

การศึกษาการสลายสี้อมด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสง
และทฤษฎีการดูดซับ
A STUDY OF DYE DEGRADATION BY PHOTOCATALYSIS
PROCESS AND ADSORPTION THEORY

จิตา มีบางยาง
นัยนา อุเบอร์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาการสลายสีย้อมด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสง
และทฤษฎีการดูดซับ
A STUDY OF DYE DEGRADATION BY PHOTOCATALYSIS
PROCESS AND ADSORPTION THEORY



T149433

ธิดา มีบางยาง
นัยนา อุเบอร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149433
วันเดือนปี ๒ ๘ อ.ค. 2561

b. 1288487X
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

A STUDY OF DYE DEGRADATION BY PHOTOCATALYSIS
PROCESS AND ADSORPTION THEORY

THIDA MEEBANGYANG
NAIYANA UBER

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการสลายสีย้อมด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสงและทฤษฎีการดูดซับ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิดา มีบางยาง	รหัสนักศึกษา	55051513
	นางสาวนัยนา อุเบอร์	รหัสนักศึกษา	55051529
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการสลายสีย้อมเมธิลีนบลูด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสงซึ่งใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิงค์ออกไซด์กับปริมาณเมธิลีนบลูที่เหลือในแต่ละช่วงเวลา พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด ($R^2 \geq 0.99$) รองลงมาคือแบบจำลองแบบฟรุนดลิช ($R^2 \geq 0.98$) และแบบจำลองการดูดซับแบบเส้นตรง ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยที่สุด ($R^2 \geq 0.94$)

คำสำคัญ : การดูดซับ ซิงค์ออกไซด์ เมธิลีนบลู วิธีกระตุ้นด้วยแสง

Title	A Study of Dye Degradation by Photocatalysis Process and Adsorption Theory		
Students	Miss. Thida Meebangyang	Student ID	55051513
	Miss. Naiyana Uber	Student ID	55051529
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof.WicharnTechitdheera		

Abstract

Photocatalysis of Methylene Blue by Zinc Oxide is the aim of this special project. We have analyzed the relation of Zinc Oxide with residual Methylene Blue at each time of sampling by the three models of adsorption. Langmuir model gave the best result with $R^2 \geq 0.99$ and followed by Freundlich model with $R^2 \geq 0.98$, the last, is the linear equation model, with $R^2 \geq 0.94$

Keywords : Adsorption , Zinc Oxide, Methylene Blue , Photocatalysis

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ, รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา, ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี และอาจารย์ธรรณ สีสาววัฒนานนท์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธียา กิตติเตชาชาญ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ UV-VIS spectrophotometer

ขอขอบพระคุณพี่เอกชัย รัมมะรัตน์ ที่ให้ความรู้และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ UV-VIS spectrophotometer

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ได้นำมาใช้ในการสนับสนุนการกระทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ธิดา มีบางยาง

นัยนา อุเบอร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	1
1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ชิงค์ออกไซด์	3
2.1.1 สมบัติทั่วไปของชิงค์ออกไซด์	3
2.1.2 โครงสร้างผลึกของชิงค์ออกไซด์	3
2.2 เมธิลีนบลู	4
2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	5
2.3.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส	5
2.3.2 ชนิดของโฟโตแคตตาไลซิส	5
2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา	6
2.3.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	6
2.3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยา	7
2.4 จลนพลศาสตร์ทางเคมี	8
2.4.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	9
2.5 กระบวนการดูดซับ	9
2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ	10
2.5.2 กลไกการดูดซับ	10
2.5.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ	11
2.5.4 ประเภทของการดูดซับ	11
2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	13
2.5.6 ตัวดูดซับ	14
2.5.7 สมดุลการดูดซับ	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	20
2.6.1 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer	20
2.6.1.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	21
2.6.1.2 ประเภทของ spectrophotometer	21
2.6.1.3 การสอบเทียบ UV-VIS Spectrophotometer	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 ขั้นตอนการทดสอบการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลู	25
3.3 เตรียมการวิเคราะห์	27
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติต่างๆ	28
3.5 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล	29
3.6 เก็บและล้างอุปกรณ์ต่างๆ ให้เรียบร้อย	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	30
4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1	30
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 120 นาที	30
4.1.2 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 120 นาที	31
4.1.3 แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายในระยะเวลา 120 นาที	32
4.1.4 อัตราการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายในระยะเวลา 120 นาที	34
4.1.5 ไอโซเทอมการดูดซับ	35
4.1.6 วิเคราะห์การกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ในการสลายสีย้อม ภายในเวลา 120 นาที	36
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2	37
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู ภายในระยะเวลา 20 นาที	37
4.2.1.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร	37
4.2.1.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร	39
4.2.2 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู ภายในระยะเวลา 20 นาที	41
4.2.2.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร	41
4.2.2.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร	42
4.2.2.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร	43
4.2.3 แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายในระยะเวลา 20 นาที	45
4.2.3.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร	46
4.2.3.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร	47
4.2.3.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร	47
4.2.4 อัตราการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาภายในระยะเวลา 20 นาที	49
4.2.4.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร	49
4.2.4.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร	50
4.2.4.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร	51
4.2.5 วิเคราะห์การกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ในการสลายสีย้อม ภายใน เวลา 20 นาที	53
4.2.5.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร	53
4.2.5.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร	53
4.2.5.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก	59

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย	2
2.1	ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	12
4.1	แสดงพารามิเตอร์สำหรับตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ณ เวลาสัมผัส 20 นาที	36

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์	4
2.2 แสดงสูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมธิลีนบลู	4
2.3 แสดงพลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	5
2.4 แสดงกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ	6
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา	8
2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\ln[A]$ และ (ข) $\ln[A]_0/[A]$ กับเวลา t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	9
2.7 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	11
2.8 แสดงสถานะสมดุลการดูดซับ	15
2.9 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบกายภาพ ตามการจำแนกของ IUPAC	16
2.10 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	17
2.11 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช	17
2.12 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เป็นเชิงเส้นของฟรุนดลิช	18
2.13 แสดงกลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ	18
2.14 แสดงตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m	19
2.15 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	19
2.16 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	20
2.17 แสดงเครื่องวัดการดูดกลืนแสง	20
2.18 แสดง UV-VIS spectrum	20
2.19 แสดงองค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	21
2.20 แสดงองค์ประกอบ Double-Beam spectrophotometer	22
3.1 แสดงการผสมสีย้อมเมธิลีนบลู 2.00 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำ DI 1 ลิตร	25
3.2 แสดงซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่กำหนดผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 100 มิลลิลิตร	25
3.3 แสดงการทดลองโดยทำในที่มืด	25
3.4 แสดงผลการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.15 กรัม	26
3.5 แสดงสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 0.0013 กรัมต่อลิตร	26
3.6 แสดงซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่กำหนดผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 100 มิลลิลิตร	26
3.7 แสดงการทดลองโดยฉายแสง UV	27
3.8 แสดงผลการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตรโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.05 กรัม	27
3.9 แสดงการติดตั้งเครื่อง UV-Visible spectrophotometer	27
3.10 แสดงการใส่สารละลายภายในคิวเวทท์	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 แสดงหน้าโปรแกรม AvaSoft 7.4 Basic-2009	28
4.1 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 120 min.)	30
4.2 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 120 min.)	30
4.3 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 120 min.)	30
4.4 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 120 min.)	31
4.5 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 120 min.)	31
4.6 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 120 min.)	31
4.7 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 120 min.)	32
4.8 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 120 min.)	32
4.9 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 120 min.)	32
4.10 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 120 min.)	33
4.11 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 120 min.)	33
4.12 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 120 min.)	33
4.13 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 120 min.)	34
4.14 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 120 min.)	34
4.15 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 120 min.)	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 120 min.)	35
4.17 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)	35
4.18 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบพหุนาม (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)	35
4.19 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)	36
4.20 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.002 g. , Time = 120 min.)	36
4.21 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , เวลา 20 min.)	37
4.22 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)	37
4.23 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , เวลา 20 min.)	37
4.24 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , เวลา 20 min.)	38
4.25 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , เวลา 20 min.)	38
4.26 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)	38
4.27 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , เวลา 20 min.)	39
4.28 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , เวลา 20 min.)	39
4.29 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , เวลา 20 min.)	39
4.30 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)	40
4.31 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , เวลา 20 min.)	40
4.32 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , เวลา 20 min.)	40
4.33 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 20 min.)	41
4.34 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 20 min.)	41
4.35 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 20 min.)	41
4.36 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 20 min.)	42
4.37 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 20 min.)	42
4.38 แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 20 min.)	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.39	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 20 min.)	43
4.40	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 20 min.)	43
4.41	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 20 min.)	43
4.42	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 20 min.)	44
4.43	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 20 min.)	44
4.44	แสดงการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 20 min.)	44
4.45	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	45
4.46	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	45
4.47	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	45
4.48	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	46
4.49	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	46
4.50	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	46
4.51	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.52	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	47
4.53	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	47
4.54	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	48
4.55	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	48
4.56	แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	48
4.57	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	49
4.58	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	49
4.59	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	49
4.60	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	50
4.61	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	50
4.62	แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.63 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	51
4.64 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB =1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	51
4.65 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)	51
4.66 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)	52
4.67 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)	52
4.68 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)	52
4.69 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0013 g. , Time = 20 min.)	53
4.70 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0014 g. , Time = 20 min.)	53
4.71 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0016 g. , Time = 20 min.)	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผลอนุภาคละเอียดสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีโครงสร้างแบบ wurtzite หรือ hexagonal มีคุณสมบัติในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จึงนำมาใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อม

ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติด้านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวแคตตาลิสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวแคตตาลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ด้วยหลักการทำงานของกระบวนการ photocatalytic oxidation คือ การให้พลังงานแสงเข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) โดยแสงที่ให้แก่ระบบจะเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย โดยมีตัวถูกดูดซับตั้งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก้วหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่าตัวดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene blue) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)
- 2) วิเคราะห์ผลโดยใช้สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับ 3 แบบ คือ สมการการดูดซับแบบเส้นตรง, สมการการดูดซับของฟรุนดิช และสมการการดูดซับของแลงเมียร์
- 3) วิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene blue) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)

1.3 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) ของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
- 2) วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (Methylene Blue) โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer
- 3) นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงสุด
- 4) นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์โดยสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับ 3 แบบ คือ สมการการดูดซับแบบเส้นตรง, สมการการดูดซับของฟรุนดิช และสมการการดูดซับของแลงเมียร์
- 5) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย

ปี การศึกษา	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2558	1.					
	2.					
	3.					

ปี การศึกษา	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน				
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
2559	3.					
	4.					
	5.					

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับความรู้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)
- 2) ได้รับความรู้เรื่องทฤษฎีการดูดซับ
- 3) ได้นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO)

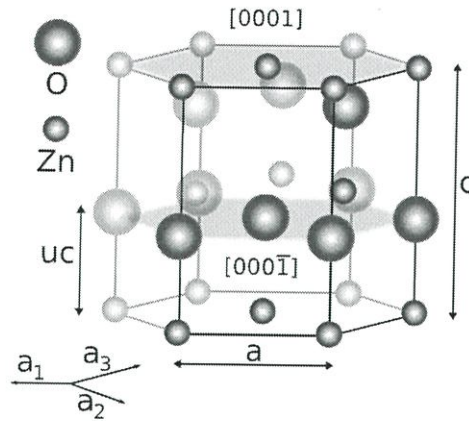
ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษทางแสง โดยเรืองแสงได้ ในย่านความยาวคลื่นสั้นในช่วงสีเขียวยถึงฟ้าจึงนำไปใช้เป็นไดโอดที่เปล่งแสงได้

2.1.1 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์

ชื่อ	ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) หรือซิงค์ (II) ออกไซด์ (zinc (II) oxide) หรือ ซิงค์ไวท์ (zinc white)
สูตรโมเลกุล	ZnO
น้ำหนักโมเลกุล	81.37 amu.
สถานะและลักษณะ	ของแข็งผงสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ๆ ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.606 g/cm ³
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิห้อง	5.642 g/cm ³
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 20 °C	5.607 g/cm ³
จุดหลอมเหลว (melting point)	1975 °C
จุดเดือด (boiling point)	ระเหิดที่ 1800 °C
ค่าคงที่อิเล็กทริกสัมพัทธ์	8.656
ดัชนีหักเห	2.008, 2.029
ความสามารถละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ (ละลายได้ในกรดอ่อนไม่ละลายในแอลกอฮอล์)
pH	6.95
แถบช่องว่างพลังงาน	3.2 eV
การดูดกลืนรังสี	รังสีที่อยู่ในย่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตแทบทั้งหมดซึ่งมีความยาวคลื่นต่ำกว่า 360 นาโนเมตร

2.1.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

โครงสร้างผลึกโดยทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ เป็นแบบ hexagonal wurtzite โดยมีโครงสร้างผลึกดังรูปที่ 2.1

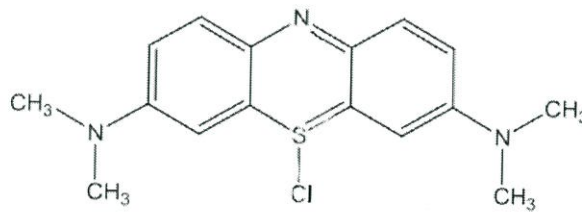


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

ลักษณะที่สำคัญของโครงสร้าง wurtzite คือเป็นโครงสร้างแบบหกเหลี่ยม โดยมีแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) $a = 0.3296 \text{ nm}$ และ $c = 0.52065 \text{ nm}$ โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ เกิดจากการยึดเกาะกันของอะตอมโลหะ (ประจุบวก) กับอะตอมออกซิเจน (ประจุลบ) ด้วยพันธะไอออนิกโดยอะตอมออกซิเจนเรียงตัวยึดกันแน่นชิดกันมากที่สุดแบบ hexagonal close packing เกิดช่องว่างเตตระฮีดรอล (tetrahedral hole) โดยมีอะตอมของโลหะแทรกอยู่ในช่องว่างเพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องที่มีอยู่ทั้งหมด หรือแบบ hole เว้น hole ซึ่งในโครงสร้าง wurtzite ของซิงค์ออกไซด์ประกอบไปด้วยไอออน Zn^{2+} จะเกิดการโคออร์ดิเนตกับไอออนลบ O^{2-} และไอออนชนิดหนึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนตรงข้ามเป็นแบบเตตระฮีดรอล มีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 4 : 4

2.2 เมธิลีนบลู (Methylene Blue)

เมธิลีนบลูมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สวิสบลู (Swiss Blue) เมื่อละลายน้ำแล้วจะเป็นสีน้ำเงิน มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงสูตรโครงสร้างโมเลกุลของเมธิลีนบลู (Methylene Blue)

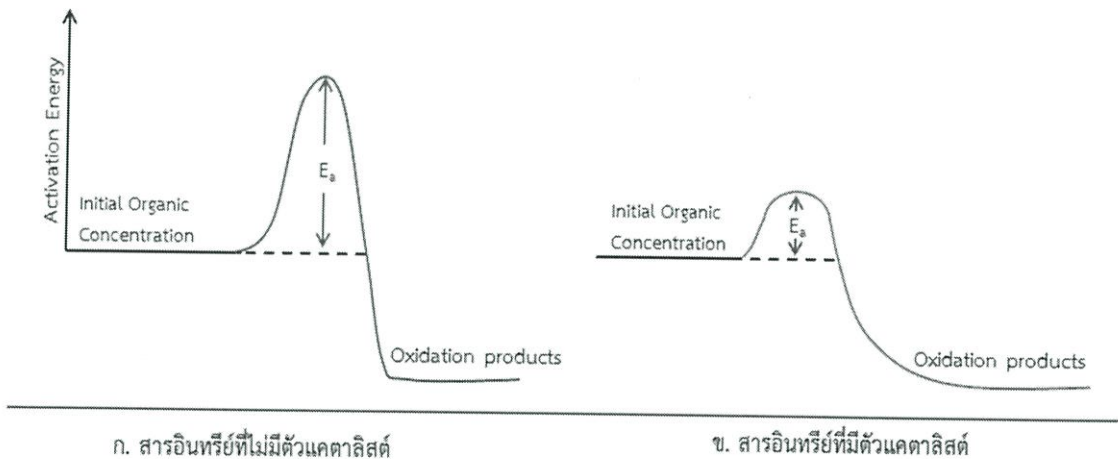
2.2.1 สมบัติทั่วไปของเมธิลีนบลู

สูตรโมเลกุล	$\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$
น้ำหนักโมเลกุล	319.85 g/mol
ความสามารถในการละลายน้ำ	3.55 %
จุดหลอมเหลว (melting point)	100 – 110 °C

2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic)

2.3.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวแคตาไลสต์ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัว catalyst นี้ จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ภาพที่ 2.3 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัว catalyst ภาพที่ 2.3 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มี catalyst ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัว catalyst ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังภาพที่ 2.3 (ข) ตัว catalyst นี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap)



ก. สารอินทรีย์ที่ไม่มีตัวแคตาไลสต์

ข. สารอินทรีย์ที่มีตัวแคตาไลสต์

รูปที่ 2.3 แสดงพลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสต้องมียุทธปัจจัยประกอบ คือ

- 1) แคตาไลสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวแคตาไลสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

2.3.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตาไลสต์ ดังนี้

- 1) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ catalyst ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว)

- 2) โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัว catalyst ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด

2.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่ง หรือแคตตาลิสต์ หมายถึงสารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นแล้ว จะได้ตัวเร่งกลับคืนมาในลักษณะเหมือนเดิม

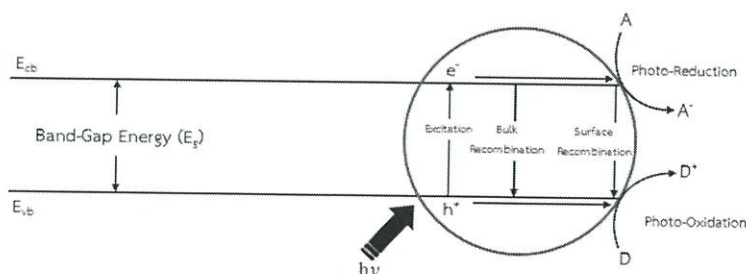
2.3.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

สารที่ใช้เป็นตัว catalyst ในปฏิกิริยา photocatalysis ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์ และ คอนดักชันแบนด์ ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวก สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์ และ คอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ใน สารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และ ฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตตาลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ

ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้น ดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนส์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมากเช่นกัน

2.3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Mechanism)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.1) และ สมการที่ (2.2) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และเรดิคัลตัวอื่น ดังแสดงใน สมการที่ (2.4) และ สมการที่ (2.5) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ ออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการ ที่ (2.8) และสมการที่ (2.9) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิด จากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามา มีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical, H^+) ตามสมการที่ (2.10) ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นสารออกซิแดนซ์หลักใน ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส เพราะ ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก F^- แต่สูงกว่า Cl^- และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ ดังต่อไปนี้

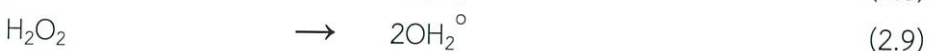
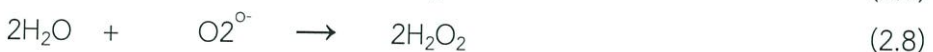
การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดเรดิคัล จาก e^-/h^+



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



- h^+ คือ โฮลที่วาเลนส์แบนด์ (Valence Band Hole)
 e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)
 OH° คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
 $O_2^{\circ -}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
 OH_2° คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
 H° คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและ h^+ ที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตาไลซิสจึงเกิดขึ้น ได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซุปเปอร์ ออกไซด์ไอออนเรดิคัล เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัว แคตาลิสต์กับ h^+ ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่า ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวแคตาลิสต์อื่น

