

การบำบัดเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

METHYLENE BLUE REMOVAL BY PHOTOCATALYTIC PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การบำบัดเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

METHYLENE BLUE REMOVAL BY PHOTOCATALYTIC PROCESS



T148945



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148945**
วันเดือนปี **18 S.K. 2560**

10877542

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การบำบัดเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

Methylene Blue Removal by Photocatalytic Process

ชื่อนักศึกษา

นางสาวศรณีย์พร ทองเงิน รหัสนักศึกษา 55051002

นางสาวอภิญา โพธิ์แก้ว รหัสนักศึกษา 55051034

นายอาสาฬห์ ต้นเทอดทิตย์ รหัสนักศึกษา 55051049

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ประธานกรรมการ	
อ.ปัทมา สีนางวงศ์ กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยา เชิงแสง		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศรัณย์พร	ทองเงิน	รหัสนักศึกษา 55051002
	นางสาวอภิญา	โพธิ์แก้ว	รหัสนักศึกษา 55051034
	นายอาสาฬห์	ต้นเทอดทิตย์	รหัสนักศึกษา 55051049
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต เคมีสิ่งแวดล้อม		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue; MB) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic) โดยใช้แผ่นคะตะลิสต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้แสงจากหลอดไฟชนิด UV_C ความเข้มแสง 179 ± 3 Lux เป็นพลังงานในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก ซึ่งจำลองสถานการณ์ในห้องทดสอบ โดยการเตรียมแผ่นคะตะลิสต์ใช้ ตัวแปรที่ศึกษากระบวนการโฟโตแคตะไลติกของ MB คือ ระยะเวลา, ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู, pH ที่เหมาะสม, จำนวนรอบในการใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ, ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง, ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู และชนิดของน้ำเสีย จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเมทิลีนบลู พบว่าใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ที่เหมาะสมผลิตจากการจุ่มแผ่นกระจกลงในของผสมระหว่าง TiO_2 30 mg, Polyethylene glycol (PEG400) 3 mL และ น้ำปราศจากไอออน 125 mL เคลือบบนแผ่นกระจกซ้ำ 3 รอบ และอบแห้ง ใช้เวลาสัมผัสนาน 12 ชั่วโมง สามารถบำบัดได้มากกว่า 85 % พบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวของสารละลาย MB เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เมื่อใช้หลอดไฟชนิด UV_C เมื่อสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 2 mg/L ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7 เมื่อนำแผ่นคะตะลิสต์ A มาใช้ซ้ำ พบว่าสามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง และทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของแหล่งกำเนิดแสง UV 2 ชนิด คือ หลอดไฟชนิด UV_C และแสงอาทิตย์ (UV_{sun}) พบว่าแม้แสงอาทิตย์มีความสามารถในการกระตุ้นปฏิกิริยาได้น้อยกว่าจากหลอดไฟอย่างมาก แต่ยังสามารถบำบัดได้ถึง 30.23 % และเมื่อเพิ่มความลึก โดยการเพิ่มปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลู ทำให้มีประสิทธิผลลดลง โครงการพิเศษนี้สามารถประยุกต์การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ด้วยแสง UV จากแสงอาทิตย์ สามารถบำบัดสีย้อมได้จริง

คำสำคัญ : กระบวนการโฟโตแคตะไลติก, ไทเทเนียมไดออกไซด์, การบำบัดสีย้อม, เมทิลีนบลู

Title	Methylene Blue Removal by Photocatalytic Process
Students	Miss Saranporn Thong-ngoen Student ID 55051002 Miss Apichaya Phokaeo Student ID 55051034 Mr Arsarn Tunterdtit Student ID 55051049
Degree	Bachelor of Science Environmental Chemistry
Department	Chemistry
Academic Year	2015
Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak

Abstract

This special project were studied about the removal of Methylene blue (MB) with photo catalytic process by using the coated titanium dioxide (TiO_2) sheet as a catalysts and UV_C light intensity 179 ± 3 Lux to stimulate of photo catalytic reaction. The variables were time, concentration of MB, pH, reusable cycles of catalysts, light source, volume of MB and waste water type. From these study, the optimum condition for removal of MB, a sheet of catalysts A were prepared from dipped glass sheet in the mixture of TiO_2 30 g, Polyethylene glycol (PEG400) 3 mL and Ultrapure water (DI) 125 mL. Dipping and drying for 3 times. More than 85% MB were removed after 12 hours UV_C irradiation, and the decomposition reaction is first order reaction. The optimum pH value is 6 – 7. The sheets of catalysts a repeated will be reusable 2 times. Comparing between UV from light source (UV_C) and UV from sun (UV_{Sun}), although the UV_{Sun} can activate the reactions less than UV_C , the MB removals were up to 30.23 %. When the depth of MB increased, the removal efficiency was decreased. Therefore, this concept can be applied to the dyes treatment in wastewater with UV_{Sun} .

Keywords : Photocatalytic process, Dyes removal, Titanium dioxide, Methylene blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนการจัดหาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และเป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษ คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ ในโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ และ อ.ปัทมา ลีหาวงศ์ อาจารย์คณะกรรมการ ตรวจสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ และความรู้ที่จะเป็นแนวทางในการทำโครงการพิเศษนี้ อีกทั้งอนุเคราะห์ตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี ตลอดจนในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องมือ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ และคอยให้การสนับสนุนตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอานนท์ จรรย์นเรศรัษฐ์ ที่ช่วยเหลือ และคอยให้คำปรึกษาตลอดทั้งโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง

นางสาวศรัณย์พร ทองเงิน

นางสาวอภิขญา โพธิ์แก้ว

นายอาสาฬห์ ต้นเทอดทิตย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อและสัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสีย	3
2.1.1 กระบวนการฟอกย้อม	3
2.1.2 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	4
2.2 สีย้อม	5
2.2.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม	5
2.2.2 การจำแนกสีย้อม	6
2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อม	9
2.3 เมทิลีนบลู (Methylene blue)	10
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)	11
2.4.1 ลักษณะเฉพาะของไทเทเนียม	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic process)	12
2.5.1 ชนิดของโฟโตแคตะไลติก	13
2.5.2 ชนิดของตัวคะตะลิสต์	14
2.5.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก	16
2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่อง	26
3.2 สารเคมี	27
3.3 วิธีการทดลอง	27
3.3.1 การเตรียมแผ่นคะตะลิสต์	27
3.3.2 ผลของระยะเวลาการสัมผัสแสง UV และปริมาณ TiO_2	28
3.3.3 ผลของความเข้มข้น MB ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	29
3.3.4 ผลของจำนวนรอบในการใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ	29
3.3.5 ผลของความเป็นกรด-เบส (pH) ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู	29
3.3.6 ผลของปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	30
3.3.7 ผลของแหล่งกำเนิดแสง UV ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	30
3.3.8 ผลการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ	31
3.3.9 แผนผังภาพรวมการทดลอง	32
3.3.10 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์	33
3.3.11 การวิเคราะห์ทางสถิติ	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลของระยะเวลาการสัมผัสแสง UV ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู	34
4.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เคลือบแผ่นคะตะลิสต์ที่เหมาะสม	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของอันดับปฏิกิริยาต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู	37
4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	40
4.5 ผลของจำนวนรอบที่ใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ	41
4.6 ผลของค่าพีเอช (pH) ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู	42
4.7 ผลของปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	43
4.8 ผลของแหล่งกำเนิดแสง UV ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	44
4.9 ผลการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	63
ภาคผนวก ค	74
ภาคผนวก ง	79
ภาคผนวก จ	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน	8
2.2 สมบัติของ Methylene blue	10
2.3 สมบัติของ TiO_2	12
2.4 ชนิดของรังสี UV และแหล่งกำเนิดที่ยาวคลื่นต่างๆ	20
ก-1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู	56
ก-2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมทางการค้า	59
ก-3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19	62
ข-1 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัด MB 2 mg/L ด้วยแผ่นคะตะลิสต์ A	63
ข-2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัด MB 2 mg/L ด้วยแผ่นคะตะลิสต์ B	64
ข-3 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัด MB 25 mg/L ด้วยแผ่นคะตะลิสต์ A	66
ข-4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการบำบัด MB 25 mg/L ด้วยแผ่นคะตะลิสต์ B	66
ข-5 ผลของอันดับปฏิกิริยาของ MB	68
ข-6 ผลของความเข้มข้นต่างๆ ของ MB ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	69
ข-7 ผลของการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ซ้ำรอบที่ 2 ต่อการบำบัด MB ความเข้มข้นต่างๆ	70
ข-8 ผลของการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ซ้ำรอบที่ 3 ต่อการบำบัด MB ความเข้มข้นต่างๆ	70
ข-9 ผลของ pH ต่างๆ ต่อการบำบัด MB	71
ข-10 ผลของปริมาณ MB 30 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	71
ข-11 ผลของปริมาณ MB 50 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	72
ข-12 ผลของปริมาณ MB 100 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	72
ข-13 การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ	73

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการพอกย้อมสีสิ่งทอ	3
2.2 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	13
2.3 ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (band gap energy) ของวัสดุกึ่งตัวนำ	15
2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก	17
2.6 กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของเมทิลีนบลู	19
2.7 การเปลี่ยนโครงสร้างขณะดูดซับ MB เป็น Sulfoxide	25
4.1 ผลการบำบัด MB เข้มข้น 2 mg/L ณ เวลาต่างๆ	35
4.2 ผลการบำบัด MB เข้มข้น 25 mg/L ณ เวลาต่างๆ	35
4.3 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A และ B	36
4.4 ผลของปฏิกิริยาอันดับต่างๆของ MB เข้มข้น 2 mg/L โดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A	38
4.5 ผลของปฏิกิริยาอันดับต่างๆของ MB เข้มข้น 25 mg/L โดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A	39
4.6 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ณ ความเข้มข้นต่างๆ	40
4.7 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ณ ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A	41
4.8 ผลการบำบัด MB ความเข้มข้น 25 mg/L ณ ค่า pH ต่างๆ	42
4.9 ผลการบำบัด MB ความเข้มข้น 2 mg/L และ 25 mg/L ณ ปริมาณต่างๆ	43
4.10 ผลการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสง UV _C & UV _{sun} ต่อการบำบัด MB ณ ความเข้มข้นต่างๆ	44
4.11 ผลการเปรียบเทียบชนิดของน้ำเสียต่างๆ ต่อการบำบัดสีย้อม	45
ก-1 กราฟสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายเมทิลีนบลู	52
ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 1	53
ก-3 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 2	53
ก-4 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 3	55
ก-5 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 4	55
ก-6 กราฟสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า	58
ก-7 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า ครั้งที่ 1	58
ก-8 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า ครั้งที่ 2	59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-9 กราฟมาตรฐานสารละลายรีแอกทีฟบลู 19	61
ค-1 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น GENESYS 10S UV – Vis	74
ค-2 Single-Beam spectrophotometer	76
ค-3 Double-Beam spectrophotometer	76
ค-4 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)	77
จ-1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นคะตะลิสต์	91
จ-2 ลักษณะของแผ่นคะตะลิสต์ที่ผ่านการเคลือบ TiO_2 ปริมาณต่างๆ	91
จ-3 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม	92
จ-4 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกด้วยปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสม	92
จ-5 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ pH ต่างๆ	93
จ-6 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ปริมาตรต่างๆ	93
จ-7 การจัดวางตำแหน่งจานเพาะเชื้อที่บรรจุ MB ในการฉายแสง UV_{Sun}	94
จ-8 น้ำเสียชนิดต่างๆ ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก	95

คำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อ

ความหมาย

$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
K	เคลวิน
cm^2	ตารางเซนติเมตร
cm	เซนติเมตร
mg	มิลลิกรัม
g	กรัม
mL	มิลลิลิตร
g/mol	กรัมต่อโมล
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/m^3	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/L	กรัมต่อลิตร
mmol/L	มิลลิโมลต่อลิตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mol/dm^3	โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
KJ/mol	กิโลจูลต่อโมล
V	โวลต์
E_a	พลังงานศักย์
$h\nu$	พลังงานแสง
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
h^+	โฮล
e^-	อิเล็กตรอน
e^-/h^+	คู่อิเล็กตรอน-โฮล
nm	นาโนเมตร
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
ppmv	หนึ่งในล้านส่วนปริมาตร
W	วัตต์
$\mu\text{W}/\text{cm}^3$	ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
W/m^2	วัตต์ต่อตารางเมตร

