.689	17.59
	3	0.634	16.19
	4	0.620	15.83
	5	0.503	12.84
	6	0.501	12.79

เวลา (ชั่วโมง)	เริ่มต้น	ดูดซับ	การย่อยสลาย					
			0	1	2	3	4	5
RhB 10 ppm								
RhB 20 ppm								
RhB 25 ppm								

รูปที่ ข.2 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมโรดามีนบีที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.3 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบี

ตารางที่ ข.3.1 ผลของ pH 2 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.978	10.10
ดูดซับ	0.812	4.15
ฉายแสง	1	1.190
	2	0.914
	3	0.627
	4	0.470
	5	0.407
	6	0.362

ตารางที่ ข.3.2 ผลของ pH 5 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.977	10.10
ดูดซับ	0.956	4.88
ฉายแสง	1	1.249
	2	0.743
	3	0.514
	4	0.407
	5	0.240
	6	0.116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

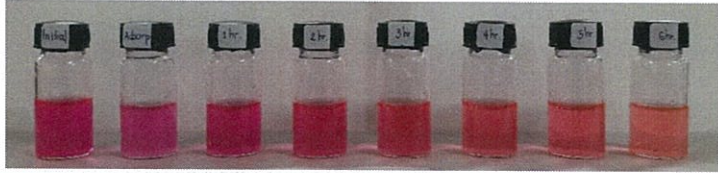
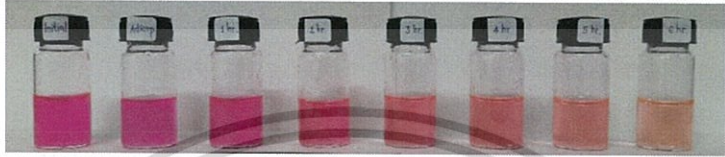


ตารางที่ ข.3.3 ผลของ pH 10 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.977	10.10
ดูดซับ	0.958	4.89
ฉายแสง	1	1.345
	2	1.033
	3	0.742
	4	0.568
	5	0.454
	6	0.395

ตารางที่ ข.3.4 ผลของ pH 12 ต่อการย่อยสลายสีย้อมโรดามีนบีความเข้มข้น 10 ppm ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
เริ่มต้น	1.977	10.10
ดูดซับ	1.714	8.75
ฉายแสง	1	1.906
	2	1.883
	3	1.840
	4	1.789
	5	1.768
	6	1.738

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา (ชั่วโมง)	เริ่มต้น	ดูดซับ	การย่อยสลาย					
		0	1	2	3	4	5	6
pH 2								
pH 5								
pH 10								
pH 12								

รูปที่ ข.3 การเปลี่ยนแปลงของสีของโรดามีนบีความเข้มข้น 5 ppm ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ pH ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้