2.4 จลนพลศาสตร์ทางเคมี (Chemical Kinetics)

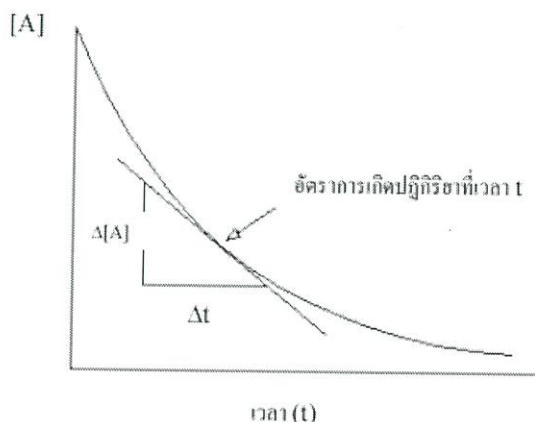
อัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate of Change) คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพกับเวลา

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ}}{\text{เวลา}} = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง

อัตราการเปลี่ยนแปลงที่เวลาใดๆ หาได้จากความชันของเส้นสัมผัสที่เวลานั้นๆ

พิจารณา ปฏิกิริยา $A \rightarrow B$



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

2.4.1 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (1st - order Reaction)

สมการทั่วไปเป็นดังนี้



$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = -\frac{d[A]}{dt} = k[A] \tag{2.12}$$

อินทิเกรตสมการ (2.12) จะได้

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{1}{[A]} d[A] = -\int_0^t k dt \tag{2.13}$$

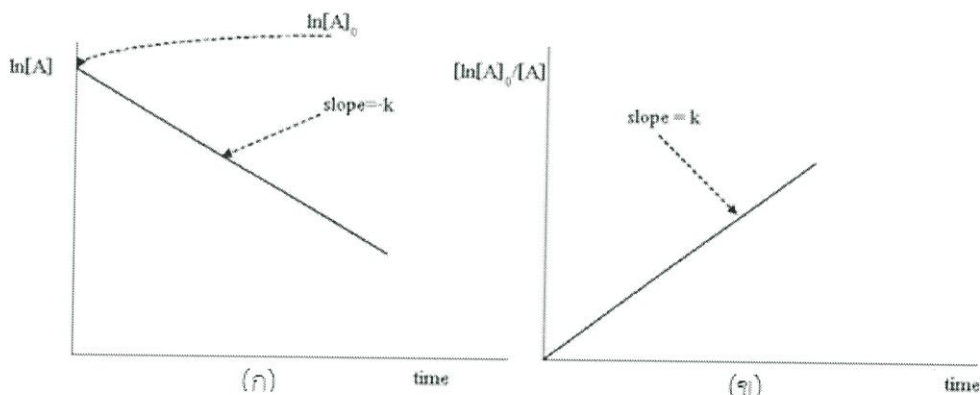
$$\ln \left| \frac{[A]}{[A]_0} \right| = -kt \tag{2.14}$$

$$\ln \left(\frac{[A]}{[A]_0} \right) = -kt \tag{2.16}$$

$$\frac{[A]}{[A]_0} = e^{-kt} \tag{2.17}$$

$$[A] = [A]_0 e^{-kt} \tag{2.18}$$

หน่วยของค่าคงที่อัตราคือ เวลา⁻¹ เช่น s⁻¹ หรือ min⁻¹ หรือ hr⁻¹
 จากสมการที่ (2.16) เขียนสมการใหม่ได้เป็น $\ln[A] = -kt + \ln[A]_0$



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) $\ln[A]$ และ (ข) $\ln[A]_0/[A]$ กับเวลา t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว

จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือส่วนต่อประสาน) (interface) กัน) เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนแปลงรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสงหรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกันแต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) คือปรากฏการณ์ที่เกิดความสมดุลในการแยกสารประกอบประเภทไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ไปยังพื้นผิวของระบบสองสถานะ (Two - Phase System) อันประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ และส่วนที่เป็นของแข็ง เช่น ดิน ฮิวมัส หรือผงกัมมันต์ กระบวนการทางกายภาพที่เกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนแยกไปยังของแข็งมักจะเกี่ยวกับพันธะที่ไม่แข็งแรง สามารถย้อนกลับได้

สารดูดซับ (Adsorbent) คือของแข็ง (solid phase) ที่ดูดซับสารเคมีไว้ซึ่งในทางการจัดการของเสียอันตรายรวมถึงดิน, สลัดจ์, ชั้นใต้ดิน (subsurface strata) ของระบบน้ำใต้ดิน และถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด (granular activated carbon)

สารถูกดูดซับ (Adsorbate) คือสารประกอบในเฟสของเหลว (liquid phase) ซึ่งถูกแยกไปยังสารดูดซับ เฟสของเหลวมักจะเป็นน้ำ แต่กรณีที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) ก็พบบ้างเป็นกรณีพิเศษ

2.5.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็ง หรือของเหลวการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

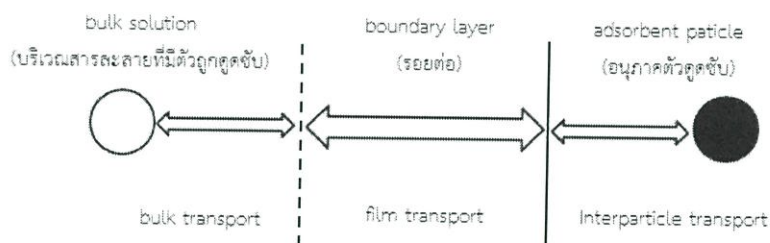
ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่ เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่าง ตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทาง ฟิสิกส์ หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะ การเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี

2.5.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

- 1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นรวดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ
- 2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้น
- 3) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่าการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

2.5.4 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูด

ชั้นสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะ	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ช่วงอุณหภูมิ	ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าจุดควบแน่นของแก๊ส (เช่น Xe < 100 K, CO ₂ < 200 K)	ไม่มีข้อจำกัด (แต่โมเลกุลที่อาจจะดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพเกิดเพียงช่วงแคบๆ)
เอนทัลปี (Enthalpy) การดูดซับ	เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ เช่นมวลโมเลกุล และสภาพขั้ว โดยปกติเท่ากับ 5 - 40 kJ mol ⁻¹ (คือความร้อนของ Liquefaction)	มีช่วงกว้าง เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะทางเคมี โดยปกติจะอยู่ช่วง 40 - 800 kJ mol ⁻¹
ผลึกศาสตร์ (Crystallography) โดยความแตกต่างระหว่างระนาบพื้นผิวของผลึกชนิดเดียวกัน	ไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเรขาคณิตระดับอะตอมของพื้นผิว	มีความผันแปรระหว่างระนาบของผลึก
ธรรมชาติการดูดซับ	ปกติเป็นการดูดซับที่เกิดการแตกตัว และอาจจะผันกลับไม่ได้	การดูดซับที่ไม่แตกตัวที่ผันกลับได้
การเข้าถึงความอิ่มตัว	เกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer)	เกิดการดูดซับได้เฉพาะแค่เพียงหนึ่งชั้น (Monolayer) เท่านั้น
จลศาสตร์การดูดซับ	รวดเร็ว เป็นกระบวนการที่ไม่มีการกระตุ้น	มีความแปรผันมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ถูกกระตุ้น

(ที่มา : ดร.คชาวุธ ภาชนะ, 2554)

2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

1) ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลัก ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

1.1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะ อธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุล ของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เช่นการใช้ซังข้าวโพดในการดูดซับ PCP เปรียบเทียบกับการ ใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PCP (33 mg/g) ซึ่งสูงกว่าซังข้าวโพด (10 mg/g) เนื่องจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากกว่าซังข้าวโพดจึงทำให้ สามารถดูดซับ PCP ได้ดีกว่า นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อ การดูดซับ เช่นกัน คือถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลงด้วย

1.2) ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

1.3) เคมิที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2) ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

2.1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน ตัวอย่างเช่น การดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ด้วยชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* (Denizli et al., 2004) และชีวมวลเห็ดนางฟ้า *Pleurotus sajor caju* (Denizli et al., 2005) พบว่า ลำดับความสามารถดูดซับ 2,4,6-TCP > 4-CP > 2-CP > ฟีนอล เนื่องจากสารประกอบคลอโรฟีนอล มีความสามารถละลายน้ำน้อยกว่าฟีนอลจึงทำให้มีความสามารถดูดซับที่ดีกว่า

2.2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น กรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งดูได้จากการดูดซับ PCP และ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่า ความสามารถดูดซับ PCP สูงกว่า TCP เนื่องจาก PCP มีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP

2.3) ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้ว ยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความ มีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.4) ผลของ $[H^+]$ หรือ pH ถ้า $[H^+]$ ลดลงอัตราการดูดซับจะเร็วและมากเพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดีทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็น กลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดีซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ

2.5) ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

3) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับ จะมีความหนา เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

2.5.6 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกา กัมมันต์ อะลูมิเนียม กัมมันต์ ถ่านกระดูก สีนแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสาร อนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับอนินทรีย์มีขีดจำกัด

2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500 – 1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่น และรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

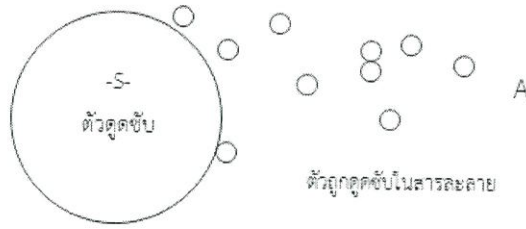
3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม

4) วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อัลไค โคโคท ขากกาแฟ กากถั่วเหลือง ฟางข้าวเปลือกไม้ แถ่กลบดำ เป็นต้น

5) สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย

2.5.7 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีประมาณคงที่



รูปที่ 2.8 แสดงสภาวะสมดุลการดูดซับ

- ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย
 -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ
 Q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
 (1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล

$$r_1 = r_2$$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$q/(1-q) = k_1/k_2[C] = K[C]$$

$$q = K[C]/1+K[C] \quad (2.19)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

$$K = \frac{q}{C}$$

$$(2.20)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับหน่วยเป็น ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมลต่อกิโลกรัม, โมลต่อกรัม, มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

W = มวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม

V = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็น ลิตร

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น

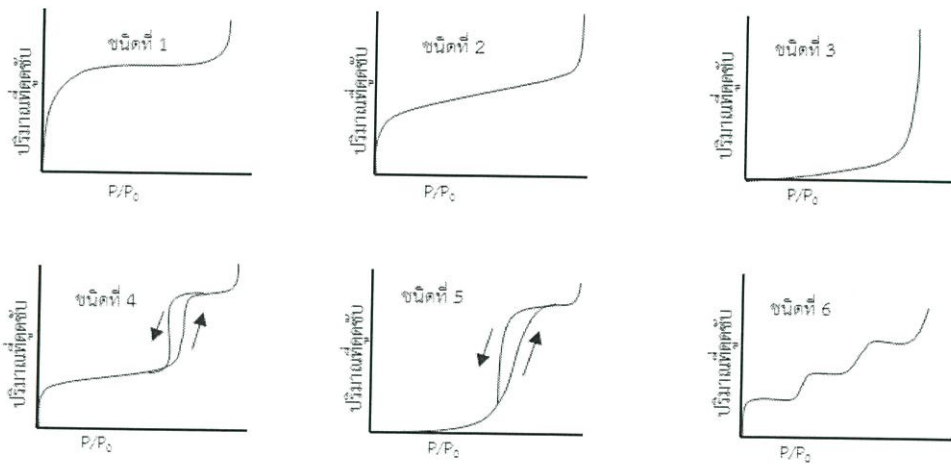
q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (adsorption capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad (2.21)$$

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยให้ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนอนและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบชนิดสารดูดซับที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับในสารละลายมี 5 ชนิด คือชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ส่วนไอโซเทอร์ม แบบที่ 6 เพิ่งเป็นแบบที่ค้นพบใหม่ไอโซเทอร์มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มที่การดูดซับเกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (ไอโซเทอร์มแบบแลงก์เมียร์) ส่วนแบบอื่นๆ เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบหลายขั้น



รูปที่ 2.9 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบกายภาพ ตามการจำแนกของ IUPAC

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 3 สมการที่นิยมใช้กัน

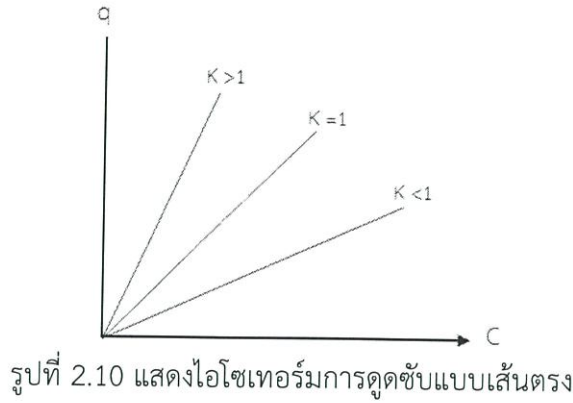
1) สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C ตามสมการ 2.20

$$K = \frac{q}{c}$$

จะได้

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงวันเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



รูปที่ 2.10 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

- ถ้า $K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นผิวตัวดูดซับ
- ถ้า $K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ
- ถ้า $K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

2) สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich (1880 -1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

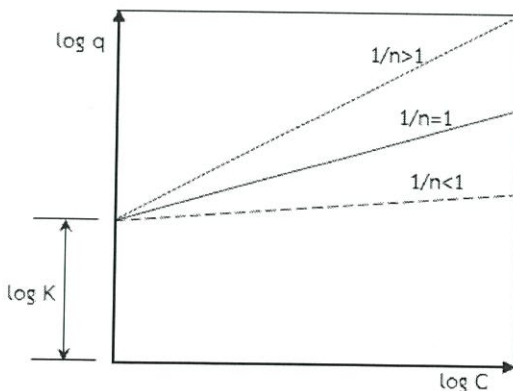
$$q = KC^{1/n} \tag{2.22}$$

สมการ (2.22) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่า 1

เมื่อจัดรูปแบบสมการที่ (2.22) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \tag{2.23}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ และ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$



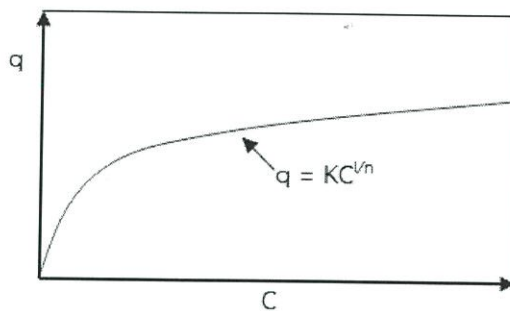
รูปที่ 2.11 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดิช

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

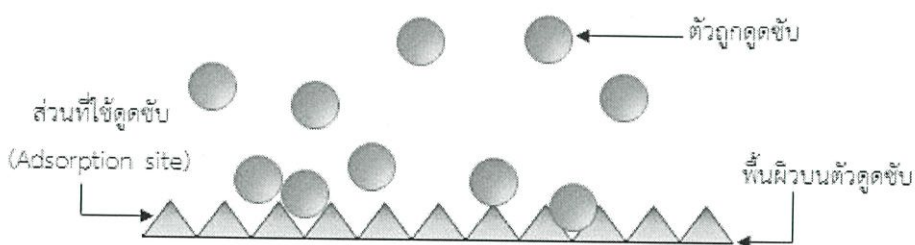
ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q และ C จากสมการที่ (2.20) ดังภาพที่ 2.12 จะไม่สามารถบอกลถึงความปริมาณของตัวถูกดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้



รูปที่ 2.12 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เป็นเชิงเส้นของฟรอนดิช

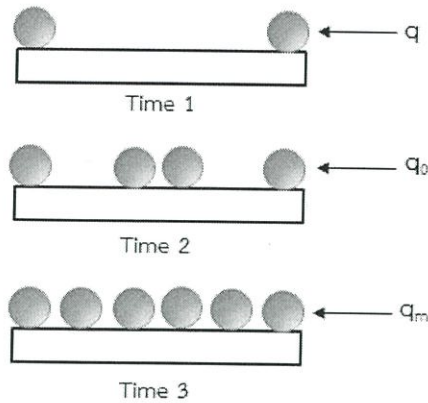
3) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



รูปที่ 2.13 แสดงกลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับ

จะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพ 2.13

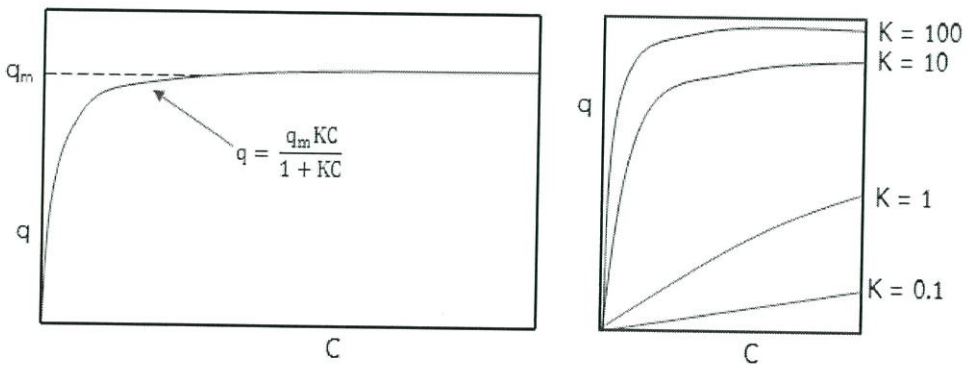


รูปที่ 2.14 แสดงตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับและจากสมการที่ (2.19) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์จะใช้สมการที่ (2.19) เพียงแต่ต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับแทนด้วย q_m ดังนั้น สมการ (2.19) จึงมีรูปแบบดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \tag{2.24}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (2.24) จะได้กราฟดังภาพที่ 2.15



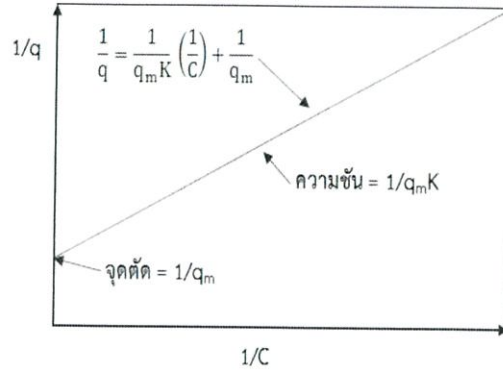
รูปที่ 2.15 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.24) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \tag{2.25}$$

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$

และหาจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

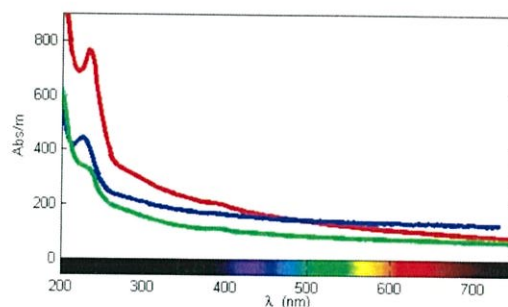
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.6.1 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer)



รูปที่ 2.17 แสดงเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงUltra violet (UV) และVisible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดง UV-VIS spectrum

2.6.1.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ประกอบไปด้วย

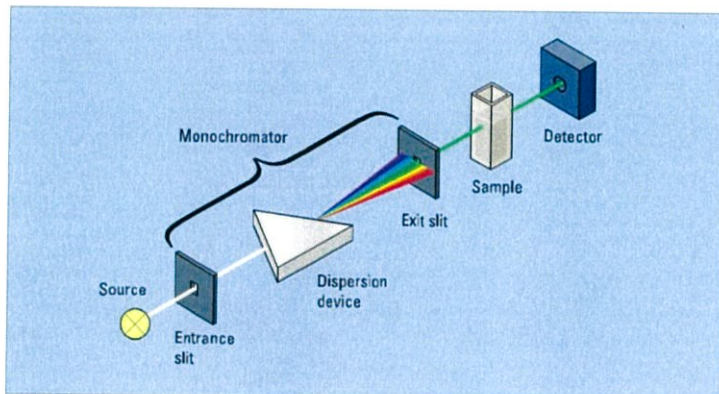
1) Light source แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240 - 2,500 nm เป็นต้น

2) Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือเกรตติง

3) Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4) Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector

5) เครื่องแสดงค่า ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่มาจาก detector เป็นค่าที่ใช้งาน



รูปที่ 2.19 แสดงองค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

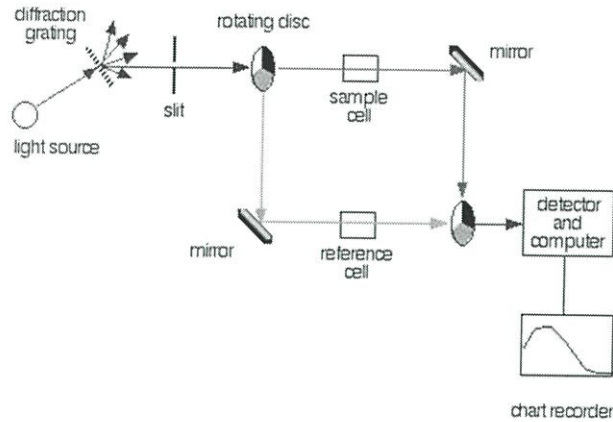
2.6.1.2 ประเภทของ spectrophotometer

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) Single-Beam spectrophotometer (รูปที่ 2.17) เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์ โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับ สัญญาณเนื่องจาก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2) Double-Beam Spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะเข้าสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ใน

ขณะเดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



รูปที่ 2.20 แสดงองค์ประกอบ Double-Beam spectrophotometer

2.6.1.3 การสอบเทียบ UV-VIS Spectrophotometer

1) Wavelength accuracy/repeatability

1.1) Wavelength accuracy : ตรวจสอบความแม่นยำของความยาวคลื่นที่อ่านได้จากเครื่องว่าเบี่ยงเบนไปจากความยาวคลื่นจริงเท่าใด (ตรวจสอบ Wavelength scale)

1.2) Wavelength repeatability : ตรวจสอบความเที่ยง (precision) ของความยาวคลื่นที่อ่านได้เมื่อ scan ซ้ำๆ

2) Photometric accuracy/repeatability

2.1) Photometric accuracy : ตรวจสอบความแม่นยำของค่า absorbance/%T ที่อ่านได้จากเครื่องว่า เบี่ยงเบนไปจากค่าจริงเท่าใด

2.2) Photometric repeatability : ตรวจสอบความเที่ยง (precision) ของค่า absorbance/%T ที่อ่านได้เมื่อทดสอบซ้ำ โดยอ่านค่า absorbance/%T ที่ความยาวคลื่นใด ความยาวคลื่นหนึ่งซ้ำๆ

2.3) Photometric linearity : ตรวจสอบการดูตกเส้นรังสีว่า linear ตลอดช่วงที่ใช้งานหรือไม่

3) Stray light : ตรวจสอบว่ามีแสงอื่นๆ นอกเหนือจากความยาวคลื่นที่ตั้งไว้ ผ่านเข้า detector หรือไม่

4) Baseline stability : การตรวจสอบความสามารถของเครื่องว่า baseline คงที่ตลอดเวลาหนึ่งๆหรือไม่

5) baseline flatness : การตรวจสอบเพื่อที่จะดูระดับ baseline ในขณะที่ไม่มีความยาว

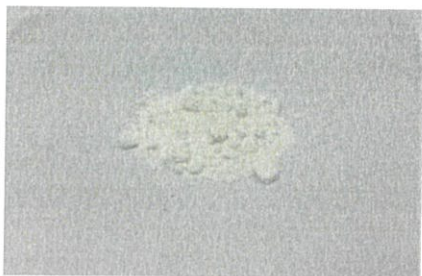
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลอง เป็นการศึกษาคุณสมบัติในการย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลูของซิงค์ออกไซด์ เพื่อดูปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส (การสลายสีย้อม) โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
- 2) เมธิลีนบลู (Methylene blue)
- 3) Deionized water
- 4) เครื่องซังสาร
- 5) กระจกซังสาร
- 6) เครื่องกวนสาร
- 7) หลอดฉายแสงยูวี
- 8) แมกเนติกบาร์
- 9) ซ้อนตักสาร
- 10) เครื่องแก้ว
- 11) คิวเวท



ซิงค์ออกไซด์



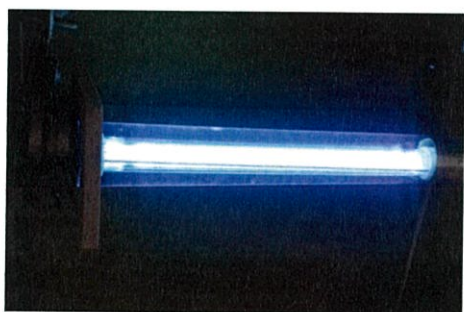
เมธิลีนบลู



เครื่องชั่งสาร



เครื่องกวนสาร



หลอดฉายแสงยูวี



แมกเนติกบาร์



เครื่องแก้ว

3.2 ขั้นตอนการทดสอบการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลู

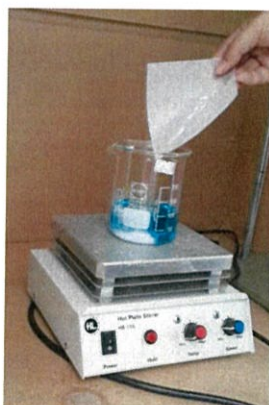
ตอนที่ 1

- 1) นำสีย้อมเมธิลีนบลู ปริมาณ 2.00 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำ DI 1 ลิตร



รูปที่ 3.1 แสดงการผสมสีย้อมเมธิลีนบลู 2.00 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำ DI 1 ลิตร

- 2) นำซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.20 กรัม ผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู ที่เตรียมไว้ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

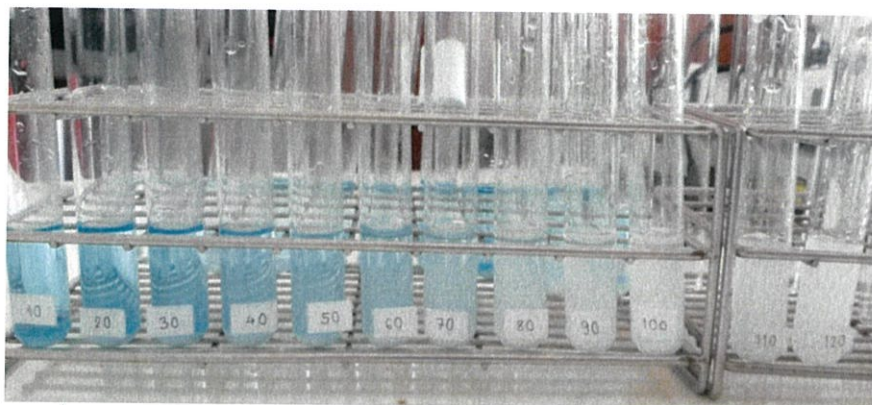


รูปที่ 3.2 แสดงซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่กำหนดผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 100 มิลลิลิตร

- 3) จับเวลาโดยทำในที่มีด 10 นาที จากนั้นฉายแสงยูวีและเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที รวมเป็นเวลา 120 นาที



รูปที่ 3.3 แสดงการทดลองโดยทำในที่มีด

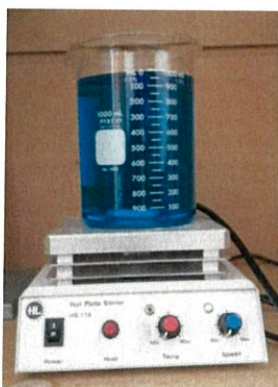


รูปที่ 3.4 แสดงผลการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.15 กรัม

4) นำผลที่ได้มาตั้งไว้ให้ตกตะกอน ก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงต่อไป

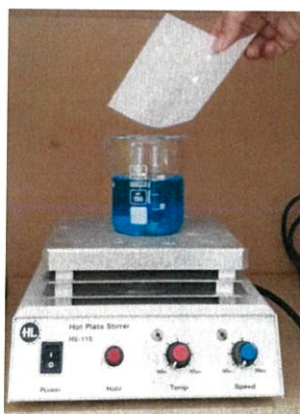
ตอนที่ 2

1) นำสีย้อมเมธิลีนบลู ปริมาณ 1.30 , 1.40 และ 1.60 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำ DI 1 ลิตร



รูปที่ 3.5 แสดงสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 0.0013 กรัมต่อลิตร

2) นำซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.20 กรัม ผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่เตรียมไว้แต่ละความเข้มข้นในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

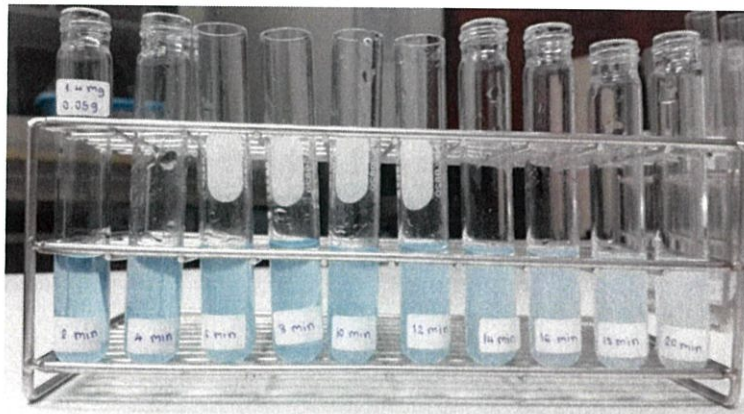


รูปที่ 3.6 แสดงซิงค์ออกไซด์ปริมาณที่กำหนดผสมกับสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู 100 มิลลิลิตร

3) ฉายแสงยูวีและเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 นาที รวมเป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 3.7 แสดงการทดลองโดยฉายแสง UV

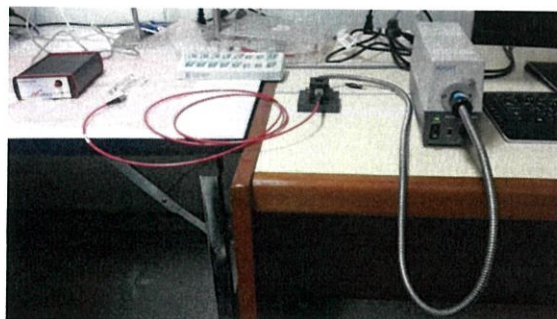


รูปที่ 3.8 แสดงผลการสลายตัวของสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตรโดยใช้ ซิงค์ออกไซด์ 0.05 กรัม

4) นำผลที่ได้มาตั้งไว้ให้ตกตะกอน ก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงต่อไป

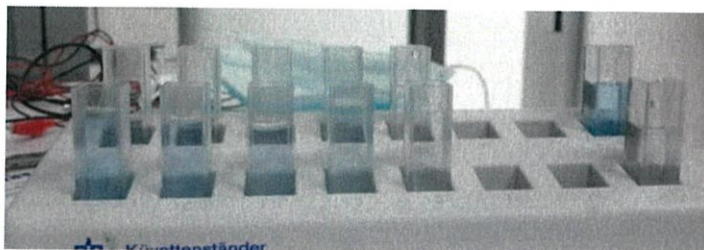
3.3 เตรียมการวิเคราะห์

1) ติดตั้งเครื่อง UV-Visible spectrophotometer



รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

2) เตรียมสารละลายที่เป็นผลการสลายตัวของสีย้อม รวมทั้งน้ำ DI และ สารละลายสีย้อม เมธิลีนบลู สำหรับเป็นตัวอย่างใน ใสควิเวทท์ไว้



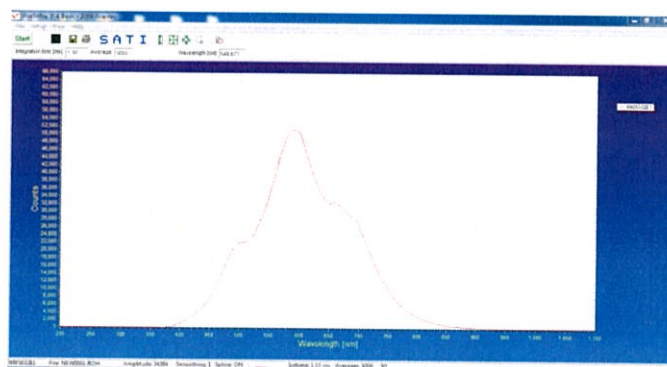
รูปที่ 3.10 แสดงการใส่สารละลายภายในควิเวทท์

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

การวิเคราะห์การดูดกลืนของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

UV-Visible spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190 – 1000 nm. ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย

1) หลังติดตั้งเครื่องเสร็จแล้ว เปิดโปรแกรม AvaSoft 7.4 Basic-2009 ขึ้นมา



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าโปรแกรม AvaSoft 7.4 Basic-2009

2) เริ่มทำการวิเคราะห์สารจากเครื่องมือ UV-Visible spectrophotometer

3.5 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล

ตอนที่ 1

- 1) วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 2) วิเคราะห์แนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 3) วิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 4) วิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับ
- 5) วิเคราะห์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลูโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

ตอนที่ 2

- 1) วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 2) วิเคราะห์แนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 3) วิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลู
- 4) วิเคราะห์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลูโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส

3.6 เก็บและล้างอุปกรณ์ต่างๆ ให้เรียบร้อย

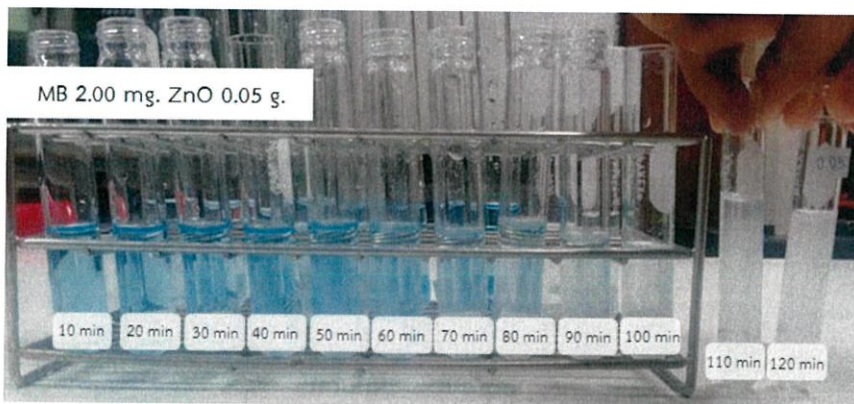
- 1) ล้างเครื่องแก้วและอบให้แห้งด้วยเครื่องอบ
- 2) ล้างคิวเวทท์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์

บทที่ 4

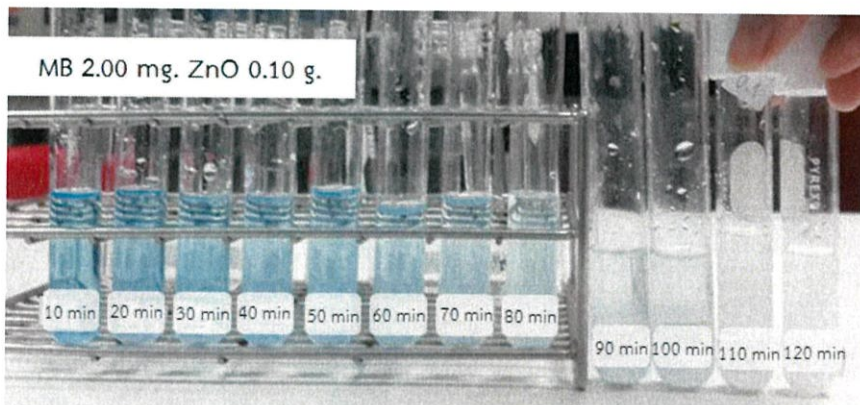
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

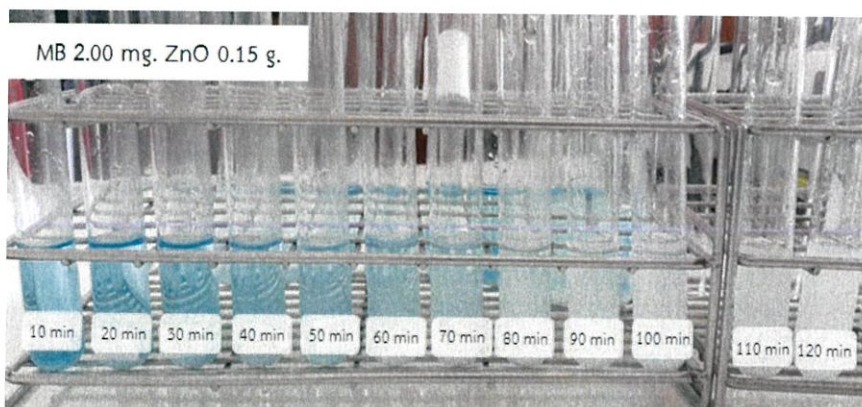
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 120 นาที



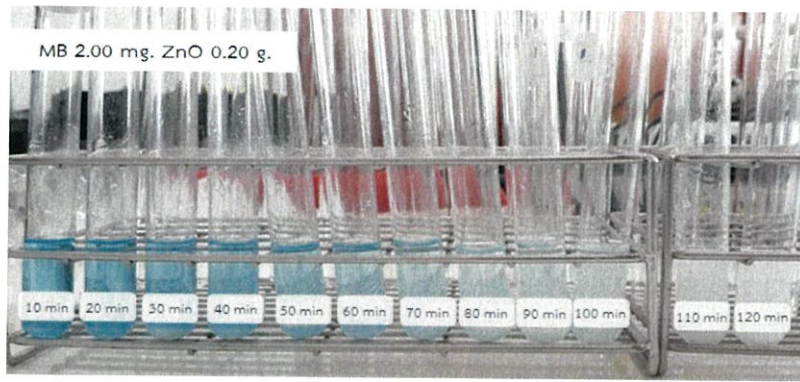
รูปที่ 4.1 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 120 min.)



รูปที่ 4.2 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 120 min.)

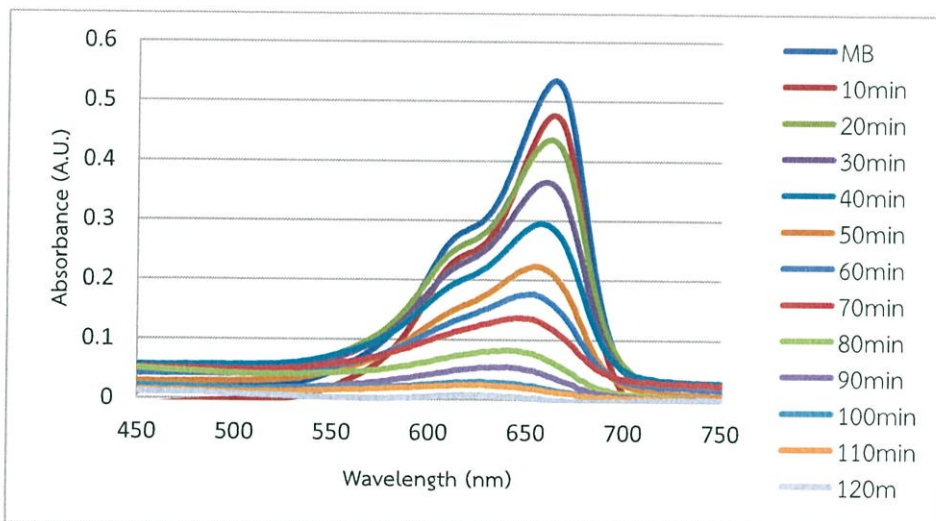


รูปที่ 4.3 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 120 min.)