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ

ความหมาย

TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์
TiO ₂ -SiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์-ซิลิกา ไดออกไซด์
MB	สารละลายเมทิลีนบลู
แผ่นคะตะลิสต์ A	แผ่นคะตะลิสต์ที่เคลือบ TiO ₂ ปริมาณ 30 mg ต่อสารละลาย 150 mL
แผ่นคะตะลิสต์ B	แผ่นคะตะลิสต์ที่เคลือบ TiO ₂ ปริมาณ 70 mg ต่อสารละลาย 150 mL
VB	แอมวาเลนซ์
CB	แถบการนำไฟฟ้า
BG	ช่องว่างพลังงาน
E _a	พลังงานกระตุ้น
E _c	พลังงานของแถบการนำไฟฟ้า
E _v	พลังงานของแอมวาเลนซ์
UV _C	แสงยูวีจากหลอดไฟชนิด UVC
UV _{Sun}	แสงยูวีจากแสงอาทิตย์
pH _{pzc}	ค่าพีเอชของตัวดูดซับ (pH of point of zero charge)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ และการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมฟอกย้อม หรือวิถีชีวิตของชาวบ้านโดยเฉพาะ ชาวเหนือที่ยังมีการย้อมผ้าเพื่อใช้สอย และสร้างรายได้ หากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและชาวบ้านปล่อย น้ำทิ้งลงสู่แม่น้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปกติในน้ำเสียจากการย้อมจะมี สิ่งสกปรกเจือปนอยู่ ได้แก่ สีย้อม (Dye) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกย้อม สิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย เศษเส้นใย และสิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบ นิเวศโดยจะบดบังการส่องผ่านของแสงในน้ำที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และสารบางชนิด เมื่อสะสมในร่างกายจะก่อให้เกิดโรคต่างๆ ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติจึงมี ความจำเป็น และสำคัญอย่างยิ่ง

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับ การกระตุ้นด้วยแสง ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกจึงต้องอาศัยองค์ประกอบสองอย่างคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และพลังงานแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำมีระยะระหว่างแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) หรือแถบที่เรียกว่าช่องว่างพลังงาน (Band gap; BG) ค่อนข้างมาก แต่ใน โลหะทรานสิชัน (Transition metal) พบว่า VB และ CB อยู่ติดกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วย แสงไปที่ CB มีโอกาสกลับมายัง VB ได้ และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นจึงไม่ นิยมใช้โลหะทรานสิชันหรือโลหะตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก แต่ใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) หรือไทเทเนียม เนื่องจากมี ความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดี เสถียรภาพทางเคมีสูง ความเป็นพิษต่ำมาก และราคา ถูก (อติพล, 2557)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอน (Coagulation) การแลกเปลี่ยน ประจุ (Ion exchange) การดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon adsorption) และวิธีอื่นอีกมากมาย ซึ่งแต่ ละวิธีต่างมีข้อเสียคือ ไม่สามารถบำบัดให้หมดได้ภายในครั้งเดียว ยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายสูง น้ำเสียที่มีสี มีความยุ่งยากในการบำบัด แต่มีวิธีที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือ กระบวนการโฟโตแคตะไลติก เนื่องจาก กระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นกระบวนการทำลายสารโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวิธีนี้ง่าย สะดวก สามารถทำได้ที่ อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ ช่วยลดต้นทุนในการผลิตระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากประเทศ

ไทยมีพลังงานแสงอาทิตย์เพียงพอ (กาญจนา และนนุช, 2553) โครงการนี้จึงสนใจนำกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมาช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นคะตะลิสต์ในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู และสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่มีแผ่นคะตะลิสต์ และแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet; UV) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก
4. เพื่อศึกษาความเป็นกรด-เบส ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู
5. เพื่อเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสง UV ต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การหาปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นคะตะลิสต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู และน้ำเสียสีย้อมจากการซักล้างจริง
3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู โดยแปรค่าดังนี้
 - 1) ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู
 - 2) จำนวนรอบในการใช้ซ้ำของแผ่นคะตะลิสต์
 - 3) ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู
 - 4) แหล่งกำเนิดแสง UV
 - 5) ค่าพีเอช (pH)
4. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ เช่น น้ำเสียสังเคราะห์เมทิลีนบลู น้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู น้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลูที่ผ่านการบำบัดมาแล้ว และน้ำเสียสีย้อมจากการซักล้างจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุตัวกลางที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. นำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อม
3. มีความรู้ความเข้าใจในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก เพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลู หรือสารพิษอื่นๆที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

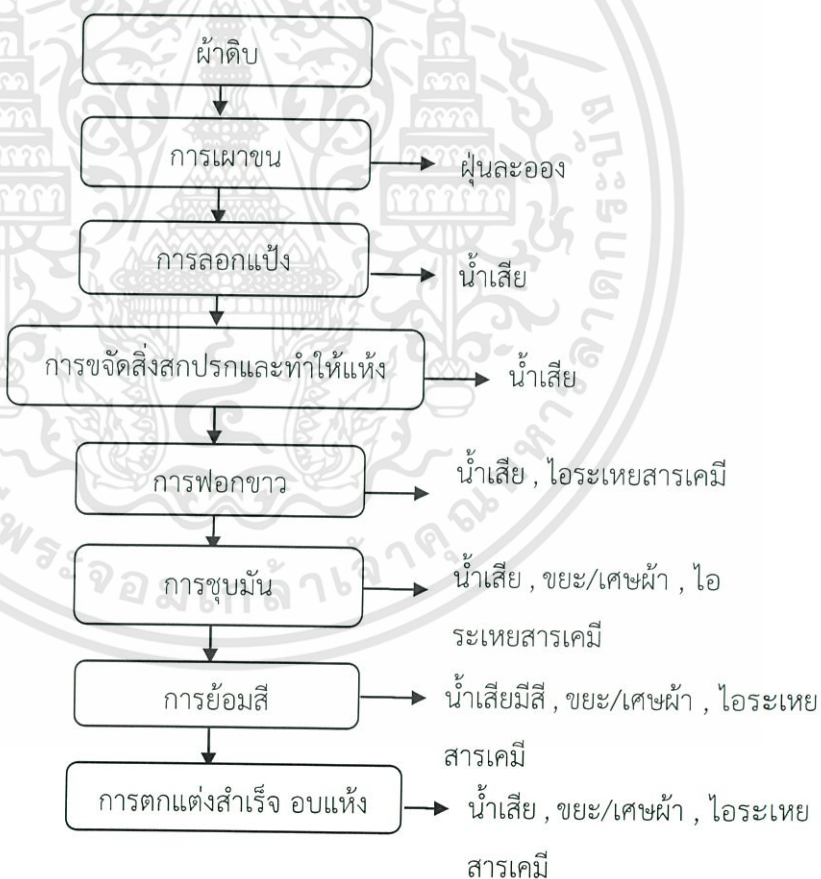
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย

2.1.1 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมสิ่งทอของไทยมีลักษณะครบวงจรครอบคลุมตั้งแต่อุตสาหกรรมเส้นใย อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมทอผ้าฝ้าย อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์แต่งสำเร็จ และ อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ซึ่งอุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ผ้าและตกแต่งสิ่งทอ จากฐานข้อมูลโรงงาน อุตสาหกรรมพบว่าโรงงานฟอกย้อม พิมพ์ผ้าและตกแต่งสิ่งทอส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาด กลางและเล็ก ซึ่งมีการใช้น้ำปริมาณมากโดยมีกรรมวิธีการผลิตการฟอกย้อมสีสิ่งทอ ดังรูปที่ 2.1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)



รูปที่ 2.1 กระบวนการฟอกย้อมสีสิ่งทอ
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

2.1.2 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสียน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สี และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชะล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราส่วนที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่สามารถพบได้ในน้ำเสีย ได้แก่ เศษเส้นใย เศษผ้า สารเคมี กรดต่าง ไขมัน สบู่ สีย้อม และตัวทำละลาย จึงทำให้มลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูง และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

การเกิด และการระบายน้ำเสียจะเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ปล่อยน้ำเสียลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน หลังจากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานก่อนระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกัน คือ

1. น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

ก. น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณไม่มาก แต่จะมีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมอยู่ค่อนข้างสูง

ข. น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

2. น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อม มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลง และกลั่นตัวในท่อน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียที่สกปรกที่สุด

3. น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

ในกระบวนการฟอกย้อมมีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาสั้นๆ ซึ่งจะทำให้ได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

4. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม และในบางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมาก เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

5. น้ำจากแหล่งอื่นๆ

นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น (ณัฐกร และคณะ, 2558)

2.2 สีย้อม

สีเป็นพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยในปัจจุบันสีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความคงทนสูง ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้นจึงไม่สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพที่ใช้ ทำให้น้ำที่ผ่านออกจากระบบบำบัดมีความเข้มข้นที่ยังสูงจึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีออกจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สีย้อม (Dye) คือ เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อดูดกลืนหรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานจะมีต่างกันไปขึ้นกับชนิดของสีย้อม และพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้นๆ การทำให้สีย้อมมีความคงทน และเพิ่มความสดใสของสีจึงมีการใช้สารโลหะหนักเข้ามาช่วย ได้แก่ แมงกานีส ทองแดง อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว โคบอลต์ พรอท และสังกะสี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก และก่อให้เกิดปัญหาจากความเป็นพิษของโลหะหนัก

2.2.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบ ได้แก่

1. หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group) องค์ประกอบของโมเลกุลส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อมโดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมจะเกิดการสั่น เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไปเป็นผลทำให้เกิดการเห็นสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนโครโมฟอร์ของสีย้อมมีอยู่ประมาณ 20 กลุ่มด้วยกัน ตัวอย่างของโครโมฟอร์ ได้แก่

- N = N กลุ่มเอโซ (Azo group)
- C = O หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group)
- NO₂ หมู่ไนโตร (Nitro group)

2. หมู่ออโซโครมของสีย้อม (Auxochrom group) ออโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาที่อิมตัวที่มีอิเล็กตรอน ซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ โครงสร้างมักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene aromatic) ที่มีหมู่อะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ออโซโครมมีคุณสมบัติการละลายน้ำ และก่อพันธะระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยโดยการยึดติดโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใยอาจเป็นพันธะโควาเลนต์ พันธะไอออนิก แรงวันเตอร์วาลส์ หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคเข้าไปในเส้นใย ตัวอย่างของออโซโครม ได้แก่

- COOH กลุ่มหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic group)
- OH กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group)
- NH₂ กลุ่มเอมีน (Amino group)

โครโมฟอร์ และอโซโครมจะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับโดยทั้ง 3 ส่วนนี้รวมกันเรียกว่า “โครโมเจน” การรวมกันของพันธะคู่สลับกับโครโมฟอร์ทำให้เกิดสีขึ้น แต่ความเข้ม และความสว่างของสีขึ้นอยู่กับอโซโครม

2.2.2 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกชนิดของสีย้อม (Dye classification) สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้างหรือจำแนกตามการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบดัชนีสี (Color Index) ที่แบ่งตามการใช้งาน (ณัฐกร และคณะ, 2555) ได้ดังต่อไปนี้

1. สีย้อมแอซิด (Acid dyes) สีย้อมชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Anionic dyes” โดยส่วนมากมีโครงสร้างเป็นเกลือไอออนิกของกรดอินทรีย์ ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุลบ กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นโปรตีนในน้ำย้อมที่มีความเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะไหม และอะคริลิกได้ดี ไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ
2. สีย้อมอะโซอิก (Azoic dyes) สีย้อมชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “แนปทอล” ซึ่งเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบ 2 ชนิด คือ (1) แนปทอล หรือ Coupling component และ (2) เกลือไดอะโซเนียม (Diazonium) ที่ต่างก็ละลายน้ำได้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นที่ไม่ละลายน้ำ
3. สีย้อมเบสิก (Basic dyes) สีย้อมชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Cationic dyes” เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้จะให้ประจุบวกเมื่อแตกตัวในน้ำลักษณะเด่นของสีย้อมกลุ่มนี้คือสีย้อมจะมีความสว่างสดใสและมีความเข้มสูง แต่มีความทนต่อแสงต่ำ สามารถละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์ แต่ละลายน้ำได้ยาก
4. สีย้อมไตรงต์ (Direct dyes) เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดทนเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสีจะไม่ทนต่อการซักล้างน้ำ ทำให้เกิดการตกสีได้ง่าย
5. สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dyes) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเทรต เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารตัวพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง ทนแสง และการซักฟอกได้ค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด สีดิสเพอร์สแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มสารเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome dyes) สีย้อมชนิดนี้เป็นสารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยอโม่ไม่ได้ดี

7. สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำ จะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกับพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ซึ่งสีรีแอกทีฟแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ เป็นสีที่สดใส ทุกสัติดทนในทุกสภาวะ

8. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ โดยปกติจะไม่ละลายน้ำแต่สามารถใช้สารรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำในสภาวะต่างได้

9. สีย้อมแว็ต (Vat dyes) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ในการย้อมต้องทำการรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปลิวโคที่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งเป็นรูปที่ยึดเกาะกับเส้นใยได้ จากนั้นทำการออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายน้ำกลับคืนมา

สีย้อมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 (สายรุ้ง, 2554)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (สายรุ้ง, 2554)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีดัดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แชนเส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0-5.0 - เส้นใยซึ่งสมมุติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 °C
สีย้อมรีแอกทีฟ	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีดัดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสคอส	- พันธะโควาเลนต์	- แชนเส้นใยในสารละลายกรด - เดิมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เดิมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใย
สีย้อมไตรเรกต์	- กระจุก - ละลายน้ำดี - สีดัดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แชนเส้นใยในสารละลายด่างอ่อน - เดิมอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 °C
สีย้อมเบสิก	- กระจุก - ละลายน้ำน้อย	- อะครีลิก	- พันธะไอออนิก	- แชนเส้นใยในสารละลายที่มีค่า pH 4.0-6.0 - เดิมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°C
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด	- กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีดัดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แชนเส้นใยในสารละลายที่มีค่า pH 5.0-7.0 - เส้นใยซึ่งสมมุติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพ และเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับสีย้อม	พันธะหรือ กลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อม ดิสเพอร์ส	- ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำ เป็นอนุภาค คอลลอยด์ - สีติดแน่น	- อะครีริก - โพลีเอส เทอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	- คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว เส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลาย เป็น pH 4.0-5.0 - เติมสีย้อมแล้ว เพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 °C
สีย้อมซัลเฟอร์	- เป็นคอลลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลาย ต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่ เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีย้อมแวต	- เป็นคอลลอยด์ หลังเกิด ปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมใน สารละลาย ต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่ กระจายสู่เส้นใยด้วย อิเล็กโตรไลต์
สีย้อมอะโซอิก	- เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยา กับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสกอส	- ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมใน สารละลาย ต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่ กระจายสู่เส้นใยด้วย อิเล็กโตรไลต์

2.2.3 ความเป็นพิษของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ทำให้สีย้อมมีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันมีสีย้อม และสารสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอประมาณ 10,000 ชนิดโดยสีย้อมที่มีโครงสร้างของหมู่อะโซถูกนำมาใช้ประมาณร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างน้อย 1 กลุ่ม เชื่อมอยู่กับโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกซึ่งสีย้อมรีแอกทีฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดเอโซ ได้แก่ สีย้อมในกลุ่มอะโซจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่ของไนโตรเจน (N = Unmetallised azo และ Metal-complex azo) โดยคิดเป็นร้อยละ 81 ของสีย้อมรีแอคทีฟทั้งหมด สีย้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางคือ

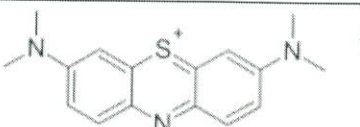
- (1) ทางการหายใจ โดยการสูดดมสีย้อมที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ
- (2) ทางผิวหนัง โดยการสัมผัสทางผิวหนัง
- (3) ทางการกิน โดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

เมื่อสีย้อมสัมผัสถูกผิวหนังหรือตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง และหากได้รับสีย้อมเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เนื่องจากสารประกอบบางตัวในสีย้อมมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง เมื่อเข้าสู่ร่างกายสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งที่กระเพาะปัสสาวะ ลำไส้ และตับได้ ดังนั้นประเทศไทยจึงได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3993 (พ.ศ. 2552) กำหนดห้ามใช้สีย้อมอะโซที่ก่อให้เกิดสารจำพวกอะโรมาติกเอมีนเกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สายรุ้ง, 2554)

2.3 เมทิลีนบลู

เมทิลีนบลู (Methylene blue; $C_{16}H_{18}N_3SCl$) เป็นสารเคมีที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Chemically inert) มีความเป็นพิษ และเสถียร (stable) ในสิ่งแวดล้อม เมทิลีนบลูไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable) พบมากที่สุดในอุตสาหกรรมน้ำเสีย เนื่องจากนิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรม ซึ่งยากที่จะสามารถแยกเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียเพราะละลายน้ำได้ดี ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ และมนุษย์โดยตรง

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเมทิลีนบลู (ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, 2547)

สมบัติของเมทิลีนบลู	
ชื่อ	Methylene blue
IUPAC	3,7-bis(Dimethylamine)-phenothiazin-5-ium chloride
Cas No.	61-73-4
สูตรโมเลกุล	$C_{16}H_{18}SCl$
น้ำหนักโมเลกุล	319.85 กรัม/โมล
จุดหลอมเหลว	100 ถึง 110 องศา
ความหนาแน่น	1.230 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ลักษณะโครงสร้างทางเคมี	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์

2.4.1 ลักษณะเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนสูง ไม่ไวไฟ มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าเช่น +4, +3 และ +2 แต่ที่พบโดยทั่วไปเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide; TiO_2) เป็นสารประกอบที่เป็นผงสีขาว มวลโมเลกุล 79.9 g/mol เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันได้ 3 รูปแบบ คือ บรูคไคต์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยโครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยวิธีกระตุ้นด้วยแสง คือ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และรูไทล์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) และที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบออกตะฮีดรอล (Octahedron) โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43 องศา การที่ TiO_2 มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีสมบัติที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy) ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐานสำหรับ TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์มีค่าเท่ากับ -889.5 กิโลจูลต่อโมล ค่าความหนาแน่นของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สมบัติที่ต่างกันทำให้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูง เพราะดัชนีการหักเหแสงสูง และการกระจายแสงของผลึกแบบรูไทล์มีผลกระทบในดักกลางจับสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาเทส ประมาณ 20% ค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคต์ แต่การแยกโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+ ได้ง่าย และมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจึงเป็นที่นิยมมากกว่าแบบอื่น TiO_2 มีลักษณะทางเคมีที่ดี ทำให้มีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากจึงปลอดภัย และใช้งานได้ง่าย (กาญจนา และนงนุช, 2553)

ตารางที่ 2.3 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (นวพันธ์, 2550)

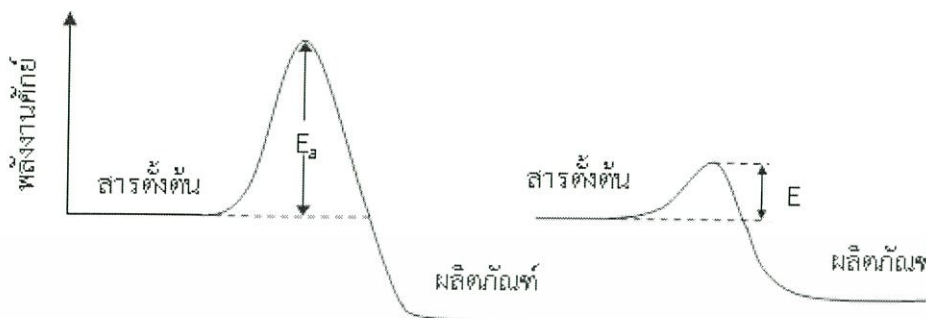
สมบัติ	อนาเทส	รูไทล์	บรูคไคต์	หน่วย
Gibbs Free Energy	-	-889.5	-	KJ/mol
ความหนาแน่น	3.894	4.25	4.123	g/cm ³
มุมระหว่างแกน Octahedron	78.12, 92.43	90, 81.21	-	องศา
Band Gap Energy	3.23	3.02	3.23	eV
การใช้งาน	การบำบัดน้ำเสีย, อากาศเสีย	อุตสาหกรรมสี, เครื่องสำอาง, อาหาร	พบในแร่เท่านั้น	
โครงสร้างผลึก	Tetragonal 	Tetragonal 	Orthorhombic 	

2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (กาญจนา และนงนุช, 2553)

กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวคะตะลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2.2) การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มี และไม่มีตัวคะตะลิสต์ รูปที่ 2.2 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีคะตะลิสต์ซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัวคะตะลิสต์ ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ดังรูปที่ 2.2 (ข) ตัวคะตะลิสต์นี้ช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือจะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap) ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสต้องมีองค์ประกอบ คือ

- 1) คะตะลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนต์ (Oxidants) อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. สารอินทรีย์ที่ไม่มีตัวคะตะลิสต์

ข. สารอินทรีย์ที่มีตัวคะตะลิสต์

รูปที่ 2.2 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์
(ที่มา : กาญจนา และนนุช, 2553)

2.5.1 ชนิดของโฟโตแคตะไลติก

โฟโตแคตะไลติกสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

1) โฟโตแคตะไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4 nitrobenzene โดยใช้ UV/H_2O_2

2) โฟโตแคตะไลติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่นย่อยสลาย 2-Chlorophenol เป็นของเหลว โดยใช้ UV/TiO_2 สถานะเป็นของแข็ง

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีแบนด์แกปประมาณ 3.2 โวลต์ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้จึงจำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง

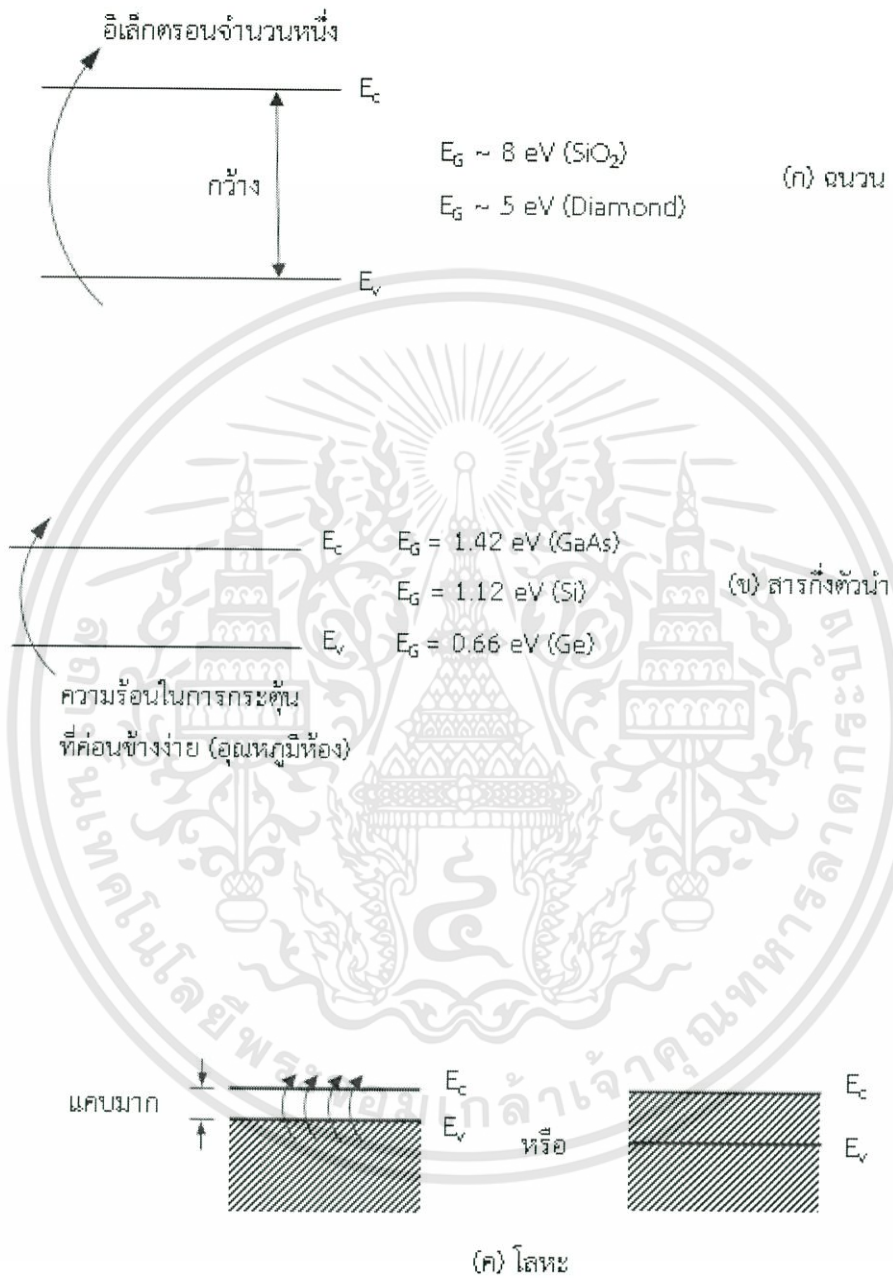
2.5.2 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยา Photocatalysis ได้แก่

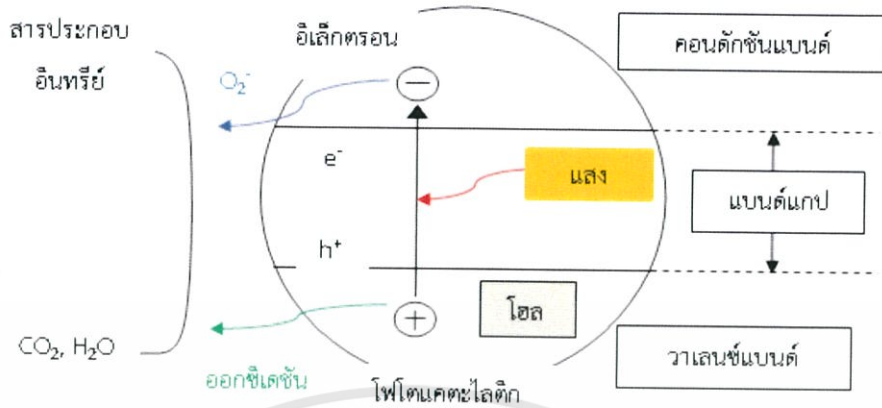
- 1) โลหะตัวนำ (Transition metal) เช่น ทองแดง โคโรเมียม นิกเกิล เป็นต้น
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำมีระดับพลังงานที่สำคัญประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างเรียกว่า “แบนด์แกป (Band gap)” เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับโฟตอนถือเป็นอนุภาคจากพลังงานแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่าย และรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แกปจึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แกปคั่นอยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอน e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แกปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ระดับพลังงานแบนด์แกป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์ ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวคะตะลิสต์ ซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แกปของตัวคะตะลิสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิด e^-/h^+ วิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (รูปที่ 2.2 - 2.3) ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์ และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นโดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนวาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนหรือเป็นตัวรีดิวซ์ (Electron donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่ในระบบบำบัดมีออกซิเจนอยู่ โดยออกซิเจนจะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น Superoxide radical (O_2^+) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมากเช่นกัน (กาญจนา และนนุช, 2553)



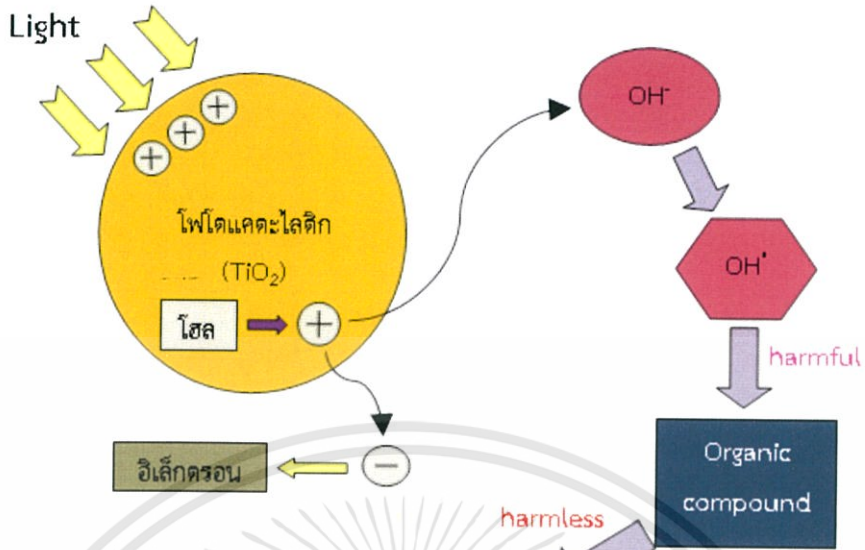
รูปที่ 2.3 ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap energy) ของวัสดุกึ่งตัวนำ
(ที่มา : ขนิษฐา และสมบัติ, 2554)



รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา : ขนิษฐา และสมบัติ, 2554)

2.5.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Mechanism of Photocatalysis Reaction) (ฉลาด และชูลิทธิ, 2548)

ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) ซึ่งมีกลไกคือ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิล (OH^\cdot) และน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลและเรดิคัลตัวอื่นดังแสดงในสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์อออนเรดิคัล เปรอไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ารับอิเล็กตรอนแทนเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical, H^\cdot) ตามสมการที่ (2.13) ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิแดนต์ตามหลักการปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งรองจาก F^- แต่สูงกว่า Cl^- และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 และสมการที่ (2.7) – (2.13)



รูปที่ 2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (ที่มา : ฉลาด และชูสิทธิ์, 2548)

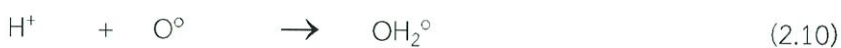
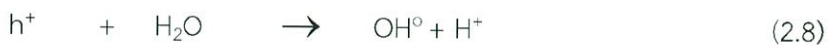
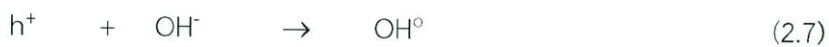
การบำบัดสารอินทรีย์



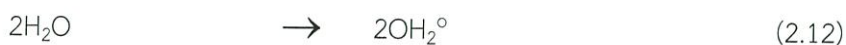
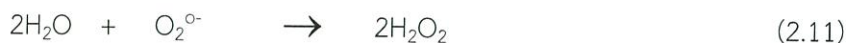
การกระตุ้น



การเกิดเรดิคอลล จาก e⁻ / h⁺



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole recombination)



โดย h^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence band hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

OH° คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical)

$\text{O}_2^{\circ-}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide ion radical)

OH_2° คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical)

H° คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัล และ h^+ ที่ผิวของตัวคะตะลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตะไลติกจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH°) และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจน หรือไฮโดรเจนไอออนได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวคะตะลิสต์กับ h^+ ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวคะตะลิสต์อื่น

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง h^+ กับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตแคตะไลติกมีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์

3. ความเข้มแสง เนื่องจากความเข้มแสงขึ้นกับพลังงานแสงโดยตรง ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น TiO_2 ให้เกิดอิเล็กตรอนที่แถบพลังงานของ TiO_2 คือ 388 nm หรือต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 eV พลังงานแสงที่ใช้ได้จึงอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของ UV หรือในช่วง 100 – 400 nm

4. ความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น และเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดได้น้อยลง และเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึง ปฏิกิริยาจึงเกิดได้น้อยลง

5. ค่าความเป็นกรด – ด่าง เกิดได้จาก 2 สาเหตุ ดังนี้

5.1 การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพราะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet)

5.2 ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

ตารางที่ 2.4 ชนิดของรังสี UV และแหล่งกำเนิดที่ยาวคลื่นต่างๆ (แสง, 2556)

ชนิด	ความยาวคลื่น (nm)	แหล่งกำเนิด
UVA	คลื่นยาว : 315 - 400 nm	ดวงอาทิตย์
		หลอดไฟม่วง
		โคมไฟให้ความร้อน
		ประกายเชื่อมโลหะ
UVB	คลื่นกลาง : 280 - 315 nm	ดวงอาทิตย์
		โคมไฟให้ความร้อน
		ประกายเชื่อมโลหะ
		เครื่องมือเลเซอร์ทางการแพทย์
UVC	คลื่นสั้น : 200 - 280 nm	ดวงอาทิตย์
		โคมไฟให้ความร้อน
		ประกายเชื่อมโลหะ
		เครื่องมือเลเซอร์ทางการแพทย์

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กาญจนา และนงนุช (2553) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตะไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ โดยศึกษาผลของการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ น้ำย้อมที่ใช้ในการบำบัด ได้แก่ น้ำย้อมสีไคเร็กซ์ สีรีแอกทีฟ สีแอดซิด สีดีสเพิร์ส และสีเบสิก ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำย้อมคือ 1 % น้ำสีที่ใช้ในการบำบัดเป็นสีน้ำที่ผ่านกระบวนการย้อมบนวัสดุสังเคราะห์ตามกระบวนการที่สมบูรณ์สีย้อมที่ใช้ทั้งหมดมี

โครงสร้างอะโซ (Azo structure) จากการศึกษาพบว่าสีไดเร็กต์ และสีรีแอกทีฟให้ผลการบำบัดในกระบวนการต่อเนื่องจากเทคนิคโฟโตแคตะไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับได้ดี ส่วนสีเพิร์สควรใช้กระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว สำหรับสีแอซิดและสีเบสิกมีความเข้มข้นของน้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการน้อยจึงไม่นำมาทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีไดเร็กต์ คือใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 76.47 % และถ่านกัมมันต์ 5 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 100 % สีรีแอกทีฟใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 72.22 % และถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 2 ชั่วโมง จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 100 % ส่วนสีดิสเพิร์สใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร เวลา 6 ชั่วโมง จะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 42.77 % และถ่านกัมมันต์ 15 กรัมต่อลิตร เวลา 4 ชั่วโมงจะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเท่ากับ 100 % โดยทำการทดลองด้วยเครื่อง UV-Box ดังนั้นสรุปได้ว่าเทคนิคโฟโตแคตะไลติก ร่วมกับกระบวนการดูดซับสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้ ผลการบำบัดจะขึ้นอยู่กับประเภทสีเป็นหลัก จากงานวิจัยนี้ผู้ทดลองมีข้อผิดพลาดในการระบุรายละเอียดเรื่องแสง UV ที่ใช้ในการทดลอง