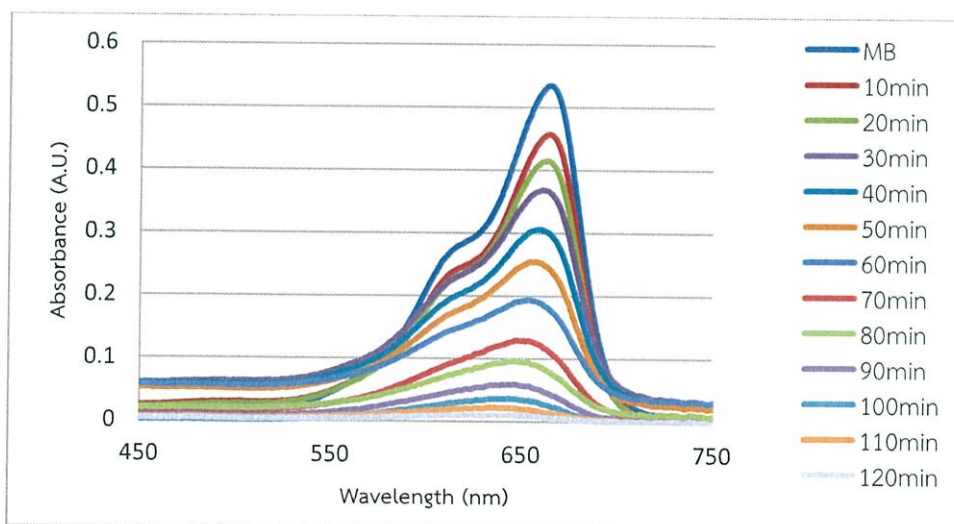


รูปที่ 4.4 การย่อยสลายสีของเมธิลีนบลู : (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 120 min.)

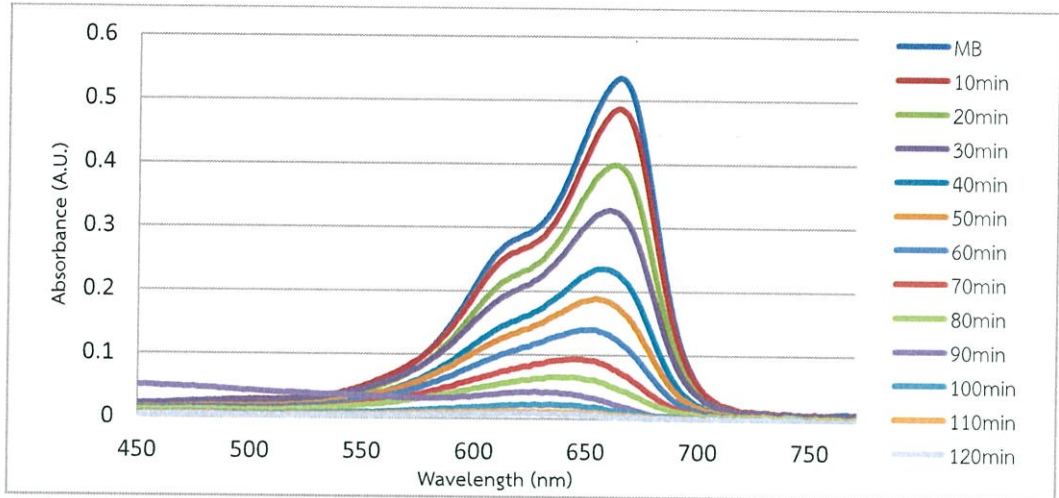
4.1.2 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของสารละลายสีของเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร ภายในระยะเวลา 120 นาที



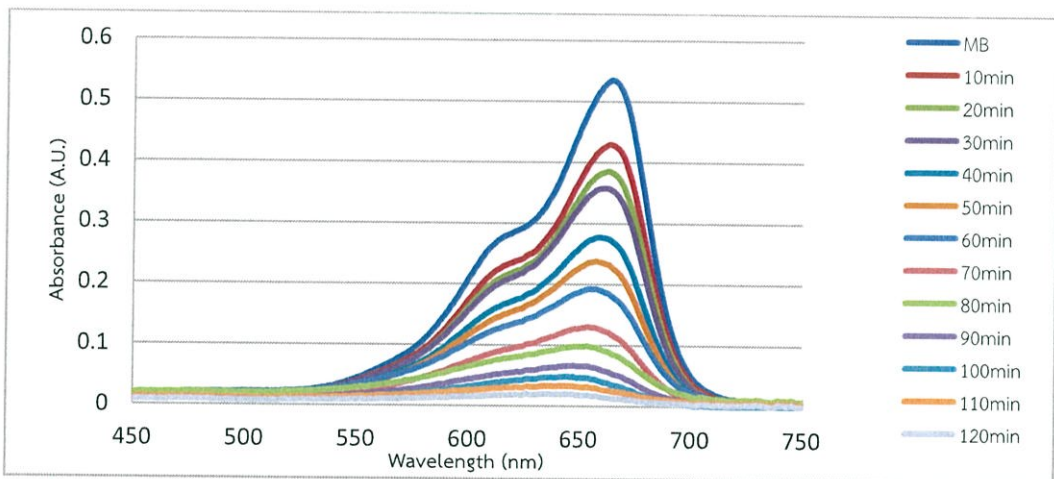
รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงของสีของเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time 120 min.)



รูปที่ 4.6 การดูดกลืนแสงของสีของเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time 120 min.)

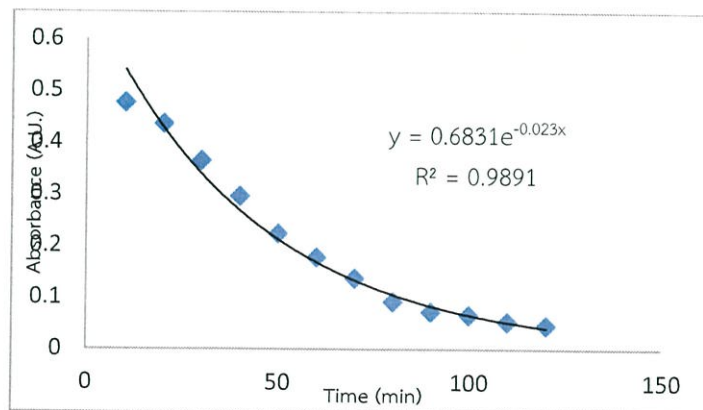


รูปที่ 4.7 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time 120 min.)

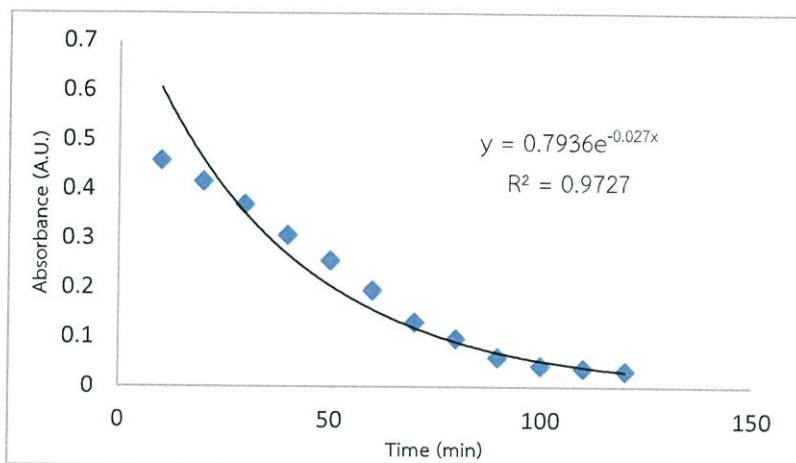


รูปที่ 4.8 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time 120 min.)

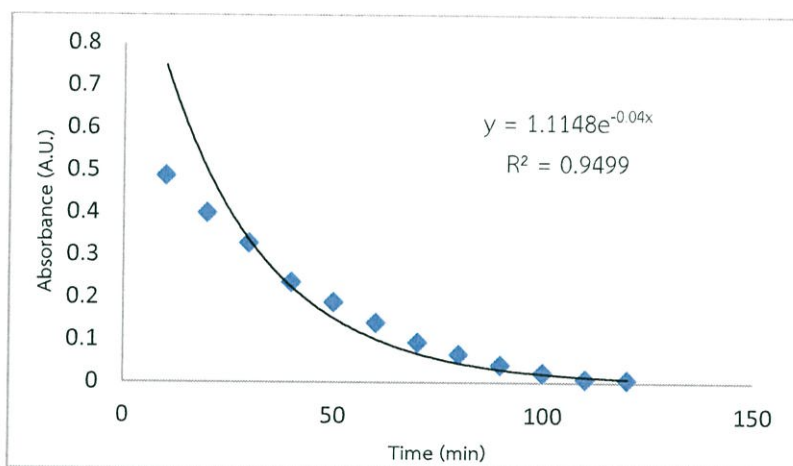
4.1.3 แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายในระยะเวลา 120 นาที



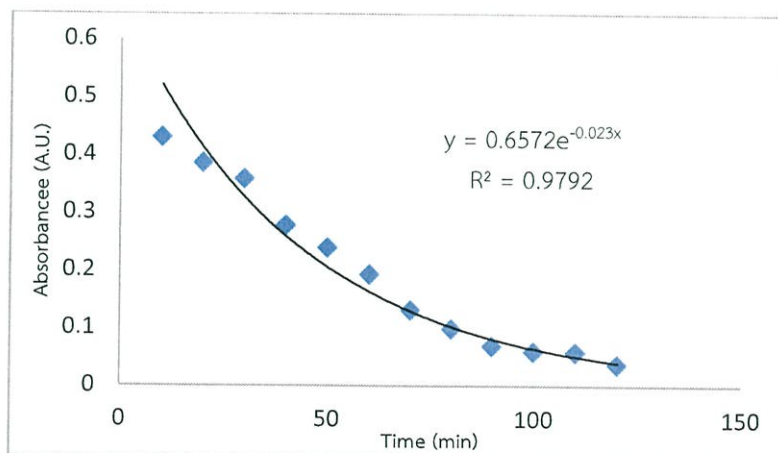
รูปที่ 4.9 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 120 min.)



รูปที่ 4.10 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.10 g. ,Time = 120 min.)

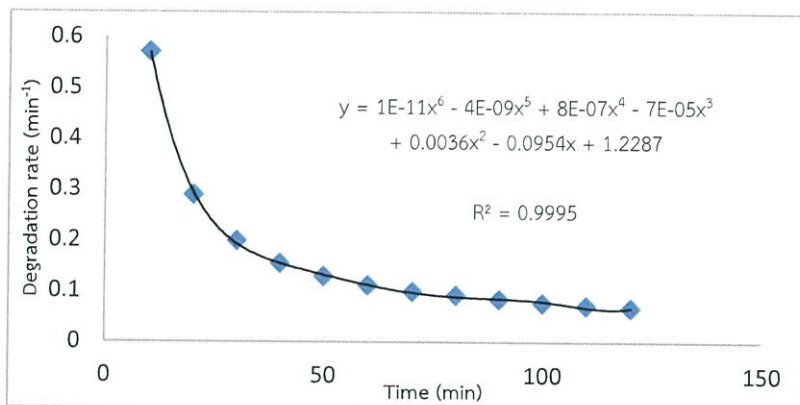


รูปที่ 4.11 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.15 g. ,Time = 120 min.)

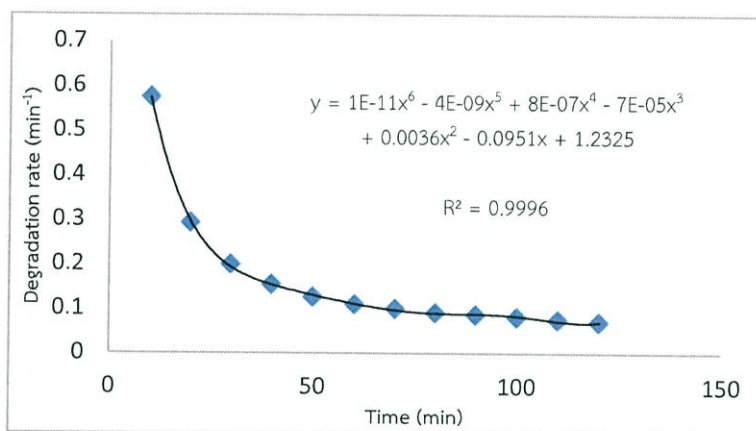


รูปที่ 4.12 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 2.0 mg , ZnO = 0.20 g. ,Time = 120 min.)

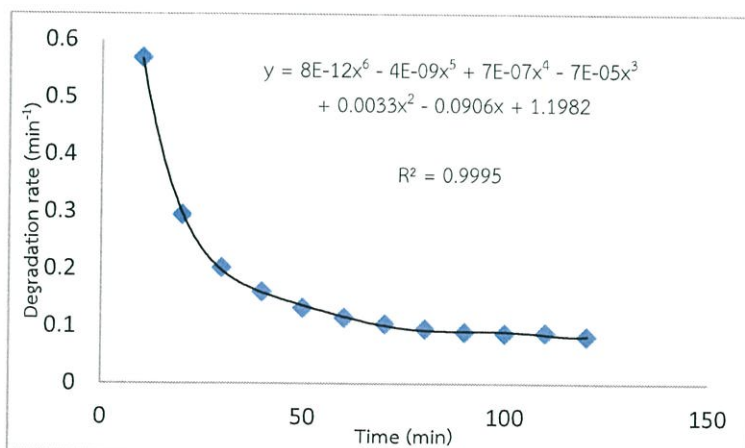
4.1.4 อัตราการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายในระยะเวลา 120 นาที



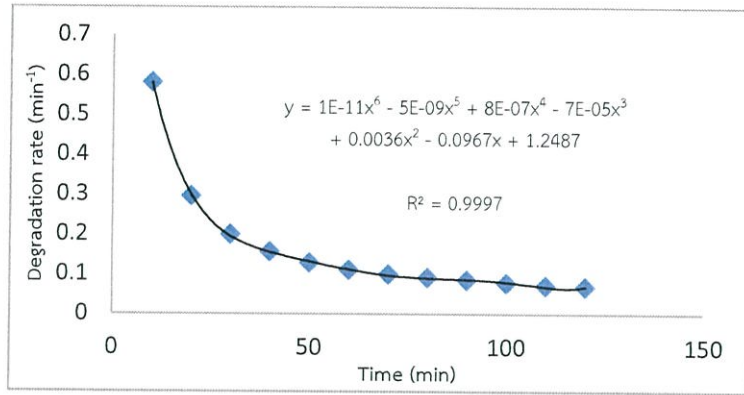
รูปที่ 4.13 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB =2.0 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 120 min.)



รูปที่ 4.14 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB =2.0 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 120 min.)



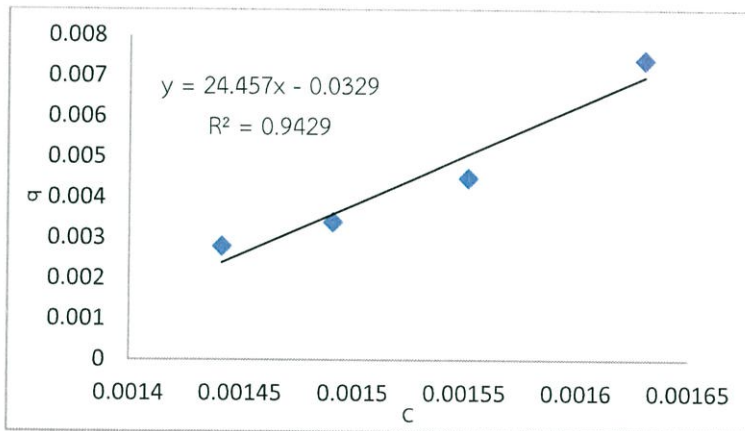
รูปที่ 4.15 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB =2.0 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 120 min.)



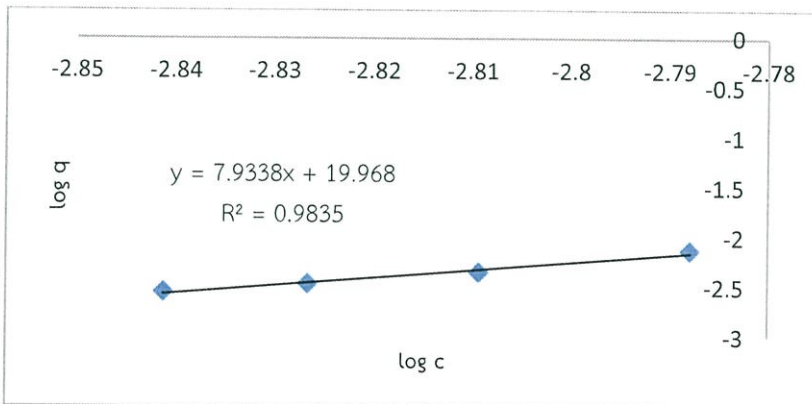
รูปที่ 4.16 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB =2.0 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 120 min.)

4.1.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

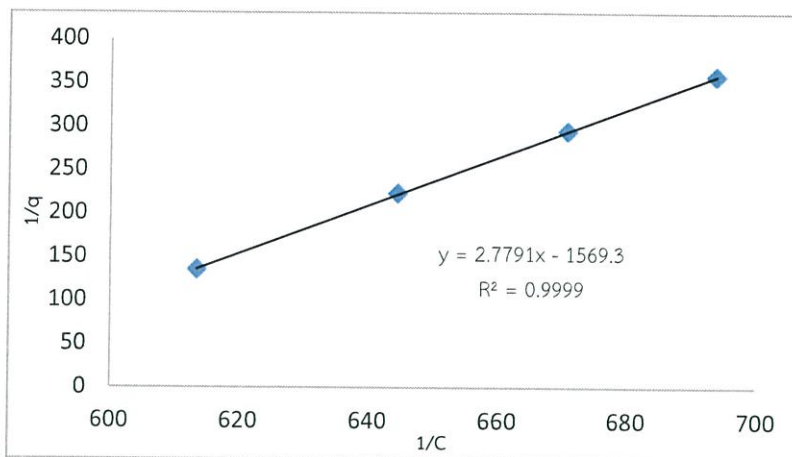
วิเคราะห์สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตรที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0.05, 0.01, 0.15 และ 0.2 กรัมเป็นตัวดูดซับ ณ เวลา 20 นาที



รูปที่ 4.17 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)



รูปที่ 4.18 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)

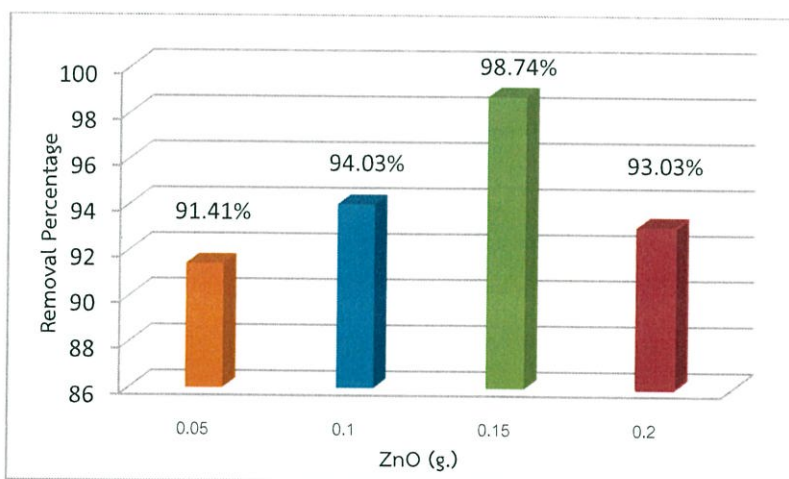


รูปที่ 4.19 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (MB = 2.0 mg, ZnO = 0.05, 0.10, 0.15 and 0.20 g. , At time 120 min.)