ขนิษฐา (2553) ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมทิลีนบลู และสีเหลือง (Cation- yellow X-Gl 200%) โดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบฟิล์มแบบรีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Magnetron sputtering) ผลการทดลองพบว่าสีเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 16 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดสีร้อยละ 70 ในระยะเวลาฉายแสง 5 วัน และสีเหลืองที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดสีร้อยละ 90 ในระยะเวลาฉายแสง 2 วัน โดยใช้แสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ธิดารัตน์ และชนิดดา (2554) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมรีแอกทีฟ และสีย้อมเบสิกด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 และสีย้อมเบสิกเยลโลว์ 28 โดยงานวิจัยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ และหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 และสีย้อมเบสิกเยลโลว์ 28 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20 และ 30 mg/L โดยใช้หลอดยูวีเอและหลอดยูวีบี ระยะเวลาในการกำจัด 10, 20, 30, ..., 120 นาที การทดลองนี้ได้ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่พีเอช 4, 7 และ 10 และได้ทำการเติมปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่า 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 g/L ตามลำดับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู 19 ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดก็คือ 10 ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด 0.2 g/L และที่ค่าความเข้มข้นของสีย้อมดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็คือ 10 mg/L ร้อยละการกำจัดที่มากที่สุดเท่ากับ 100 % ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาอันดับศูนย์ โดยใช้หลอดยูวีเอ และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมเบสิกเยลโลว์ 28 ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดก็คือ 4 ค่าความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุด 0.2 g/L และที่ค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ดีที่สุดก็คือ 10 mg/L ร้อยละการกำจัดที่มากที่สุดเท่ากับ 100 % ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาอันดับศูนย์โดยใช้หลอดยูวีเอ

กนกวรรณ และคณะ (2554) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์เมทิลไวโอเล็ตด้วย ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (AC/TiO₂) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีตัวดูดซับ 1 กรัมใน น้ำเสียสีย้อมเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร พบว่าความเร็วรอบในการกวนสารที่ 500 รอบ/นาที และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสีย้อมเท่ากับ 10 จะทำให้ AC/TiO₂ มีค่า การดูดซับสีย้อมสูงถึง 17.94 มิลลิกรัมสีย้อม/กรัม ตัวดูดซับซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ 66 % โดยที่การปนเปื้อนโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ไม่มีผลต่อการดูดซับ อีกทั้งศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด น้ำเสียสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าใน กรณีที่ไม่มีการปนเปื้อน NaCl ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมเพิ่มขึ้น 9.2 % เมื่อเทียบกับการ บำบัดด้วยกระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว

พฤกระยา (2555) ศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางชั้นด้วย ปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกโดยมีคอลัมน์แก้ว โฟโตแคตะไลติก หลอดไฟ และถังปฏิกรณ์ที่อากาศเสีย ไหลผ่านคอลัมน์แก้วชนิดคอลัมน์บรรจุ (packed column) ที่บรรจุด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ชนิด TiO₂-SiO₂ และ TiO₂ ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีโซล-เจล และวิธีสารแขวนลอยซึ่งเคลือบบนวัสดุ ตัวกลาง รอบนอกของคอลัมน์ติดตั้งด้วยหลอดไฟที่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จากหลอดยูวีและ หลอดแบล็คไลท์ (black light) หลอดละ 8 Watt (ความเข้มแสง 23 - 114 W/m²) โดยทำการติดตั้ง ในแนวตั้งกับผนังภายในของถังปฏิกรณ์ ทำการทดสอบความสามารถเบื้องต้นของโฟโตคะตะลิสต์ต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียด้วยการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยชุดปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) และทำการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง (continuous-flow reactor) โฟโตคะตะลิสต์ TiO₂-SiO₂ ชนิดผงที่เตรียมขึ้นจากวิธีโซล-เจลมี ความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียในของเหลวด้วยประสิทธิภาพ 70 % ที่ระดับความเข้มข้นของ แอมโมเนียเริ่มต้น 100 ppm ส่วนการเคลือบโฟโตคะตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ บนตัวกลาง เพื่อใช้ เซรามิกและใยแก้วในการบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสีย พบว่าการใช้ตัวกลางเซรามิกไม่สามารถ บำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียได้เนื่องจากเกิดการบดบังแสงจากหลอดยูวี ส่วนโฟโตคะตะลิสต์ชนิด TiO₂-SiO₂ บนตัวกลางใยแก้วให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย 60% ที่ระดับความเข้มข้นของ แอมโมเนียในอากาศเสีย 100-200 ppmv

พลอย และคณะ (2555) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษกรองใยแก้วเคลือบ TiO_2 ในการกำจัดสารโพลีอินทรีย์โดยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินทรีย์โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ TiO_2 โดยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ทำการทดลองโดยมีแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแบล็คไลท์ความเข้มแสงยูวี 67, 115 และ 145 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสงยูวี 2.1, 3.8 และ 4.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ TiO_2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 10 กรัมต่อตารางเมตร สารโพลีอินทรีย์ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน ใช้ถึงปฏิกิริยาขนาด 30 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิการทดลองที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ TiO_2 ขนาด 0.156 ตารางเมตร ภายใต้ระยะเวลาการทดลอง 180 นาที และใช้กระดาษกรองใยแก้วเคลือบ TiO_2 โดยไม่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นชุดควบคุม เพื่อการดูซับของแผ่นฟอกอากาศพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ใช้หลอดแบล็คไลท์ทุกความเข้มแสงสามารถกำจัดสารให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารโพลีอินทรีย์ในอาคารที่อยู่อาศัย โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารดีที่สูงสุดที่ความเข้มแสงยูวี 145 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการกำจัดสาร 30 นาที ประสิทธิภาพที่ 96.97 เปอร์เซ็นต์ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินทรีย์ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ประสิทธิภาพการกำจัดสารดีที่สูงสุดที่ความเข้มแสงยูวี 4.5 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาการกำจัดสาร 180 นาที ประสิทธิภาพที่ 39.13 เปอร์เซ็นต์

สีหราช และคณะ (2556) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสารยึดติดที่เหมาะสมกับการเคลือบ TiO_2 บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สำหรับกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ การศึกษานี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารยึดติดชนิดต่างๆ 3 ชนิด ได้แก่ polyethylene glycol น้ำหนักโมเลกุล 1,000 (PEG-1000) หรือ polyvinyl alcohol (PVA) หรือ Silane-69 ในอัตราส่วน 1% เปรียบเทียบกับ 3% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ (5% Degussa P25) ฟอสเฟอไรต์บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 18 วัตต์ ชุดละ 3 หลอด นำไปติดในห้องจำลอง ขนาด $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ที่ปนเข้าไปในห้องจำลองอย่างต่อเนื่องนาน 2 ชั่วโมง ในชั่วโมงแรกเป็นการศึกษาจำนวน *E. coli* ขณะที่ยังไม่มีการเปิดหลอดไฟ เปรียบเทียบกับจำนวน *E. coli* ในชั่วโมงที่สองซึ่งเปิดหลอดไฟ โดยเก็บตัวอย่าง *E. coli* ในอากาศด้วย impactor ที่ระดับความสูง 1.5 เมตร ทุกๆ 10 นาที นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับหลอดไฟที่ไม่เคลือบ และหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติดที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งหมดศึกษาอย่างละ 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาเมื่อใช้หลอดไฟที่ไม่เคลือบ พบว่า *E. coli* ในห้องลดลงเฉลี่ย 29 % ส่วนหลอดไฟที่เคลือบเฉพาะสารยึดติดพบว่า *E. coli* ลดลง 23-33 % (ขึ้นกับชนิดของสารยึดติดที่ใช้) แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นหลอดไฟเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม 3 % PEG-1000 พบ *E. coli* ลดลงสูงสุด 84 % รองลงมาได้แก่การใช้ 3 % PVA และ 1 % PVA ที่ลด *E. coli* ได้ 71 % และ 69 % ตามลำดับ ขณะที่การเคลือบหลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย 1 % PEG-1000 สามารถลด *E. coli* ได้ 63 % ส่วน 1 % Silane-69 และ 3 % Silane-69 มีประสิทธิภาพในการลด *E. coli* ได้ต่ำที่สุด คือ 57 % และ 53 % ตามลำดับ

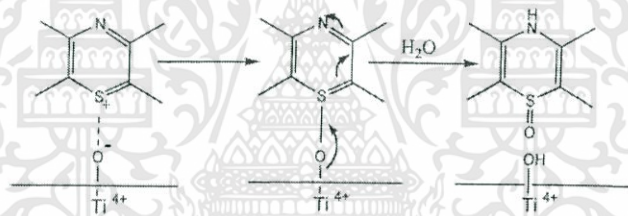
อดิพล (2557) ศึกษากระบวนการโพโตแคตะไลติกของท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์และท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบทองคำ ด้วยการทดสอบการสลายตัวของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงในช่วงวิสิเบิล ท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสังเคราะห์บนแผ่นไทเทเนียมด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีเอทิลีนไกลคอลกับแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ใช้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ และอุณหภูมิห้อง ท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบทองคำจะถูกเตรียมขึ้นจากผ่าน 2 กระบวนการ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน จากนั้นเคลือบอนุภาคทองคำด้วยการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โปแตสเซียมโกลด์ไซยาไนด์ ความต่างศักย์ 4 โวลต์ โดยใช้ระยะเวลา 45 วินาที สำหรับการเคลือบอนุภาคทองคำนำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องเอกซเรย์โพโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคป เทคนิคสเปกโตรสโกปี เอ็มเมท เทลเลอร์ และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโคป จากการทดสอบผลของผลของอนุภาคทองคำต่อปฏิกิริยาโพโตแคตะไลติกในการสลายตัวของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสงช่วงวิสิเบิล พบว่าท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคทองคำมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโพโตแคตะไลติกดีขึ้น

Lakshmi *et al.* (2004) ทำการทดลองการกำจัดสารเมทิลีนบลูในน้ำโดยอาศัยกระบวนการโพโตแคตะไลติกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยศึกษาจาก Brunauer Emmett Teller (BET) มีพื้นที่ผิว 50 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดของท่อภายในโดยเฉลี่ย 30 มิลลิเมตร ภายในบรรจุหลอดไฟชนิดหลอดปรอท ความเข้มแสง 125 W สารเมทิลีนบลูถูกใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารกับสาร NaOH กับ HClO₄ ทำการผสมสารละลายเมทิลีนบลูในหลอด Polymerization มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจน โดยการกวนสารอย่างสม่ำเสมอ ควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ด้วย pH-meter พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลีนบลูจาก 6.6×10^{-6} เป็น 3.6×10^{-5} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตรใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ 10^4 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบไอออนของสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอร์ต และแอมโมเนีย เมื่อเพิ่มปริมาณคะตะลิสต์จาก 0.003 เป็น 0.05 กรัมต่อสารละลาย 75 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู 1.0×10^{-5} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคะตะลิสต์และจะเริ่มคงที่เมื่อปริมาณคะตะลิสต์ถึง 0.1 กรัม

Ammar *et al.* (2005) ทำการทดลองศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโพโตแคตะไลติกซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารคะตะลิสต์ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของสารเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ Pyrex reactor ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกระบอกขนาด 90 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 11 ตารางเซนติเมตร ใช้หลอดไฟชนิด High pressure mercury ขนาด 125 วัตต์ มีน้ำหล่อเย็นช่วยลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยตรงจากหลอดไฟ การวิเคราะห์ผลทำได้โดยวัดค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลู จากเครื่อง UV/Vis Spectrometer ทำนายการดูดซับของคະຕະລີສະຕ์จาก Beer-Lambert diagram หาสารตัวกลาง (Intermediat) ด้วยการวิเคราะห์จากเครื่อง HPLC รวมทั้งหาค่า COD (Chemical oxygen demand) และอัตราการหายไปของเคมีอินทรีย์ (TOC) ค่าพลังงานแสงที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาถูกควบคุมให้เหมาะสมที่ 6.94×10^{-7} mol of protons/second อุณหภูมิควบคุมที่ 293 เคลวิน จากการศึกษาพบว่าสารเมทิลีนบลูสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดังกล่าวที่อุณหภูมิบรรยากาศ ผลจากการดูดซับของเมทิลีนบลูสามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาได้ 6.25×10^3 โมลต่อลิตร และเมื่อแปรค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายให้เพิ่มขึ้นจาก 3 ไปเป็น 9 พบว่าค่าการดูดซับของเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้น สารที่พบในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการกำจัดนั้นจะอยู่ในรูป CO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- และ NH_4^+ โครงสร้างที่เปลี่ยนไปของสารเมทิลีนบลูในน้ำเสียตัวอย่างเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างในวงเบนซีนของสาร ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนโครงสร้างขณะดูดซับ MB เป็น Sulfoxide
(ที่มา : Ammar *et al.*, 2005)

โดยพันธะ O ของไทเทเนียมเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะ S ทำให้พันธะคู่ในวงเบนซีนเกิดการเปลี่ยนแปลง และได้สารออกมาในรูปของ Sulfoxide

Akyol and Bayramoglu (2007) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเอโซรีแอกทีฟเท็ก-ไทล์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก Remazol Red F-3E มาทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบที่ใช้ semiconductor ตัวเร่งปฏิกิริยากลายกับซิงค์ออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีแหล่งกำเนิด UV 2 แหล่ง มีความยาวคลื่นแสงที่ 254 และ 365 นาโนเมตร ในสถานะที่ไม่มีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อการย่อยสลายสีย้อม pH เริ่มต้น, ค่าความเข้มข้นสีย้อม, ระดับแสง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนประเภทของตัวเร่ง และช่วงความยาวคลื่น UV เป็นปัจจัยที่จะทำการศึกษาในกระบวนการนี้ ผลแสดงว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายและการบำบัด TOC ของซิงค์ออกไซด์สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความยาวคลื่นแสง UV 365 นาโนเมตร นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบตัวเร่ง) ฏิกิริยาที่ใช้ พบว่า ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความยาวคลื่นแสง UV 365 นาโนเมตร ในขณะที่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งประสบความสำเร็จอย่างดีที่สุดที่ความยาวคลื่นแสง UV 254 นาโนเมตร และการบำบัด TOC โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งโดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นของแสง UV

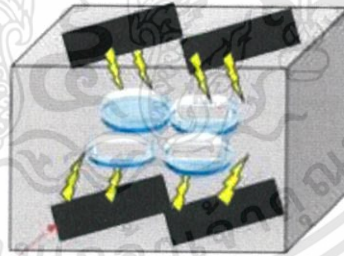
Kyung-Jun *et al.* (2012) ทำการศึกษาการดูดซับ และกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของ ผลึกนาโนไทเทเนียมที่เตรียม โดยวิธีโซล - เจล ด้วยการทดสอบการสลายตัวของเมทิลีนบลู โดยการ สังเคราะห์ไทเทเนียมให้มีขนาดผลึกที่เหมาะสมนั้นจะทำการแปรค่าเวลาการปั่นกววนสารละลาย และ อุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ผง TiO_2 นำมาตรวจสอบด้วย X-ray diffractometry (XRD), สแกนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และวัดการดูดซับไนโตรเจน ปฏิกริยา photocatalytic ของผง TiO_2 ที่สังเคราะห์ ประเมินโดยการศึกษาการสลายของสีย้อม เมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 ppm ปริมาณผง TiO_2 100 มิลลิกรัม ภายใต้หลอดยูวี 32 W พบว่า การสังเคราะห์ผง TiO_2 ที่ 90 °C ใช้เวลาการเกิดปฏิกริยาทันที มีประสิทธิภาพในการกำจัด เมทิลีนบลูดีที่สุดได้ 82% และพบว่า TiO_2 ที่สังเคราะห์มีอัตราส่วนในรูปอนาเทสและรูไทต์เท่ากับ 80:20

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. หลอดไฟชนิด UV_C 10 Watts จำนวน 2 หลอด และ 8 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ยี่ห้อ Philips
2. เครื่องยูวี – วิสเปิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น GENESYS 10S UV – Vis ยี่ห้อ Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวัดความเข้มแสง (Lux meter) รุ่น 1010A ยี่ห้อ Victor
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) รุ่น ED224S ยี่ห้อ Sartorius ประเทศเยอรมัน
5. ไมโครปิเปต (Micropipette) ขนาด 100-1000 μ L รุ่น YM4D022811 ยี่ห้อ Scilogex ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องวัดความเป็นกรด – เบส (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort ประเทศเบลเยียม
7. เครื่องปั่นกวน (Stirrer) รุ่น CB162 ยี่ห้อ Stuart ประเทศอังกฤษ
8. ตู้อบ (Drying Ovens) รุ่น UM400 ยี่ห้อ MEMMERT ประเทศเยอรมัน
9. ห้องทดสอบ (Chamber) ทึบแสง ทำจากสแตนเลส ขนาด 50x60x40 cm^3



หลอดไฟชนิด UVC

*วางแผ่นกระดาษทดสอบให้ตั้งฉากกับหลอดไฟ

10. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

3.2 สารเคมี

1. ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) มีผลึกอนาเทส : รูไทล์ เป็น 80 : 20 ได้รับจากจากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
2. น้ำความบริสุทธิ์สูง (Ultrapure water; DI) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. สารละลายเอทานอลเข้มข้น 95 % (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) เกรตวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fisher Chemical
4. เมทิลีนบลู (Methylene blue; $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) เกรตวิเคราะห์ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. สารละลายโพลีเอธิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG400)
6. ผงสีย้อมผ้าเบลิคสีฟ้า ยี่ห้อ สำเภา ประเทศไทย
7. สิริแอกทีฟบลู 19 ทางการค้า บริษัท เคซีบี เท็กซ์ไทล์ จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมแผ่นคะตะลิสต์ (รชานนท์, 2556)

1. นำแผ่นกระจกขนาด 2.5×7.5 เซนติเมตร มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 4 และเบอร์ 100 จากนั้นแช่น้ำยากัดกระจก (Hydrofluoric acid; HF) เป็นเวลา 2-3 นาที อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักแผ่นกระจก
2. เตรียมสารละลายโดยนำน้ำปราศจากไอออน 125 mL ผสมสารละลายเอทานอลเข้มข้น 95 % จำนวน 25 mL เติมสารละลาย PEG400 เป็นสารยึดติด จำนวน 3 mL ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จำนวน 30 mg จากนั้นปั่นกวนต่ออีก 30 นาที จะได้เป็นสารละลายแขวนลอย
3. ทำการเคลือบสารละลาย TiO_2 บนแผ่นกระจก โดยการจุ่มแผ่นกระจกลงในสารละลายเป็นเวลา 30 นาที พร้อมทั้งปั่นกวนโดยทำ 3 แผ่นพร้อมกัน
4. นำกระจกที่ผ่านการเคลือบไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการจุ่ม และอบแห้งซ้ำ 2 ครั้ง ชั่งน้ำหนักแผ่นกระจก แผ่นกระจกที่ได้เรียกว่า “แผ่นคะตะลิสต์ A”
5. ทำการทดลองซ้ำเหมือนข้อ 1- 4 แต่เปลี่ยนปริมาณ TiO_2 เป็น 70 mg และเรียกว่า “แผ่นคะตะลิสต์ B” ดังรูป จ-2 ภาคผนวก จ แผ่นคะตะลิสต์ที่ได้เก็บรักษาไว้ในเดซิเคเตอร์รอใช้การทดลองขั้นต่อไป

3.3.2 ผลของระยะเวลาการฉายแสง UV และปริมาณ TiO₂ ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 2 mg/L เทใส่จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ปริมาตร 30 ml. จำนวน 5 จาน โดยทำการทดลองตามที่กำหนดดังนี้ จานที่ 1 ไม่มีแสง UV และไม่มีแผ่นคะตะลิสต์ A จัดเป็นชุดแบลงค์ ส่วนจานที่ 2 มีแสง UV แต่ไม่มีแผ่นคะตะลิสต์เป็นชุดควบคุมจานที่ 3 – 5 มีแสง UV และมีแผ่นคะตะลิสต์ A เป็นชุดทดลอง 3 ซ้ำ

2. นำสารละลายเมทิลีนบลูในจานเพาะเชื้อที่ 2 - 5 เข้าห้องทดสอบเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติก โดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

3. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV (Absorbance) ทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง จากนั้นวัดทุกๆ 3 ชั่วโมง จนครบ 24 ชั่วโมง ที่ความยาวคลื่น 665 nm พร้อมกับวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ และค่าพีเอชของสารละลายทั้งก่อน - หลังการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นเทสารละลายที่นำไปวัดกลับคืนทุกรอบ

4. หาประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู โดยมีสมการดังนี้

$$\% \text{การบำบัด} = \frac{(C_0 - C_t) \times 100}{C_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้น MB เริ่มต้น (mg/L)

C_t = ความเข้มข้น MB ของชุดทดลอง (mg/L)

โดยการหาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่แท้จริงมีสมการดังนี้

$$\% R_T = \% R_S - \% R_C \quad (3.2)$$

เมื่อ $\% R_S$ = $\% \text{การบำบัด MB ของชุดทดลอง}$

$\% R_C$ = $\% \text{การบำบัด MB ของชุดควบคุม}$

5. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 – 3 โดยเปลี่ยนตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูเป็นความเข้มข้น 25 mg/L

6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 - 5 โดยเปลี่ยนเป็นแผ่นคะตะลิสต์ B

7. ทำการหาอันดับปฏิกิริยาโดยการพลอตกราฟความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับ 0 ระหว่างความเข้มข้นกับเวลา ส่วนความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 ระหว่างลอการิทึมของความเข้มข้นกับเวลา และความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับ 2 ระหว่างหนึ่งส่วนความเข้มข้นกับเวลา

3.3.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

1. เตรียมตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 2 mg/L เทใส่จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ปริมาตร 30 ml. จำนวน 5 จาน
2. ใส่แผ่นกระดาษลิต์มที่เหมาะสมลงสารละลายเมทิลีนบลูในจานเพาะเชื้อที่ 3 - 5 เข้าห้องทดสอบเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสงและเก็บจานที่ 1 ในที่มืดเป็นชุดแบลงค์ จานที่ 2 เป็นชุดควบคุม
3. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV เป็นเวลาที่เหมาะสมดังข้อ 3.3.2 ที่ความยาวคลื่น 665 nm พร้อมกับวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ และค่า pH ของสารละลายทั้งก่อน - หลังการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นเทสารละลายที่นำไปวัดกลับคืนทุกรอบ
4. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 - 3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 5, 15, 25, 35 และ 50 mg/L ตามลำดับ

3.3.4 ผลของจำนวนรอบในการใช้แผ่นกระดาษลิต์มซ้ำ

1. นำแผ่นกระดาษลิต์มที่เหมาะสมดังข้อ 3.3.2 ผึ่งแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บรักษาไว้ในเดซิเคเตอร์
2. เตรียมตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 2 mg/L เทใส่จานเพาะเชื้อ ปริมาตร 30 ml จำนวน 5 จาน โดยใส่แผ่นกระดาษลิต์มที่เหมาะสมในจานเพาะเชื้อจานที่ 3 - 5
3. นำจานเพาะเชื้อที่ 2 - 5 เข้าห้องทดสอบเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสงส่วนจานที่ 1 เก็บในที่มืด
4. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV เป็นเวลาที่เหมาะสม และความยาวคลื่น 665 nm พร้อมกับวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ และวัด pH ของสารละลายทั้งก่อน - หลังการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นเทสารละลายที่นำไปวัดกลับคืนทุกรอบ
5. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 - 4 โดยนำแผ่นกระดาษลิต์มจากข้อ 1 มาใช้ซ้ำ และเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 5, 15, 25, 35 และ 50 mg/L และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัด

3.3.5 ผลของความเป็นกรด-เบส (pH) ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

1. เตรียมตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 25 mg/L แล้วปรับ pH เป็น 3 ด้วย 1 M HCl หรือ 1 M NaOH
2. เทใส่จานเพาะเชื้อ ปริมาตร 30 ml. จำนวน 5 จาน โดยจานที่ 2 - 5 ใส่แผ่นกระดาษลิต์ม
3. นำสารละลายเมทิลีนบลูในจานเพาะเชื้อที่ 3 - 5 เข้าห้องทดสอบเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสงและนำจานที่ 1 เก็บในที่มืด
4. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV เป็นเวลาที่เหมาะสม และที่ความยาวคลื่น 665 nm พร้อมกับวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ และวัด pH ของสารละลายทั้งก่อน - หลังการเกิดปฏิกิริยา

5. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 – 4 โดยเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลู เป็น 7 และ 11 ตามลำดับ

3.3.6 ผลของปริมาณสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

1. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 mg/L ปริมาตร 30, 50 และ 100 mL ใส่ภาชนะที่ใช้ทดลอง โดยใส่แผ่นคะตะลิสต์ 1 แผ่น เป็นจำนวน 3 ขาม และอีก 1 ขาม ไม่ใส่แผ่นคะตะลิสต์เป็นชุดควบคุม

2. ทำการเตรียมเหมือนข้อ 1 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 25 mg/L

3. นำตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้วางบริเวณที่มีแสงอาทิตย์ (UV_{Sun}) เวลาประมาณ 9:00 – 15:00 น. ยกเว้นงานที่ไม่มีแผ่นคะตะลิสต์ของตัวอย่างแต่ละความเข้มข้น และปริมาตรอย่างละ 1 งาน ให้เก็บในที่มืด

4. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV ของสารละลายที่ความยาวคลื่น 665 nm และค่าความเข้มแสง (Lux) ทุกๆ 1, 3 และ 6 ชั่วโมง พร้อมกับวัดอุณหภูมิ

3.3.7 ผลของแหล่งกำเนิดแสง UV ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

1. เตรียมตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 2 mg/L เทใส่จานเพาะเชื้อ ปริมาตร 30 ml. จำนวน 10 งาน และใส่แผ่นคะตะลิสต์จำนวน 6 งาน งานละ 1 แผ่น

2. แบ่งเป็น 2 ชุด แต่ละชุดมีจานเพาะเชื้อที่มีแผ่นคะตะลิสต์จำนวน 3 งาน และไม่ มีแผ่นคะตะลิสต์จำนวน 2 งาน

3. นำชุดที่ 1 เข้าห้องทดสอบเพื่อให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง แต่เก็บงานที่ไม่มีแผ่นคะตะลิสต์ไว้ในที่มืด 1 งาน

4. ส่วนชุดที่ 2 ทำการทดลองเหมือนชุดที่ 1 แต่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

5. วัดค่าการดูดกลืนแสง UV ทุกๆ 1, 3 และ 6 ชั่วโมงความยาวสูงสุด พร้อมกับวัดอุณหภูมิและวัดความเข้มแสง

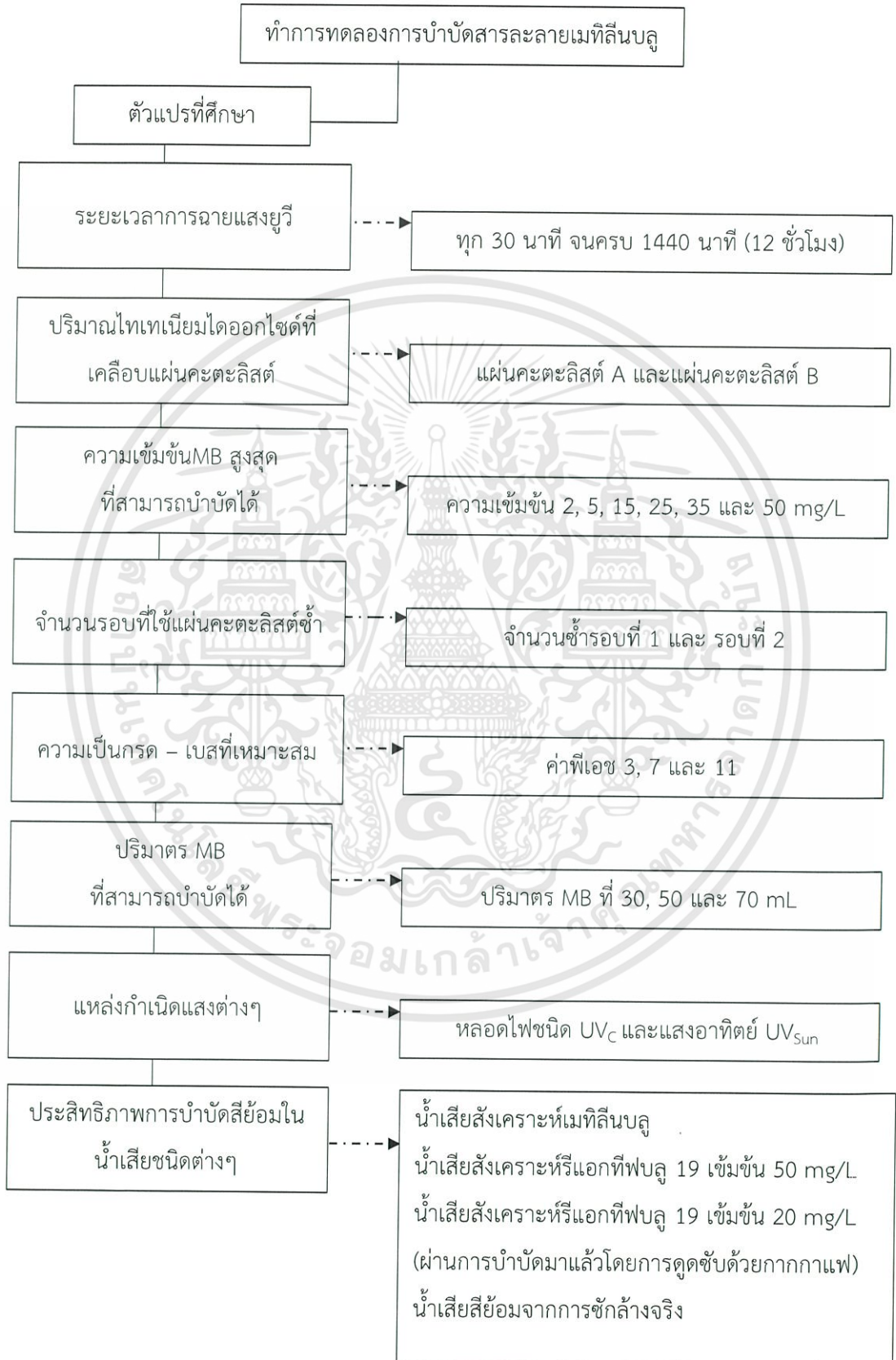
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1 – 5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 25 mg/L.

3.3.8 ผลของการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เมทิลีนบลูความเข้มข้น 25 mg/L น้ำเสียสี้อมจากการซักล้างจริงน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู 19 เข้มข้น 50 mg/L และน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู 19 เข้มข้น 20 mg/L ใส่จานเพาะเชื้อ ปริมาตร 30 ml ชนิดละ 10 จานโดยใส่แผ่นคะตะลิสต์ A ในจานที่ 4 -10 เป็นชุดทดลอง
2. นำตัวอย่างน้ำในจานเพาะเชื้อทั้งหมดวางบริเวณที่มีแสงอาทิตย์ยกเว้นจานที่ 1 ไม่มีแผ่นคะตะลิสต์ของน้ำเสียแต่ละชนิด ชนิดละ 1 จาน ให้เก็บในที่มืดเป็นชุดแบลงค์
3. วัดอุณหภูมิ, ความเข้มแสง UV และวัดค่าการดูดกลืนแสง UV ทุกๆ 1, 3 และ 6 ชั่วโมง ที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max})



3.3.9 แผนผังภาพรวมการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.10 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์

ตรวจสอบความถูกต้องของกราฟมาตรฐานที่ใช้ด้วยการเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากับค่ากึ่งกลางของกราฟมาตรฐานและนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ โดยหาค่า Initial Calibration Verification Standrad (ICVS) ต้องไม่เกิน 10 % และ Continuing Calibration Verification Standrad (CCVS) ซึ่งจะต้องไม่เกิน 15 % (ดังภาคผนวก ก)

3.3.11 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพื่อหาปริมาณ TiO_2 และจำนวนรอบในการใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 17



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

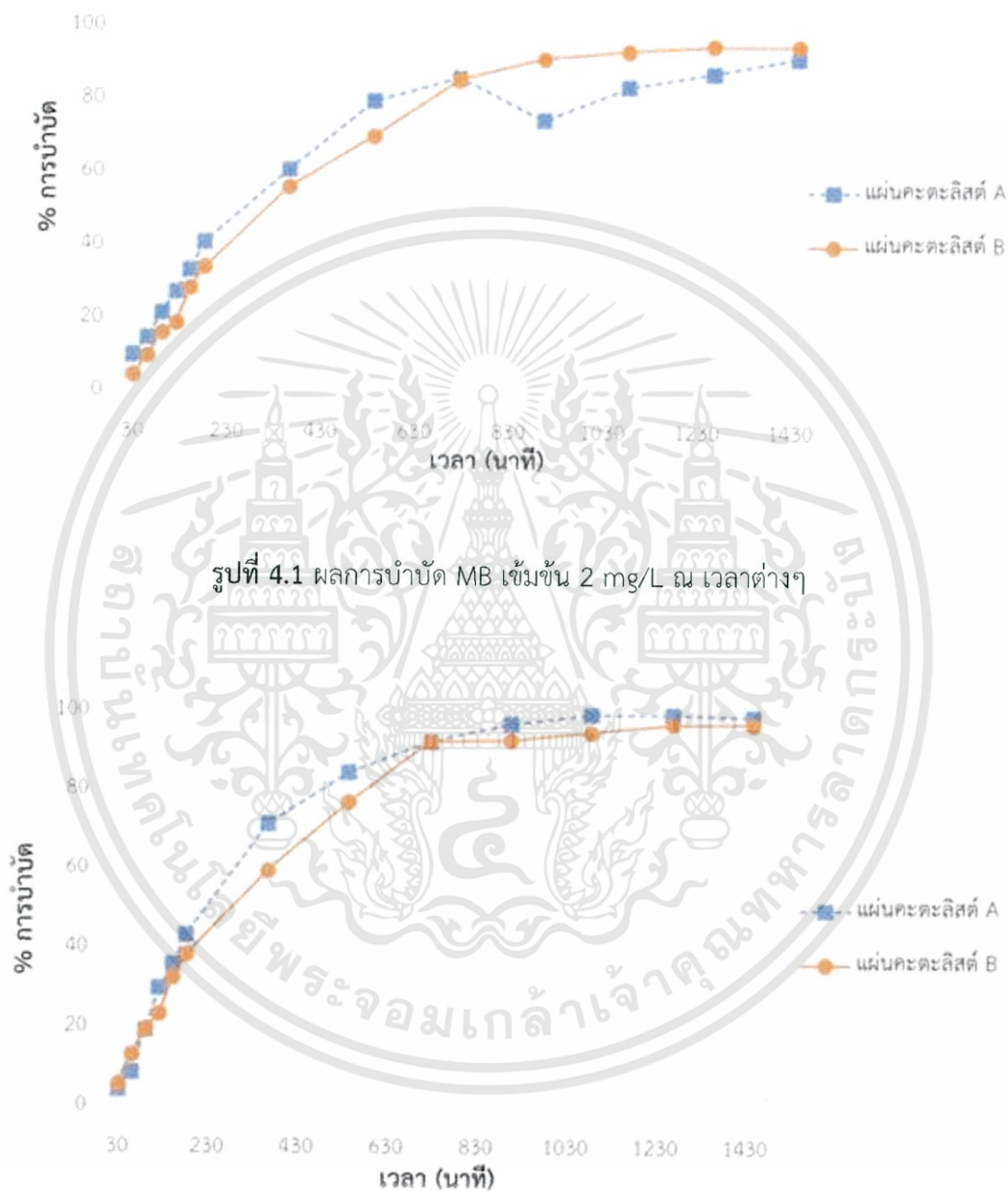
โครงการพิเศษนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ระยะเวลาการฉายแสง UV ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้นที่เคลือบบนแผ่นคะตะลิสต์ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู ค่าความเป็นกรด - เบส จำนวนรอบที่ใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ แหล่งกำเนิดแสง UV และการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