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์สำหรับตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ 0.05, 0.10 , 0.15 และ 0.20 กรัม ณ เวลาสัมผัส 20 นาที

พารามิเตอร์	เส้นตรง		ฟรอนดิช			แลงเมียร์	
	K	R ²	n	K	R ²	q _m	R ²
	0.0329	0.9429	0.126	1.3003	0.9835	0.000637	0.9999

4.1.6 วิเคราะห์การกำจัดสารละลายสี้อมเมธิลีนบลู 0.002 กรัมต่อลิตร โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ในการสลายสี้อม ภายในเวลา 120 นาที

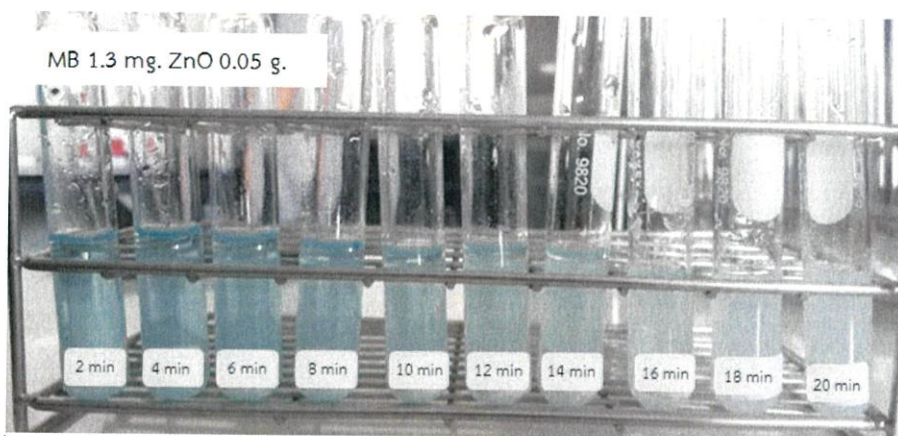


รูปที่ 4.20 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.002 g. , Time = 120 min.)

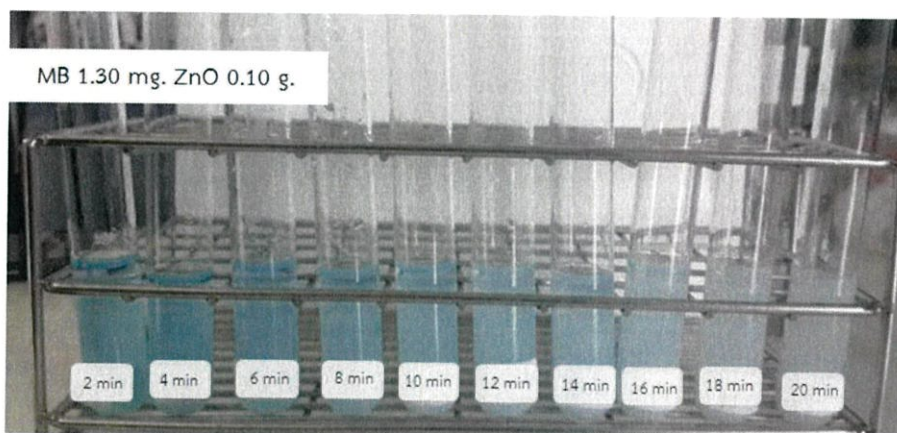
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) ของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู ภายในระยะเวลา 20 นาที

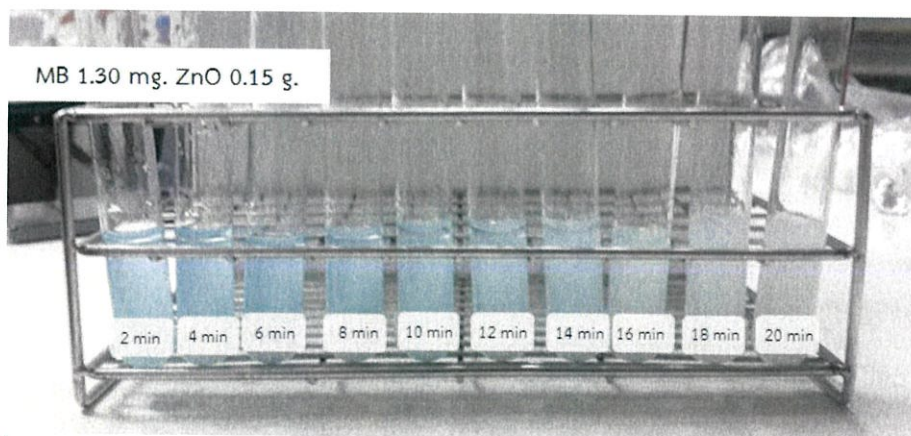
4.2.1.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร



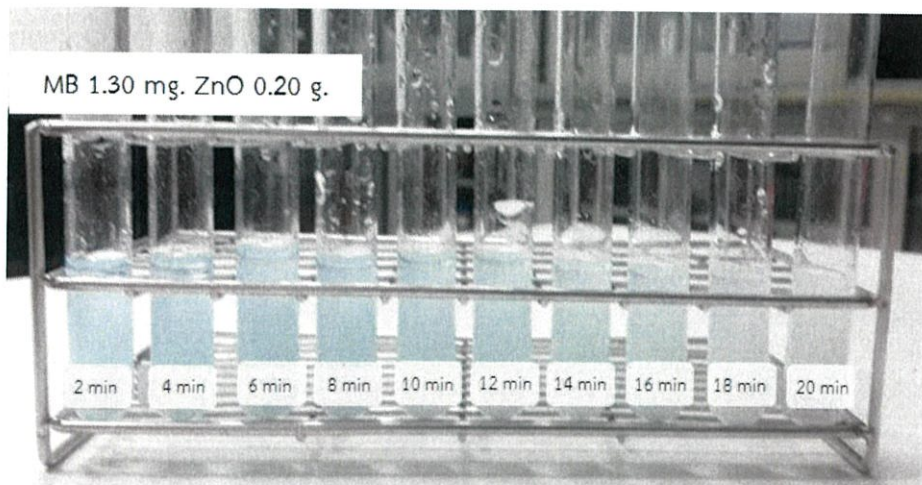
รูปที่ 4.21 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , เวลา 20 min.)



รูปที่ 4.22 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)

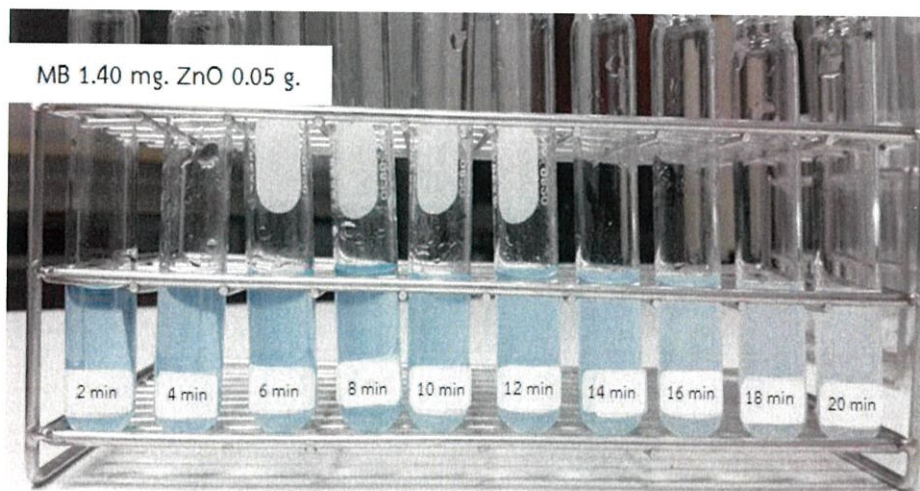


รูปที่ 4.23 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , เวลา 20 min.)

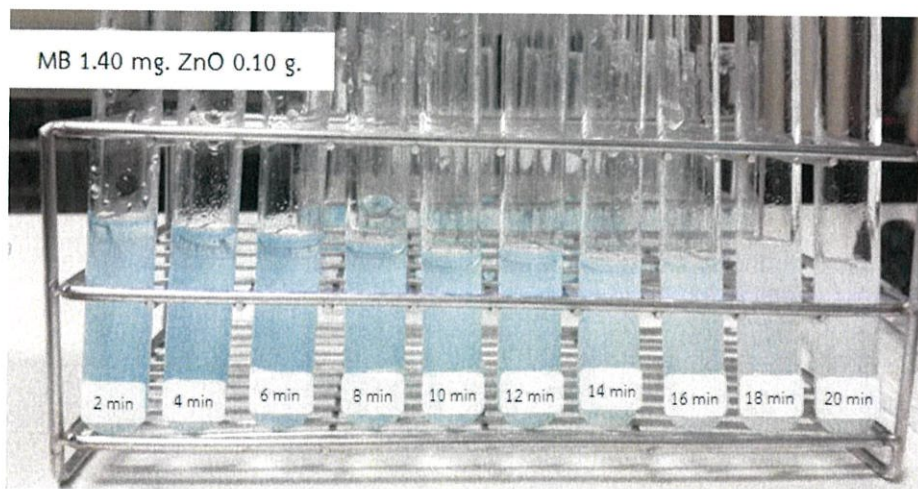


รูปที่ 4.24 การย่อยสลายสีของเมธิลีนบลู : (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , เวลา 20 min.)

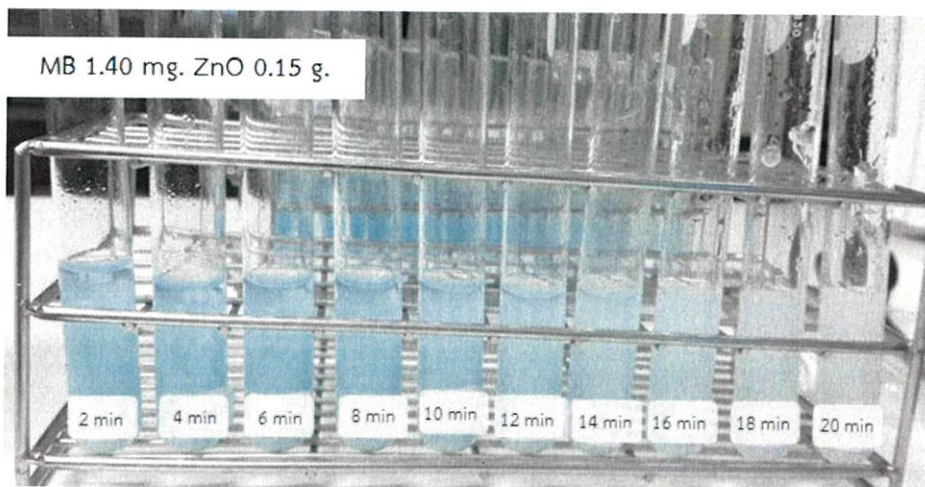
4.2.1.2 สารละลายสีของเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร



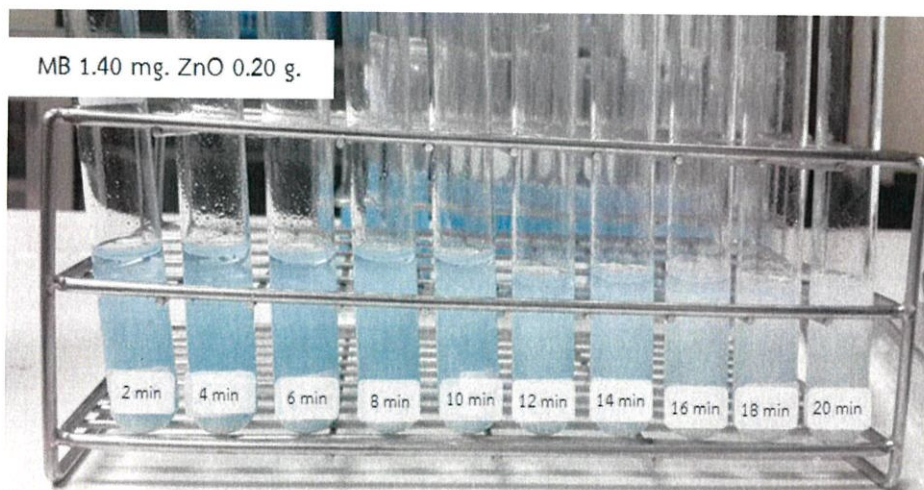
รูปที่ 4.25 การย่อยสลายสีของเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , เวลา 20 min.)



รูปที่ 4.26 การย่อยสลายสีของเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)

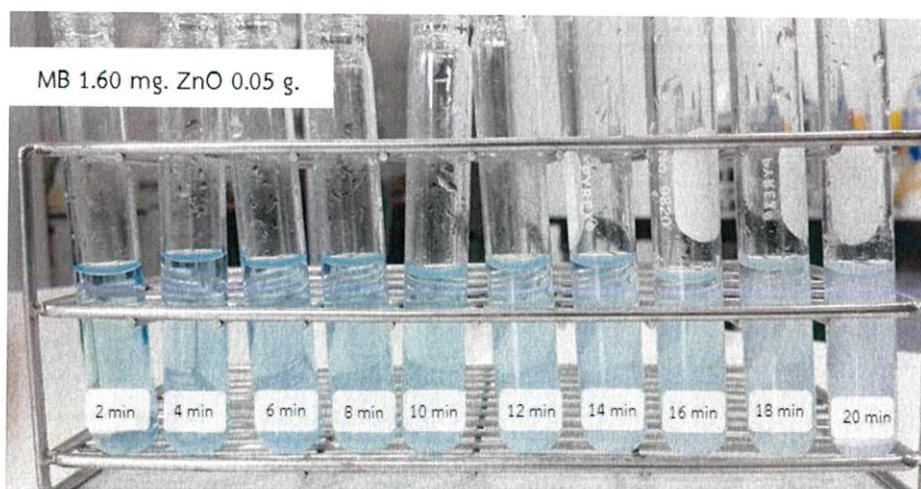


รูปที่ 4.27 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g , เวลา 20 min.)

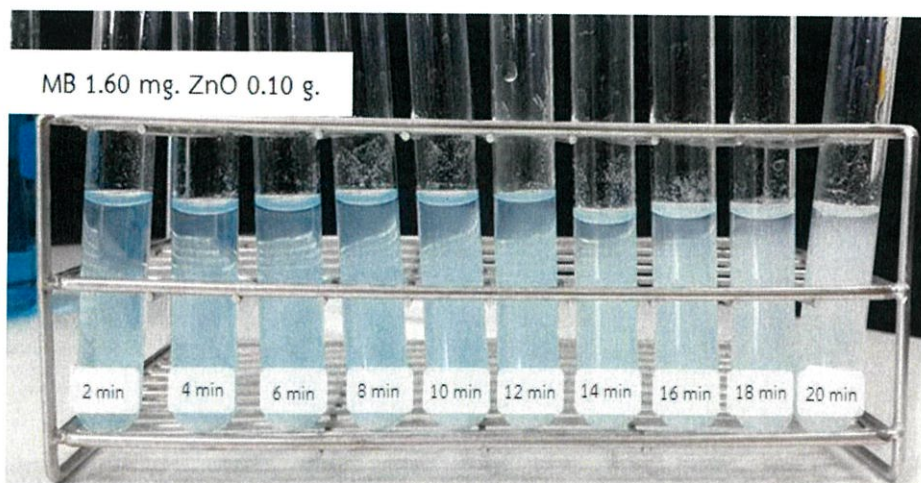


รูปที่ 4.28 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g , เวลา 20 min.)

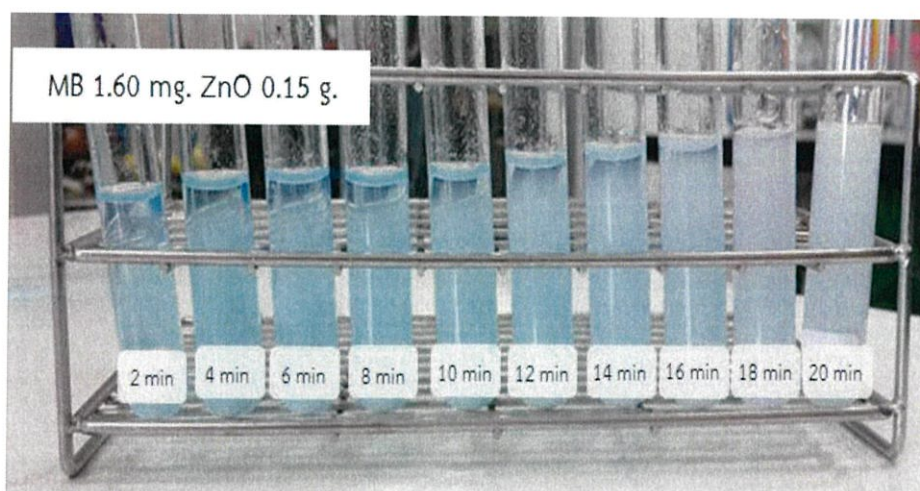
4.2.1.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร



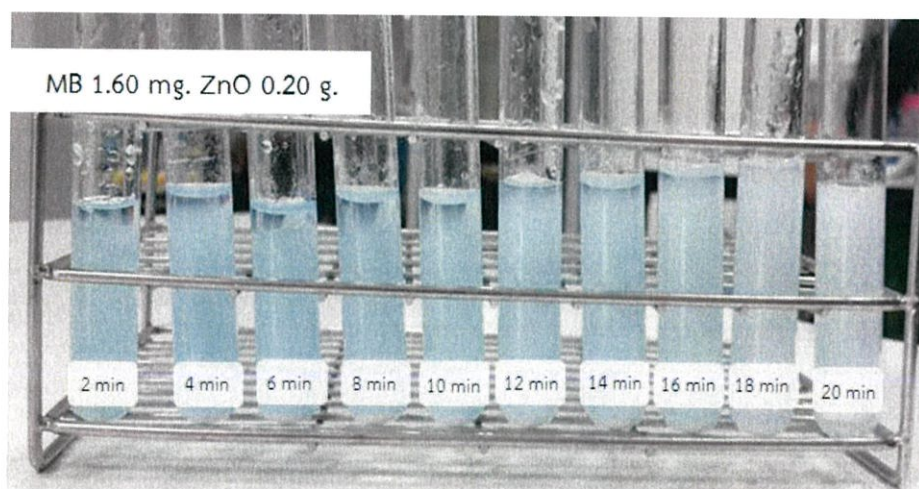
รูปที่ 4.29 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g , เวลา 20 min.)



รูปที่ 4.30 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , เวลา 20 min.)



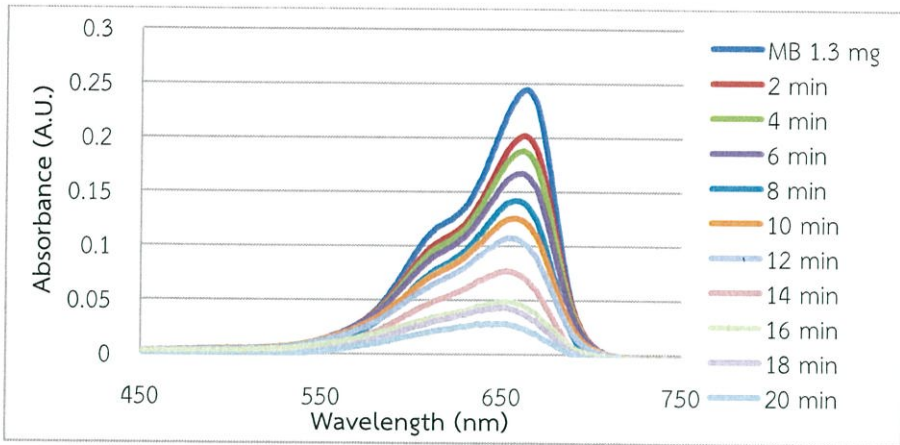
รูปที่ 4.31 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , เวลา 20 min.)



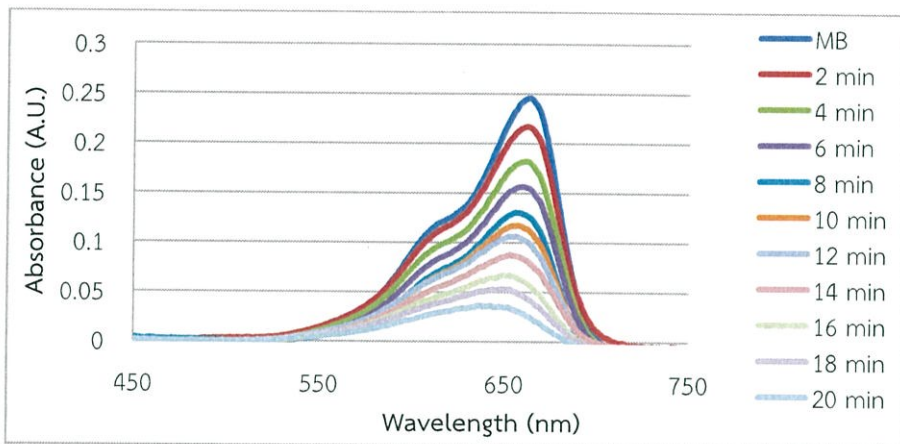
รูปที่ 4.32 การย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลู : (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , เวลา 20 min.)

4.2.2 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของสารละลาย สีย้อมเมธิลีนบลู ภายในระยะเวลา 20 นาที

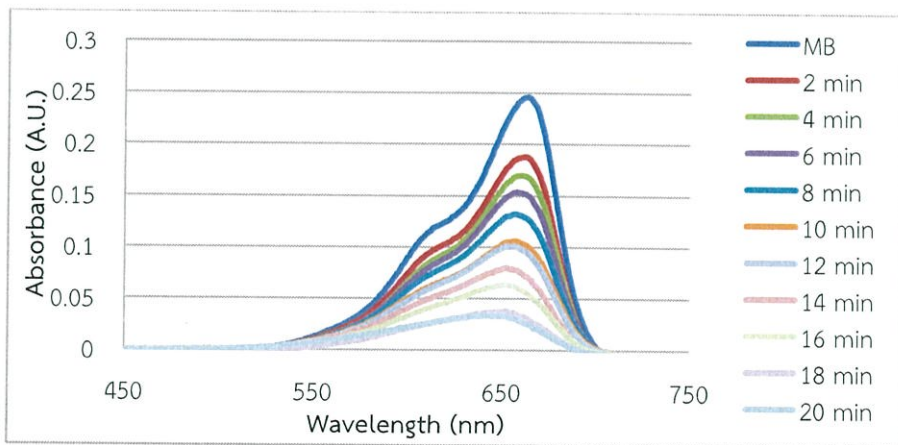
4.2.2.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร



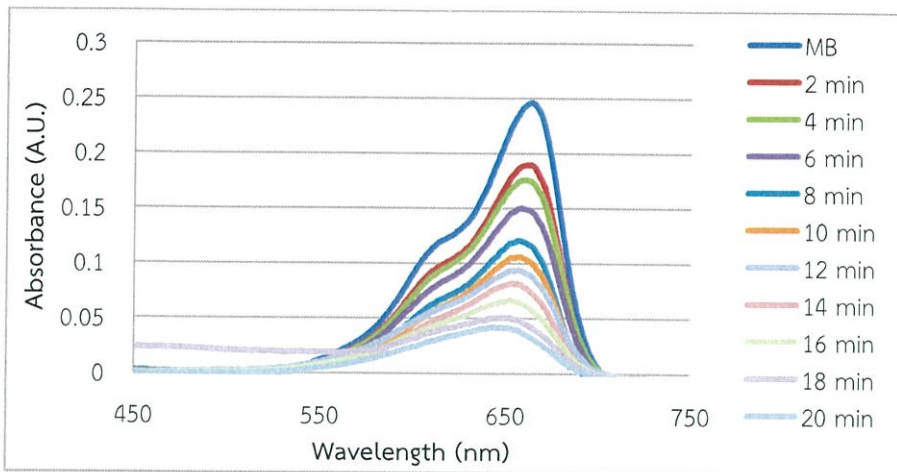
รูปที่ 4.33 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g , Time 20 min.)



รูปที่ 4.34 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g , Time 20 min.)

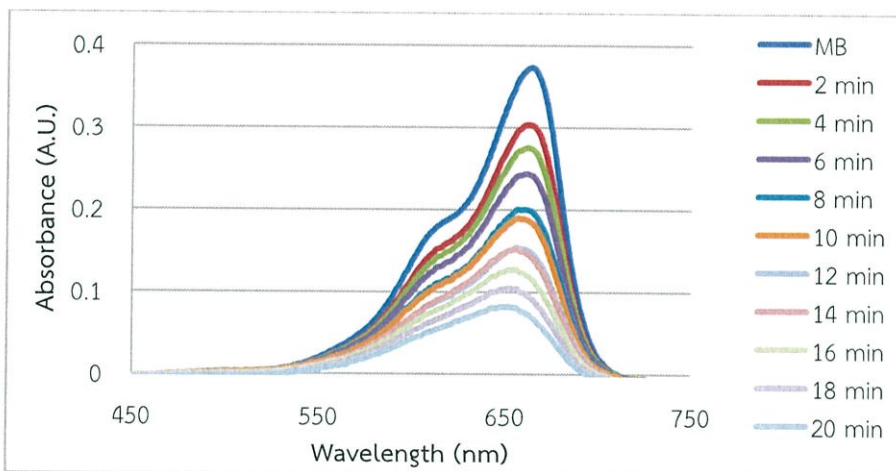


รูปที่ 4.35 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g , Time 20 min.)

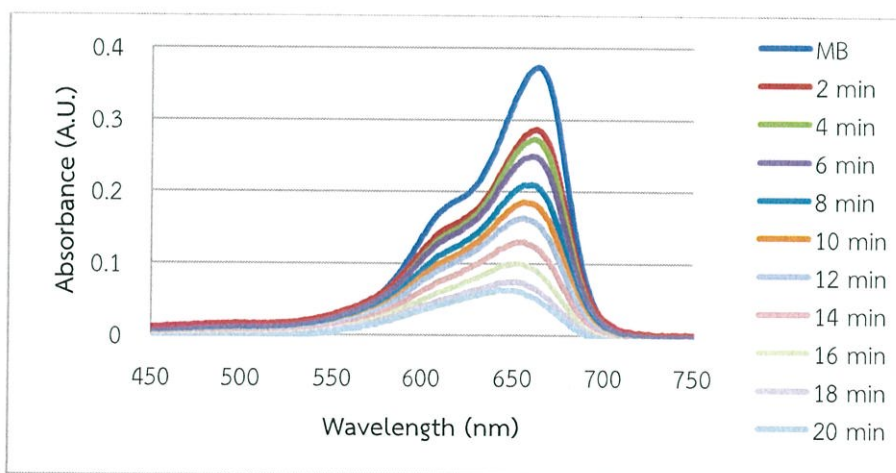


รูปที่ 4.36 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู(MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g., Time20 min.)

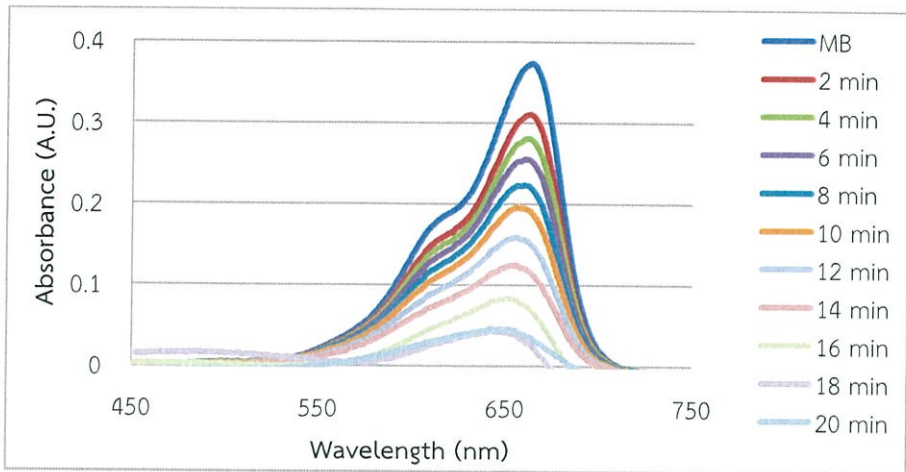
4.2.2.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร



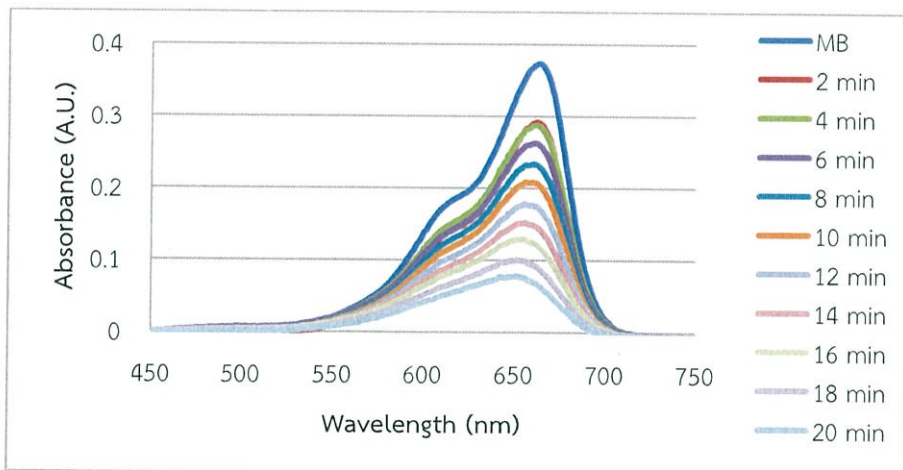
รูปที่ 4.37 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g., Time20 min.)



รูปที่ 4.38 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู(MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g., Time20 min.)

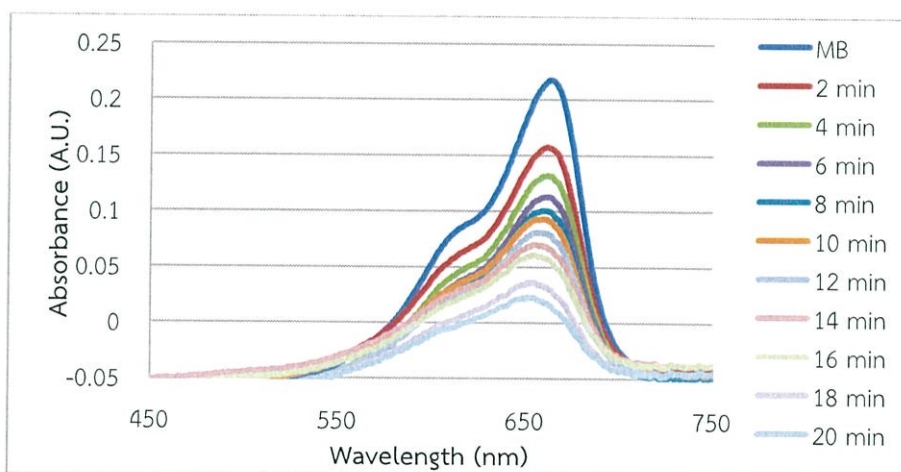


รูปที่ 4.39 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g., Time20 min.)

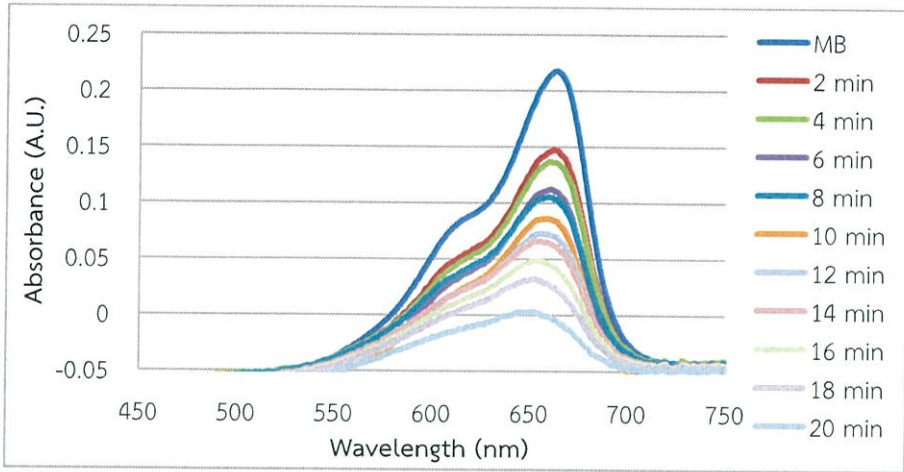


รูปที่ 4.40 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g., Time20 min.)

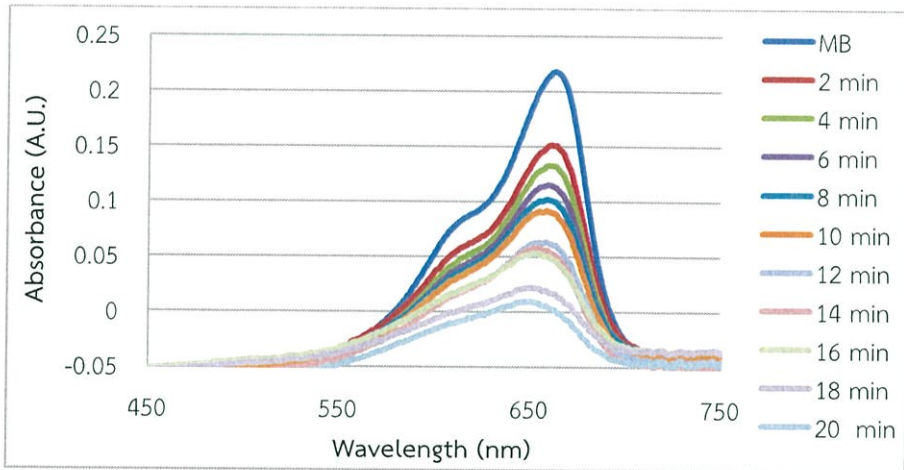
4.2.2.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร



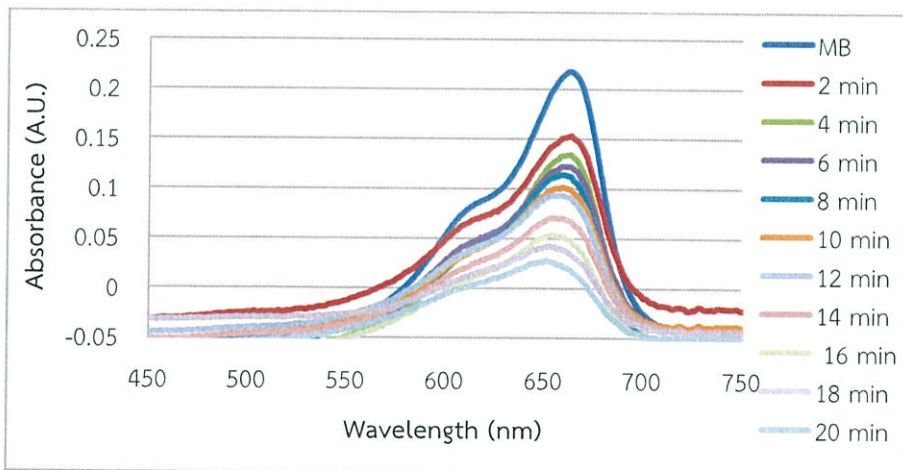
รูปที่ 4.41 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g., Time20 min.)



รูปที่ 4.42 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g., Time20 min.)



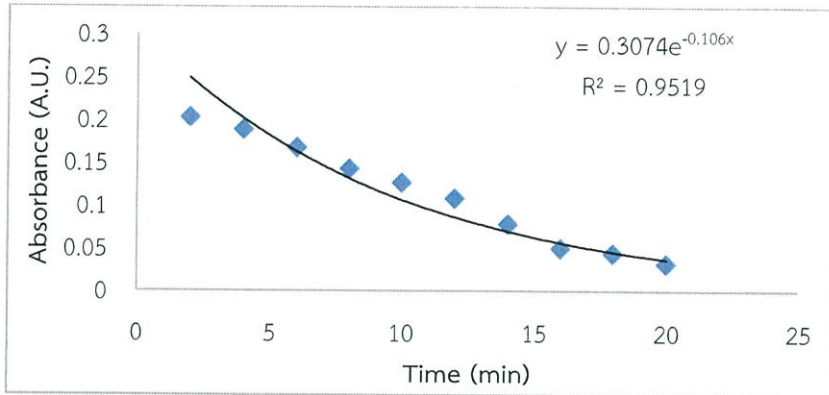
รูปที่ 4.43 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g., Time20 min.)



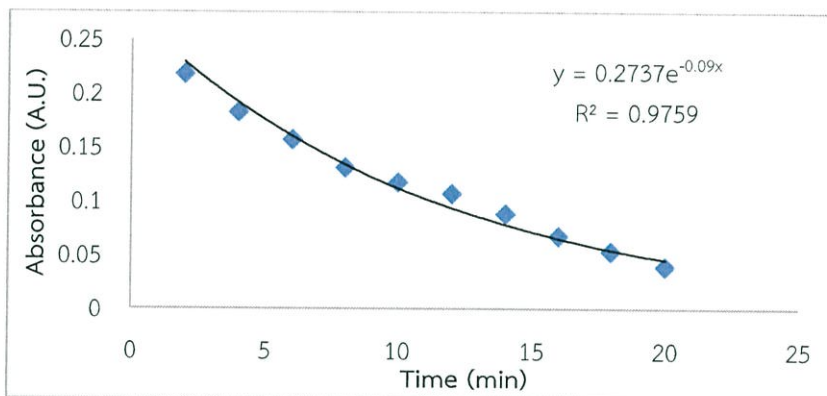
รูปที่ 4.44 การดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g., Time20 min.)

4.2.3 แนวโน้มการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายในระยะเวลา 20 นาที

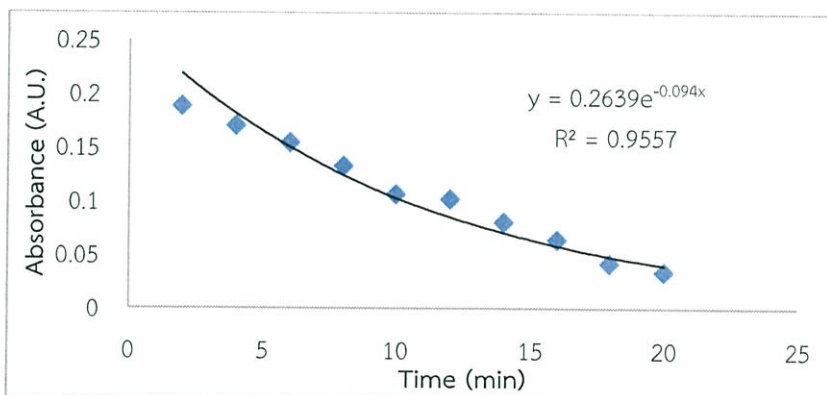
4.2.3.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร



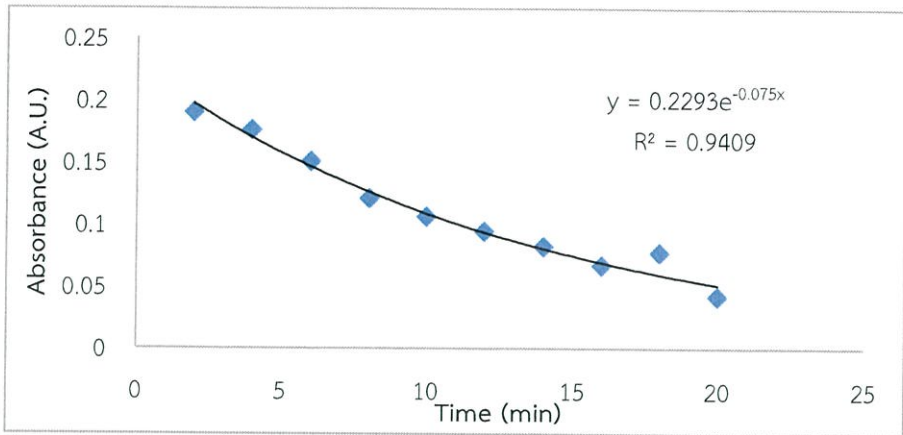
รูปที่ 4.45 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.46 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)

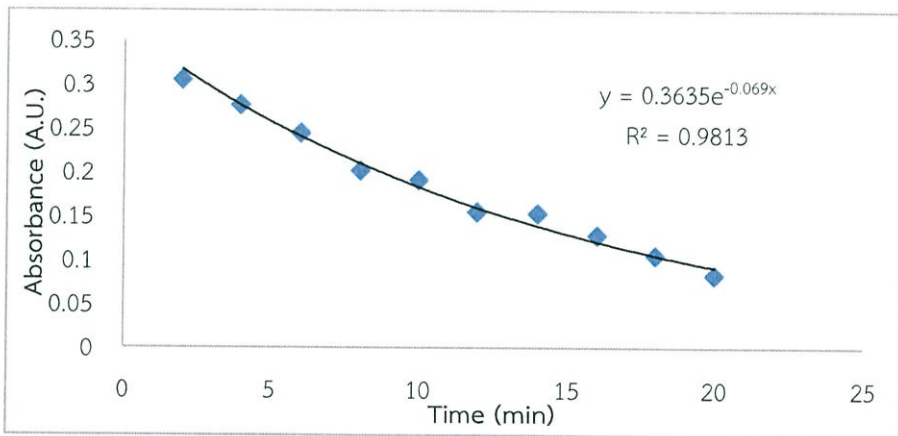


รูปที่ 4.47 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)

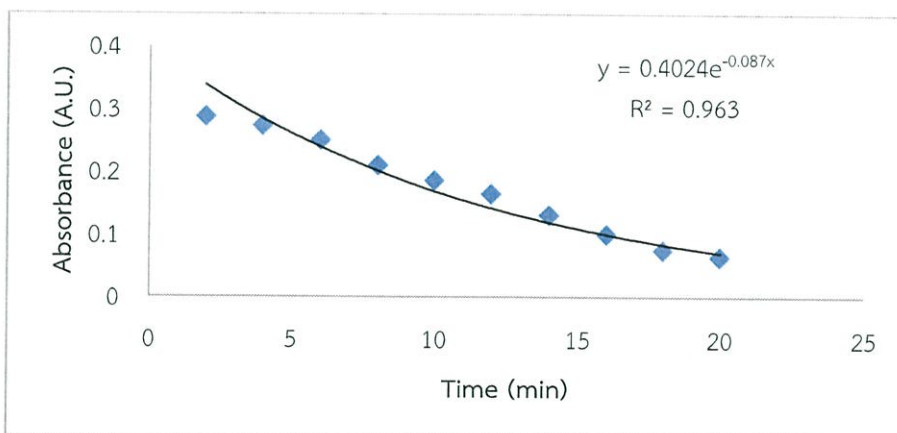


รูปที่ 4.48 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

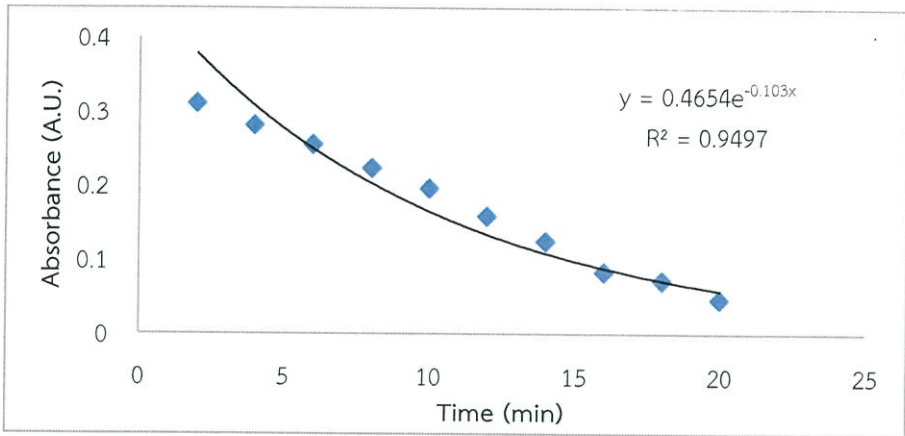
4.2.3.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร



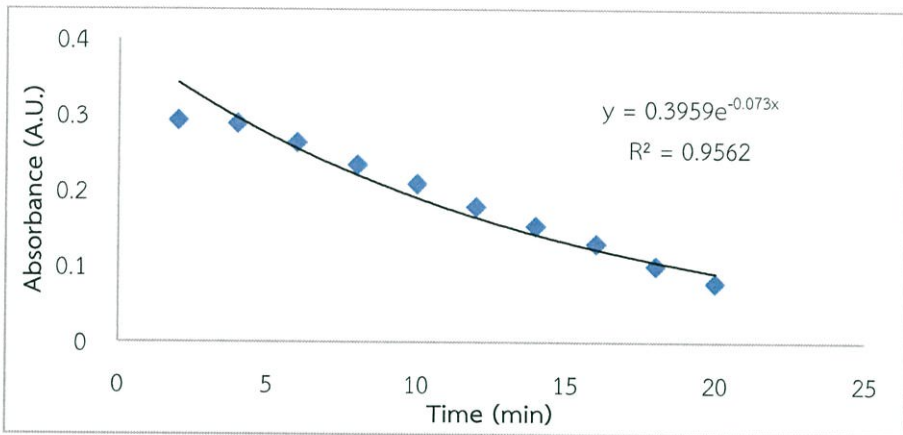
รูปที่ 4.49 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.50 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)

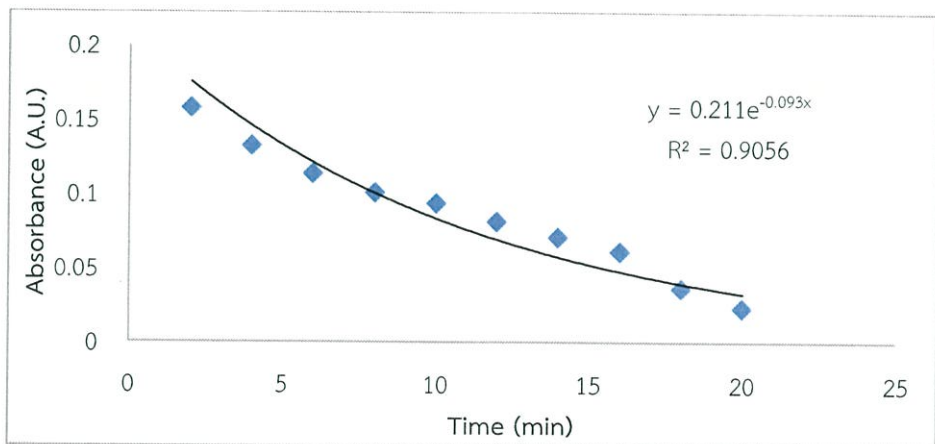


รูปที่ 4.51 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)

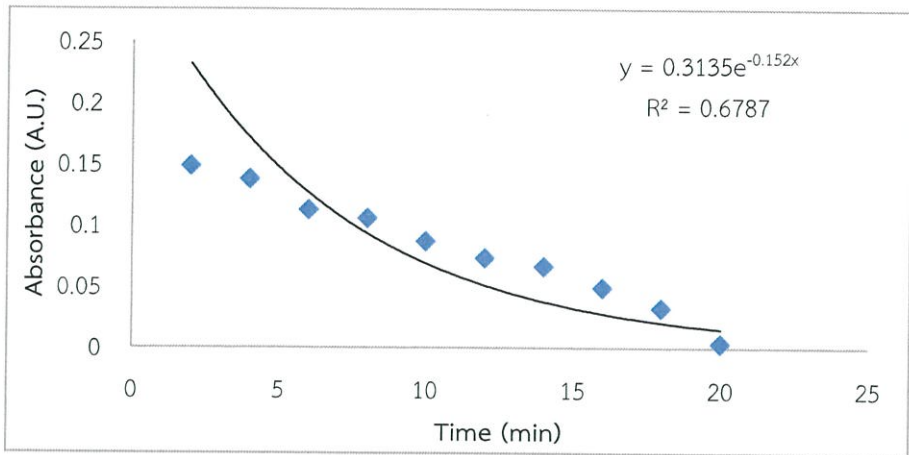


รูปที่ 4.52 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

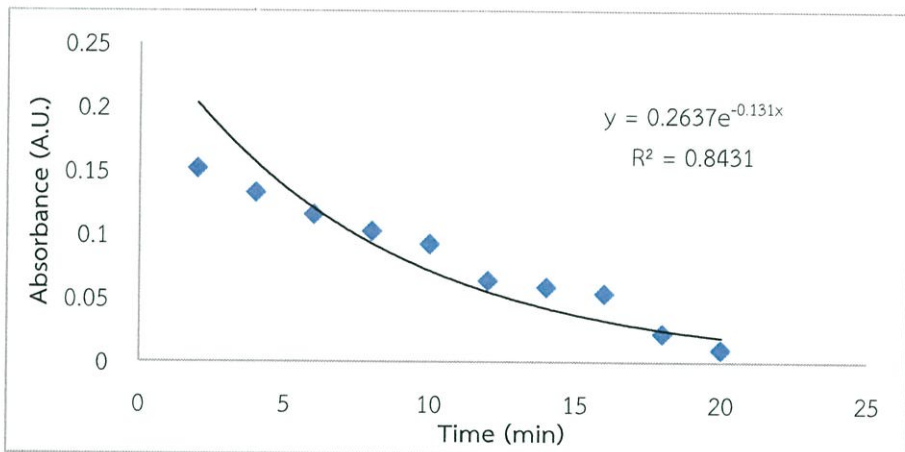
4.2.3.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร



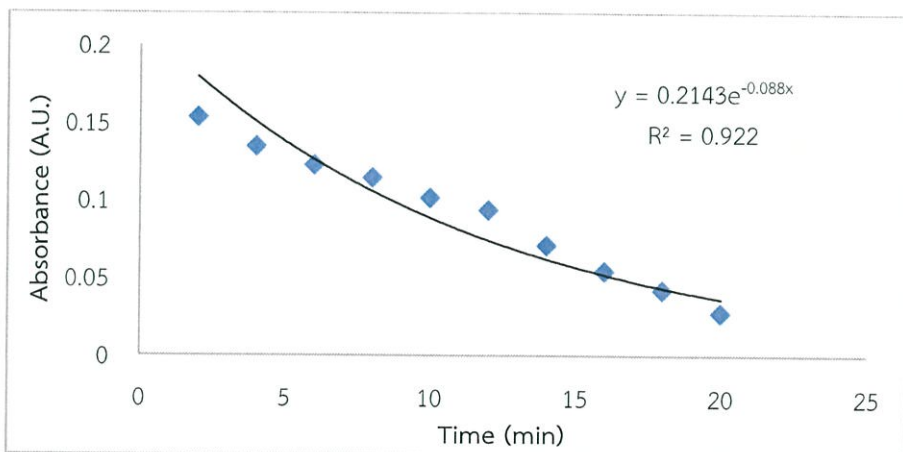
รูปที่ 4.53 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.54 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)



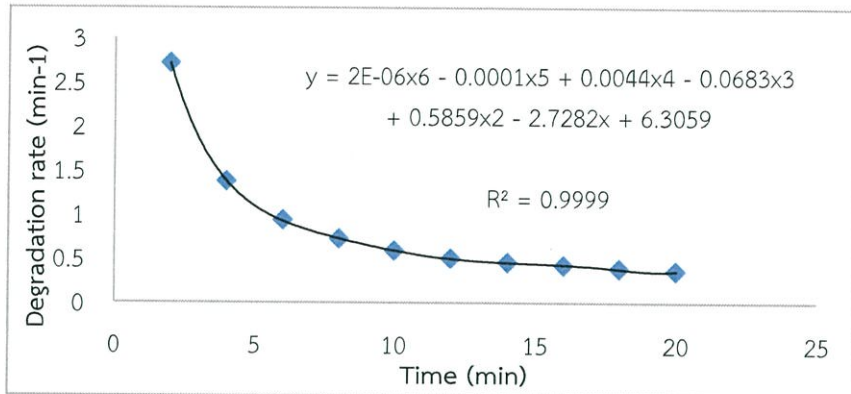
รูปที่ 4.55 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)



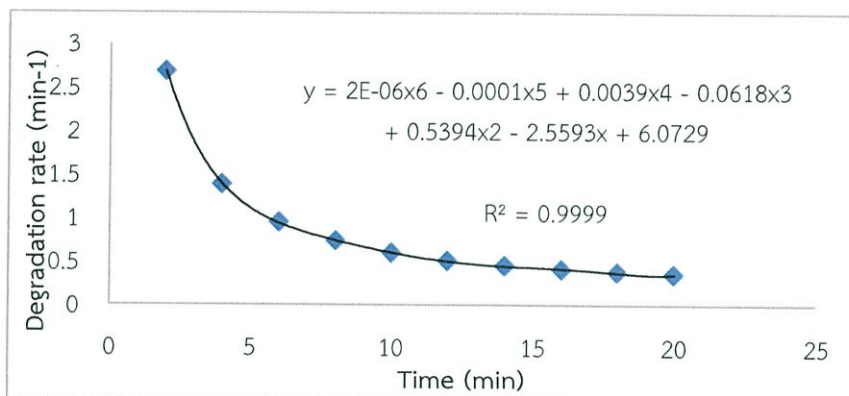
รูปที่ 4.56 แสดงแนวโน้มการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

4.2.4 อัตราการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายในระยะเวลา 120 นาที

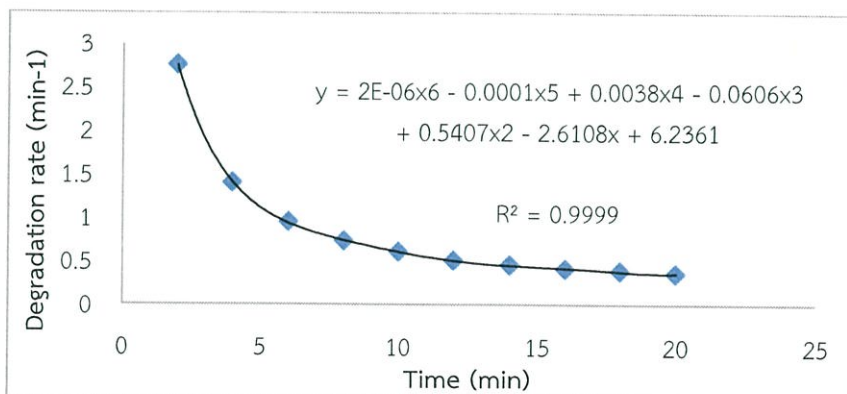
4.2.4.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร



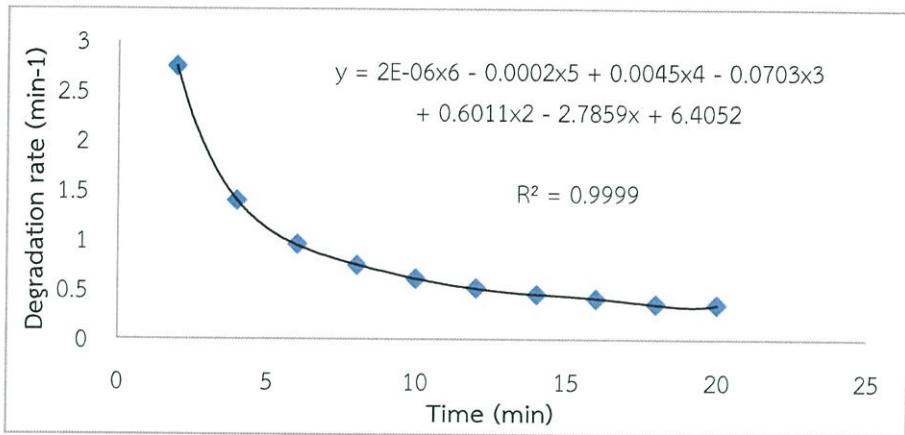
รูปที่ 4.57 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงUV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.58 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงUV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)

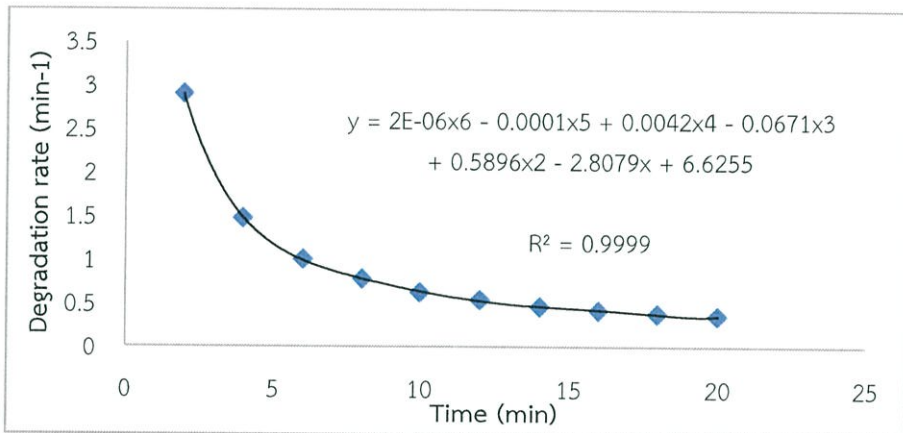


รูปที่ 4.59 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงUV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)

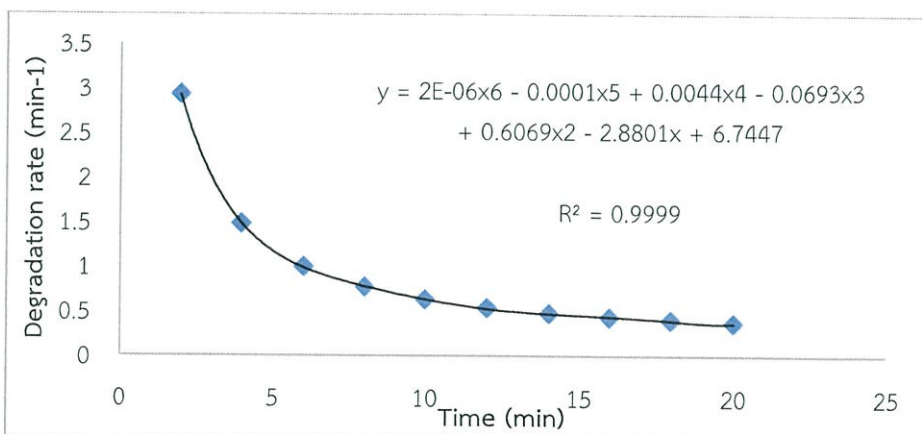


รูปที่ 4.60 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.3 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

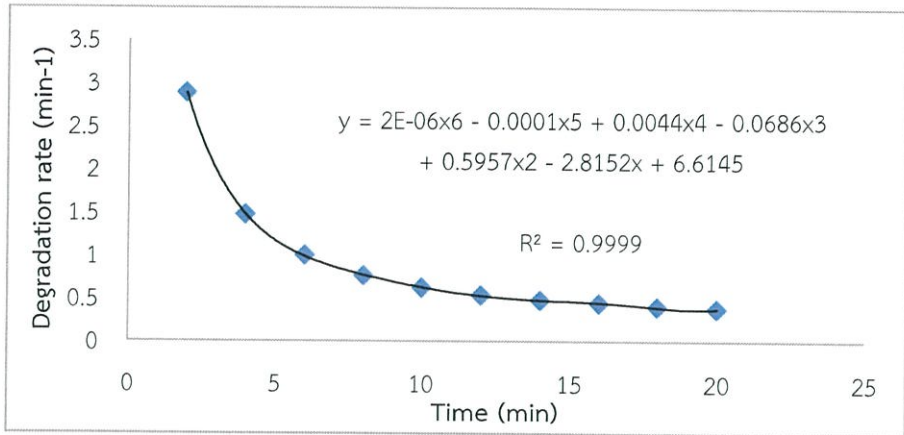
4.2.4.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร



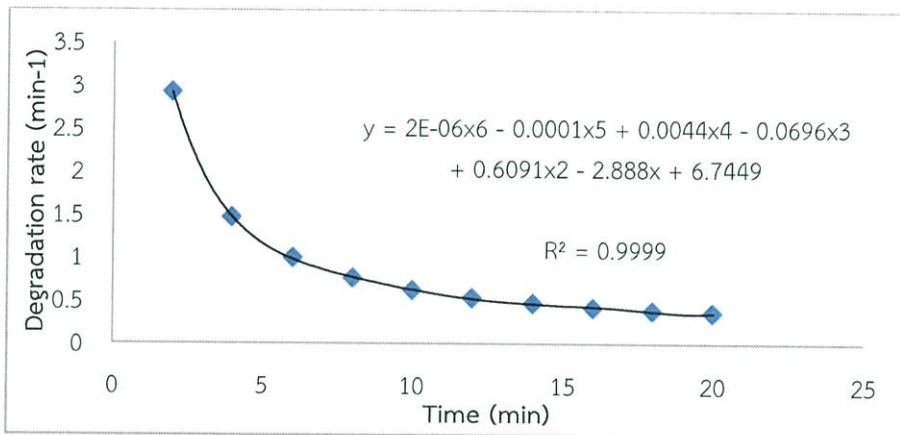
รูปที่ 4.61 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.62 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)

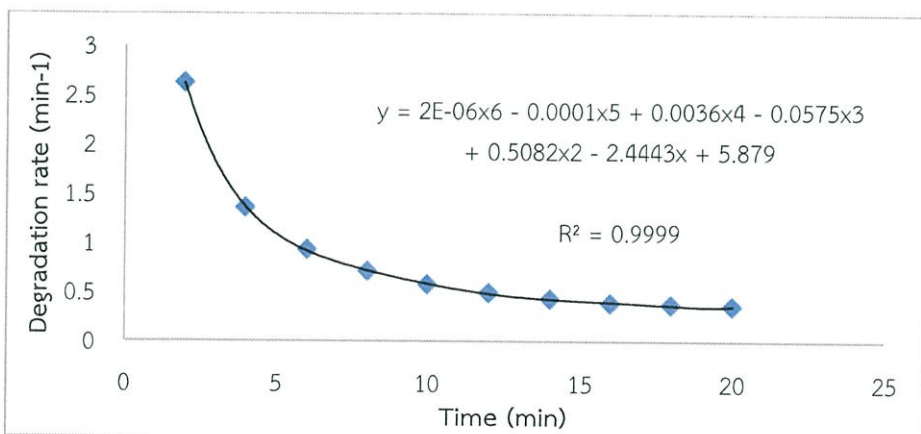


รูปที่ 4.63 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)

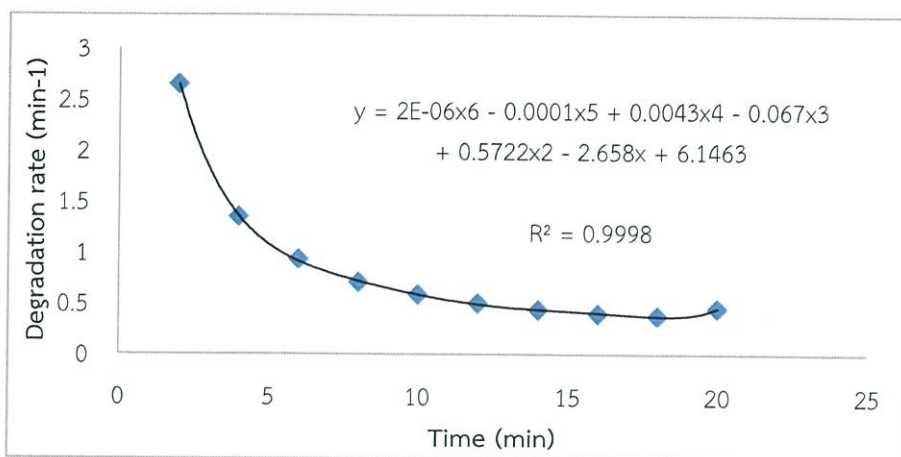


รูปที่ 4.64 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.4 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

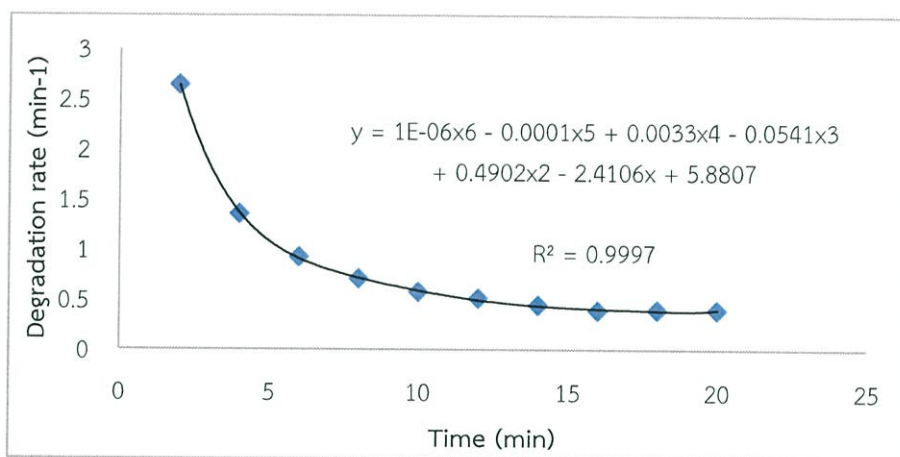
4.2.4.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร



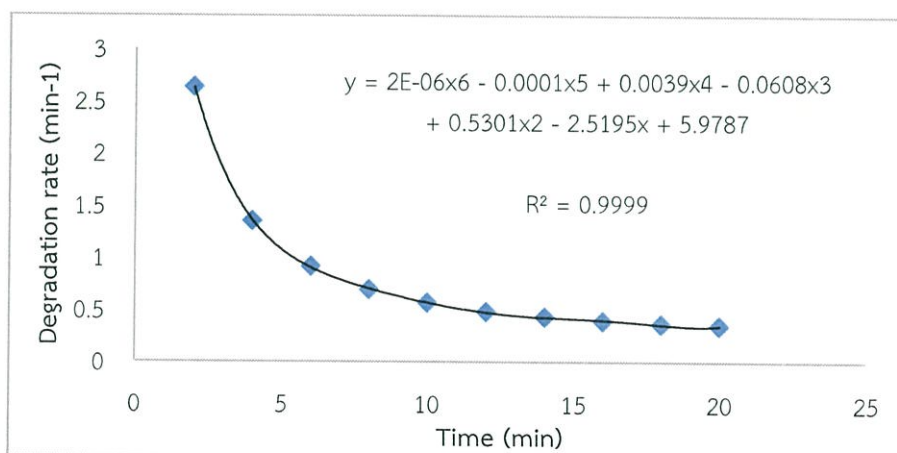
รูปที่ 4.65 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.05 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.66 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.10 g. , Time = 20 min.)



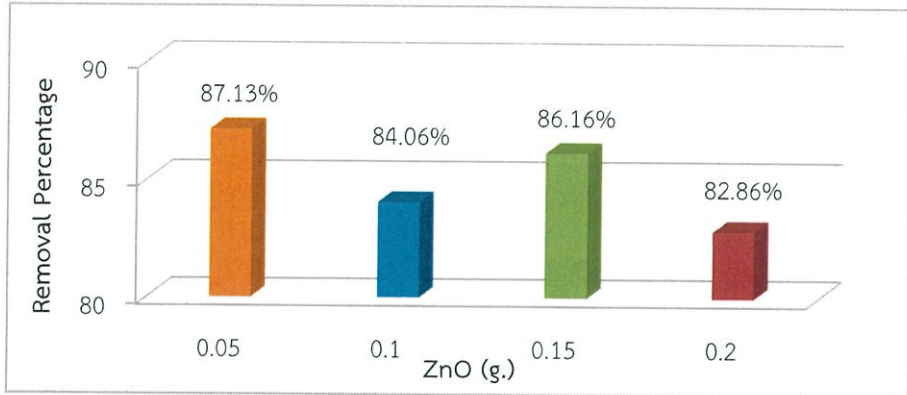
รูปที่ 4.67 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.15 g. , Time = 20 min.)



รูปที่ 4.68 แสดงอัตราการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสง UV (MB = 1.6 mg , ZnO = 0.20 g. , Time = 20 min.)

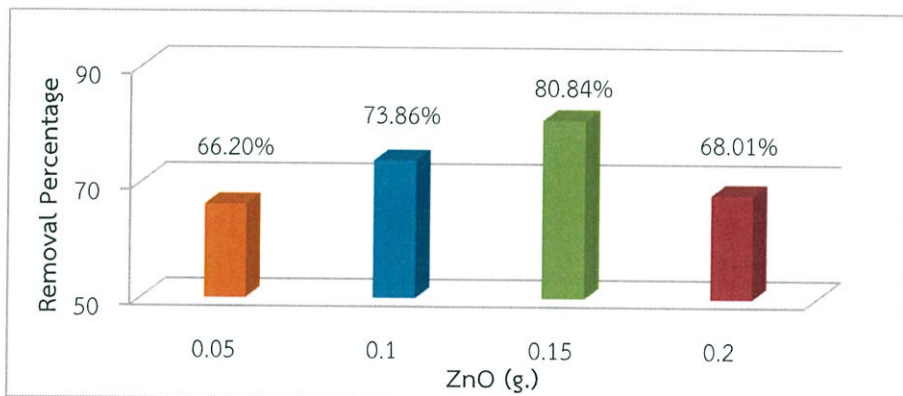
4.2.5 วิเคราะห์การกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 กรัม ในการสลายสีย้อม ภายในเวลา 20 นาที

4.2.5.1 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร



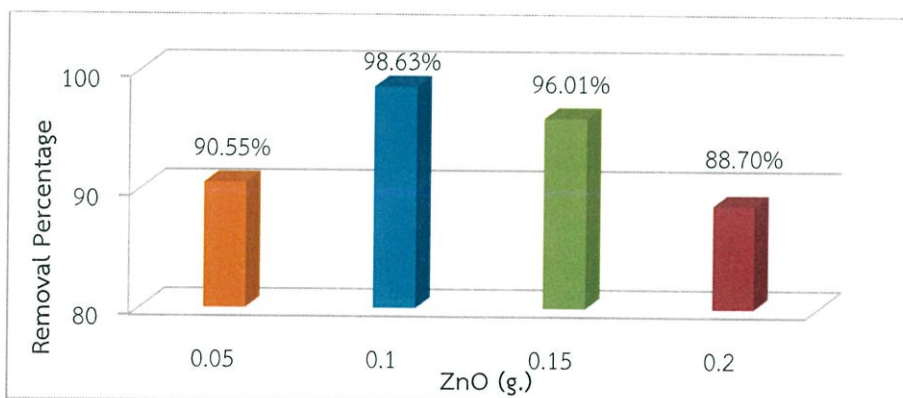
รูปที่ 4.69 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0013 g. , Time = 20 min.)

4.2.5.2 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.70 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0014 g. , Time = 20 min.)

4.2.5.3 สารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูมีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.71 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู (MB = 0.0016 g. , Time = 20 min.)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลจากการทดลองปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงของสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วยตาเปล่า จะพบว่าเมื่อมีการใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้สีของสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูสลายตัวโดยใช้เวลาที่ลดลง

ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงสุดเมื่อมีการเปิดรับแสง เมื่อระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้น อัตราการย่อยสลายก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยวัดได้จากค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมเมธิลีนบลูที่เหลืออยู่ ซึ่งทราบได้ เมื่อค่าการดูดกลืนแสงมีค่าสูง แสดงถึงการมีอยู่ของอนุภาคสีย้อมเมธิลีนบลูที่มาก

ตอนที่ 1

การทดลองในตอนที่ 1 ที่ใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.05 , 0.1 , 0.15 และ 0.2 กรัม ในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 120 นาที

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงผ่านเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อหาแนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบรูปแบบแนวโน้มในการย่อยสลายเป็นรูปแบบไฮเพอร์โบล่า ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.94 – 0.97 และวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบรูปแบบอัตราการย่อยสลายเป็นรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังหก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.99 มีค่าอัตราการย่อยสลายที่ไม่คงที่โดยมีรูปแบบที่แน่นอนกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.2 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 91.41% , 94.03% , 98.74 % และ 93.03% ตามลำดับ จะเห็นได้จากการทดลองว่า ในสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.002 กรัมต่อลิตร ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการย่อยสลายที่เหมาะสมคือ 0.15 กรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ดังแสดงตารางที่ 1 พบว่า ไอโซเทอมของแลงเมียร์มีลักษณะร่วมเสถียรมากที่สุดในการศึกษานี้ ($R^2 > 0.99$) ในขณะที่แบบจำลองฟรุนดลิชมีความเสถียรของลงมาจากข้อมูลการทดลอง ($R^2 > 0.98$) โดยสมการแลงเมียร์มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดของซิงค์ออกไซด์ที่ระยะเวลาสัมผัส 20 นาที

ตอนที่ 2

การทดลองในตอนที่ 2 ที่ใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.05 , 0.1 , 0.15 และ 0.2 กรัม ในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงผ่านเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อหาแนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบรูปแบบแนวโน้มในการย่อยสลายเป็นรูปแบบไฮเพอร์โบล่า ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.94 – 0.97 และวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบรูปแบบอัตราการย่อยสลายเป็นแบบโพลีโนเมียลกำลังหก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.99 มีค่าอัตราการย่อยสลายที่ไม่คงที่โดยมีรูปแบบที่แน่นอนกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.2 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 87.13% , 84.06% , 86.16 % และ 82.86% ตามลำดับ จะเห็นได้จากการทดลองว่า ในสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0013 กรัมต่อลิตร ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการย่อยสลายที่เหมาะสมคือ 0.05 กรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

การทดลองในตอนที่ 2 ที่ใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.05 , 0.1 , 0.15 และ 0.2 กรัม ในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงผ่านเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อหาแนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบรูปแบบแนวโน้มในการย่อยสลายเป็นรูปแบบไฮเพอร์โบล่า ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.94 – 0.98 และวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบรูปแบบอัตราการย่อยสลายเป็นแบบโพลีโนเมียลกำลังหก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.99 มีค่าอัตราการย่อยสลายที่ไม่คงที่โดยมีรูปแบบที่แน่นอนกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.2 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 66.20% , 73.86% , 80.84 % และ 68.01% ตามลำดับ จะเห็นได้จากการทดลองว่า ในสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0014 กรัมต่อลิตร ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการย่อยสลายที่เหมาะสมคือ 0.15 กรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

การทดลองในตอนที่ 2 ที่ใช้ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0.05 , 0.1 , 0.15 และ 0.2 กรัม ในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร

จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงผ่านเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อหาแนวโน้มการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต พบรูปแบบแนวโน้มในการย่อยสลายเป็นรูปแบบไฮเพอร์โบล่า ที่มีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.67 – 0.92 และวิเคราะห์อัตราการย่อยสลายของสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบรูปแบบอัตราการย่อยสลายเป็นรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังหก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.99 มีค่าอัตราการย่อยสลายที่ไม่คงที่โดยมีรูปแบบที่แน่นอนกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการกำจัดสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.2 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 90.55% , 98.63% , 96.01% และ 88.70% ตามลำดับ จะเห็นได้จากการทดลองว่า ในสารละลายสีย้อมเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.0016 กรัมต่อลิตร ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ในการย่อยสลายที่เหมาะสมคือ 0.10 กรัม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

ในตอนที่ 2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมธิลีนบลู โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.05 , 0.10 , 0.15 และ 0.20 กรัม ในการสลายสีย้อม ภายในเวลา 20 นาที พบว่า การสลายตัวไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้สามารถย่อยสลายสีย้อมเมธิลีนบลูเพิ่มขึ้น

สันนิษฐานว่าปัญหาอาจเกิดจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น

- ขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ทั้งด้านการย่อยสลาย และการดูดซับ
- ความคลาดเคลื่อนจากการชั่งสารสีย้อมเมธิลีนบลูที่ใช้ในการทดลอง เนื่องมาจาก เครื่องชั่งที่ใช้มีความละเอียดไม่มากพอสำหรับปริมาณสารที่ต้องการชั่ง

เอกสารอ้างอิง

- กรรพล แม่นวิวัฒน์กุล. จลนศาสตร์ของปฏิกิริยา. [online]. Available: <http://www.slideshare.net/adriamycin/ss-8398509>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2559
- คหาวุฒิ ภาชนะ. 2554. เคมีพื้นผิว. [online]. Available: <http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/kathawut/surface.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2559
- คณิตา ตั้งคณานุรักษ์และนิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2555. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิรวัดน์ รัตนรักษ์. 2557. การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการบดด้วยลูกบด และการเจือเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระตุ้นด้วยแสงย่านมองเห็น. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 53
- ช่อทิพย์ จันทภูมิและนรารัตน์ นาเชียงใต้. 2557. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมด้วยการลดขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 3 – 14.
- ปรารธนา. 2551. กระบวนการดูดซับ. [online]. Available: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2559
- มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ม.ป.ป. การดูดซับ. [online]. Available: http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0149/10CHAPTER_2.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2559
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2555. UV-Visible spectrophotometer. [online]. Available: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/spectroscopy-chem-analysis-instrument/item/140-uv-visible-spectrophotometer.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน 2559

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คำนวณหาปริมาณตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

$$C_s = \frac{(C_0 \times I_s)}{I_0}$$

C_s = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (กรัม)

C_0 = ปริมาณตัวถูกดูดซับเริ่มต้น (กรัม)

I_s = ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากสารละลาย (A.U.)

I_0 = ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากตัวถูกดูดซับ ณ จุดเริ่มต้น (A.U.)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$C_s = \frac{(C_0 \times I_s)}{I_0}$$

$$C_s = \frac{(0.002 \times 0.4361)}{0.5351}$$

$$C_s = 0.00163 \text{ g.}$$

คำนวณหาปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ

$$q = \frac{(C_0 - C_s)}{C_x}$$

q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ

C_0 = ปริมาณตัวถูกดูดซับเริ่มต้น (กรัม)

C_s = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (กรัม)

C_x = มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$q = \frac{(C_0 - C_s)}{C_x}$$

$$q = \frac{(0.002 - 0.00163)}{0.05}$$

$$q = 0.0074 \text{ g}$$

คำนวณหาอัตราการย่อยสลาย

$$K = \frac{-\ln\left(\frac{C_s}{C_0}\right)}{t}$$

K = อัตราการย่อยสลาย

C_0 = ปริมาณตัวถูกดูดซับเริ่มต้น (กรัม)

C_s = ปริมาณตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (กรัม)

t = เวลา (นาที)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$K = \frac{-\ln\left(\frac{C_s}{C_0}\right)}{t}$$

$$K = \frac{-\ln\left(\frac{0.00163}{0.002}\right)}{10}$$

$$K = 0.570502 \text{ min}^{-1}$$

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย

$$\%K = \frac{(C_0 - C_s) \times 100}{C_s}$$

C_0 = ปริมาณตัวถูกละลายเริ่มต้น (กรัม)

C_s = ปริมาณตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\%K = \frac{(C_0 - C_s) \times 100}{C_s}$$

$$\%K = \frac{(0.0013 - 0.000167) \times 100}{0.000167}$$

$$\%K = 87.13 \%$$