การเตรียมแผ่นคะตะลิสต์โดยการนำแผ่นกระจกสไลด์มาเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อดีคือ สามารถนำมาใช้ในการบำบัดซ้ำได้ ถือเป็นทางเลือกต้นทุนในการบำบัด ง่าย และสะดวกต่อการบำบัด เนื่องจากหากใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ละลายในสารละลายเมทิลีนบลูเพื่อใช้ในการบำบัดจะทำให้ผงไทเทเนียมที่ละลายไม่หมดเป็นตะกอนตกค้างไปกับน้ำเสีย ทำให้ผงไทเทเนียมอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และยุ่งยากในการบำบัด เนื่องจากต้องทำการตกตะกอนด้วยวิธี Centrifuge ดังนั้นจึงเลือกใช้แผ่นคะตะลิสต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

4.1 ผลของระยะเวลาการฉายแสง UV ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

ในการศึกษาของระยะเวลาการฉายแสง UV จากหลอดหลอดไฟชนิด UV_C ช่วงความยาวคลื่น 200 – 280 nm ทำให้มีความเข้มแสงภายในห้องทดสอบเท่ากับ 179 ± 3 Lux ในการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ในการศึกษาใช้ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/L และ 25 mg/L ตามลำดับ ปริมาตร 30 mL ใช้แผ่นคะตะลิสต์ A แปรค่าระยะเวลาการฉายแสง UV ทุกๆ 30 นาที จนครบ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษานี้ได้ทำการทดลอง 3 ชุด คือ ชุดแบลงค์ ชุดควบคุม และชุดทดลอง พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูในงานที่ 1 ที่ไม่มีทั้งแผ่นคะตะลิสต์ A และไม่ได้รับแสง UV มีการสลายได้เอง 7.31 % ซึ่งใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่มีแผ่นคะตะลิสต์ A แต่ได้รับแสง UV ในช่วงแรกของชุดทดลองพบว่า % การบำบัดค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเวลาฉายแสง UV ที่เพิ่มขึ้น หลัง 720 นาที พบว่า % การบำบัดลดลงเล็กน้อย สำหรับสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2 mg/L แต่ที่ความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูสูงขึ้นเป็น 25 mg/L ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าหลัง 720 นาที % การบำบัดคงที่ ซึ่งบำบัดได้มากกว่า 90 % จึงถือว่า 720 นาที หรือ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาฉายแสง UV ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ในการทดลองขั้นต่อไปจึงใช้เวลาฉายแสง UV ที่ 12 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับงานวิจัยของชนิษฐา (2553) พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 16 mg/L ลดสีร้อยละ 70 ในระยะเวลาฉายแสง 5 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูสามารถใช้ระยะเวลาในการฉายแสง UV เพียง 12 ชั่วโมง ที่ 2

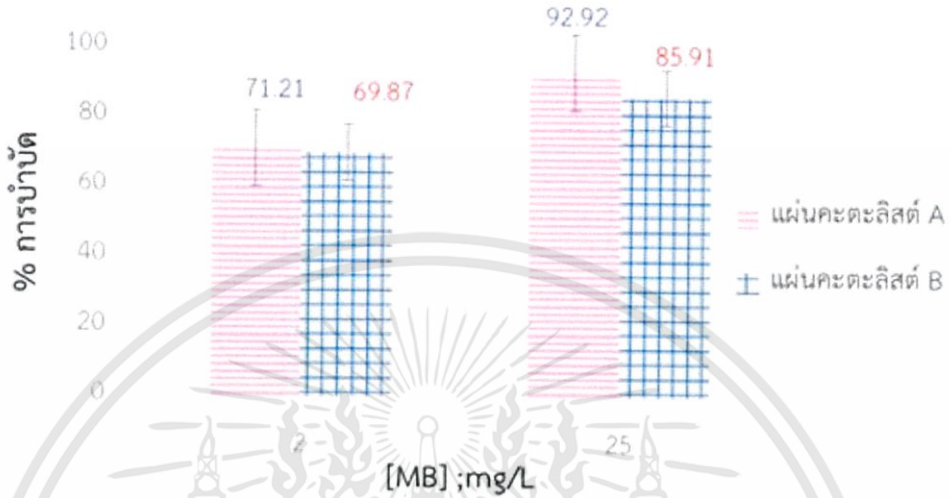
mg/L บำบัดได้ 86.39 % และ 25 mg/L บำบัดได้ 92.92 % ทำให้ลดต้นทุน ค่าใช้จ่ายและลดเวลาในการบำบัด



รูปที่ 4.2 ผลการบำบัด MB เข้มข้น 25 mg/L ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้นที่เคลือบแผ่นคะตะลิสต์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู



รูปที่ 4.3 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A และ B ระยะเวลาการฉายแสง UV 12 ชั่วโมง ความเข้มแสง UV_c ภายในห้องทดสอบ 179±3 Lux

ในการศึกษาแผ่นคะตะลิสต์ที่เคลือบ TiO₂ เตรียมจากปริมาณที่แตกต่างกัน 2 ปริมาณ คือ 30 mg (แผ่นคะตะลิสต์ A) และ 70 mg (แผ่นคะตะลิสต์ B) โดยบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นที่ 2 mg/L และ 25 mg/L ตามลำดับ ซึ่งมีปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้แสง UV เป็นระยะเวลาฉายแสง 720 นาที โดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A และ B พบว่าแผ่นคะตะลิสต์ A สามารถบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูได้ดีกว่าแผ่นคะตะลิสต์ B เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น อาจมีเหตุผลจากการใช้ปริมาณ TiO₂ เคลือบมาก ทำให้ TiO₂ ที่อยู่ด้านนอกบดบังแสง UV ของ TiO₂ ที่อยู่ด้านใน และการบังพื้นที่ผิวของ TiO₂ ในการรับแสง UV จึงเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูได้น้อยกว่าเมื่อคิดความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน สำหรับสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่ำ 2 mg/L สามารถใช้แผ่นคะตะลิสต์ A หรือ B ก็ได้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังภาคผนวก ง จึงใช้แผ่นคะตะลิสต์ A เพื่อเป็นการลดต้นทุน และลดปริมาณ TiO₂ ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.3 โดยแผ่นคะตะลิสต์เคลือบ TiO₂ จะใช้ PEG400 เป็นตัวยึดติดให้ TiO₂ ยึดเกาะกัน หรือทำหน้าที่เป็นกาว โดยแผ่นคะตะลิสต์ A ที่ปริมาณ TiO₂ 30 mg/สารละลายแขวนลอย 150 mL จะมีพื้นผิวแผ่นคะตะลิสต์ที่เรียบเนียน เนื่องจากปริมาณ TiO₂ น้อย กระจายตัวได้ดีจึงรับแสงได้ดี ส่วนแผ่นคะตะลิสต์ B ที่ปริมาณ TiO₂ 70 mg/สารละลายแขวนลอย 150 mL มีพื้นผิวแผ่นคะตะลิสต์

ที่ขรุขระหรือจับตัวเป็นก้อน เนื่องจากปริมาณ TiO_2 มาก กระจายตัวได้ไม่ดีจึงรับแสงได้ไม่ดี แสดงรูปดังภาคผนวก จ และเมื่อเพิ่มปริมาตร PEG400 มากขึ้นอาจจะทำให้ TiO_2 เกาะกันเป็นก้อนได้ดีมากขึ้น และส่งผลให้บำบัดได้ดีขึ้น

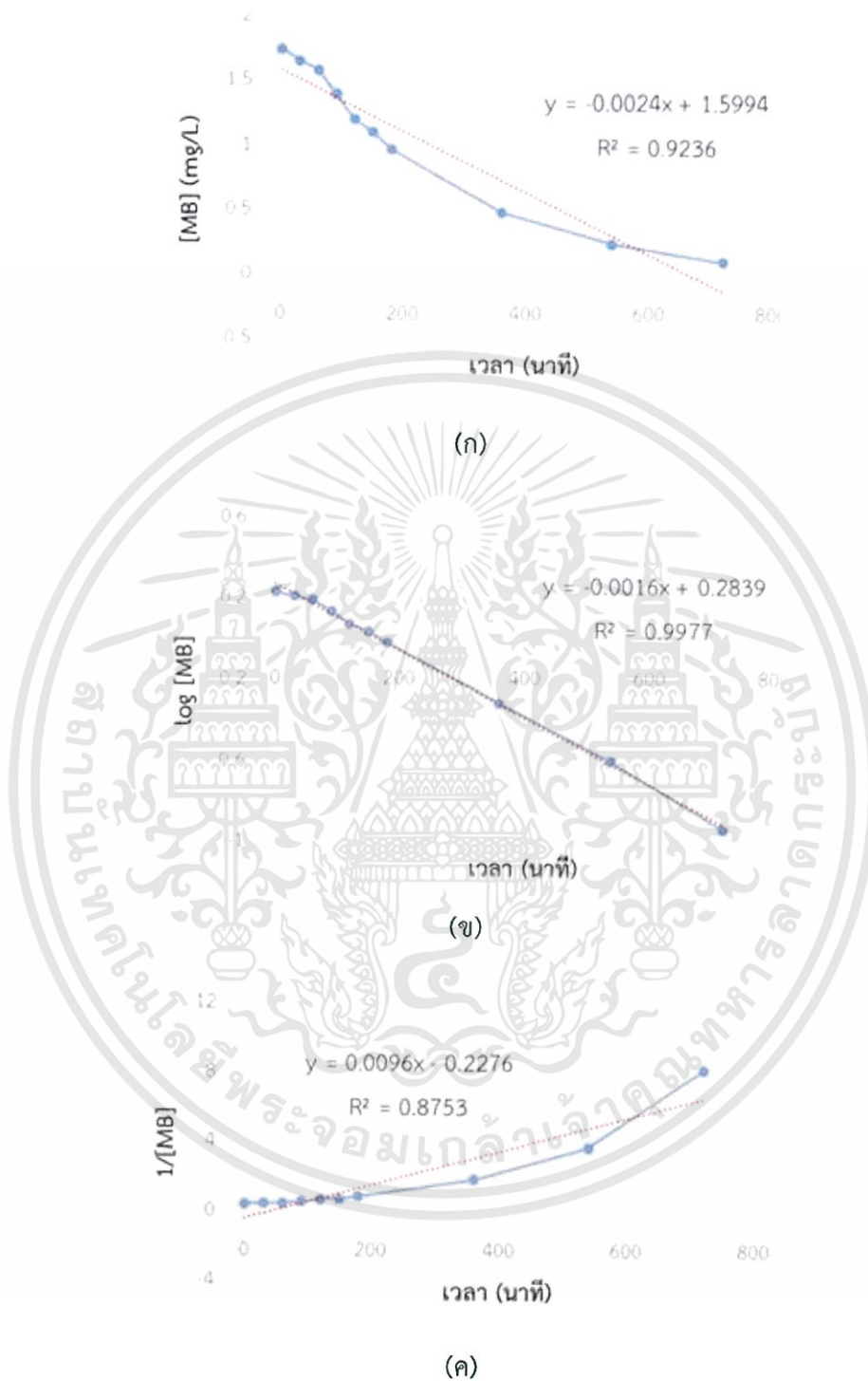
4.3 ผลของอันดับปฏิกิริยาต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

ในการศึกษาผลของอันดับปฏิกิริยาต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู โดยกำหนดแผ่นอะตอมลิสต์ A และระยะเวลาการสัมผัสแสง UV เท่ากับ 720 นาที ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู 2 mg/L ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UV_C พบว่ากราฟที่สัมพันธ์กันระหว่างแกน y กับ x ให้ค่า R^2 ที่ดีเป็นกราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ $\log [\text{MB}]$ (แกน y) กับ เวลา(แกน x) ที่ความเข้มข้น 2 mg/L ได้ $y = -0.0014x + 0.2662$, $R^2 = 0.9749$ ดังรูปที่ 4.4 ทั้งนี้ไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มข้น MB เป็น 25 mg/L ให้ค่า R^2 ที่ดีที่สุดเป็นกราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของ $\log [\text{MB}]$ (แกน y) กับ เวลา(แกน x) ได้ $y = -0.0012x + 1.376$, $R^2 = 0.9962$ ดังรูปที่ 4.5 ก็พบว่าอันดับของปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกยังเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง หรืออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของ MB ดังสมการอัตรา

$$\text{Rate} = k[\text{MB}] \quad (4.1)$$

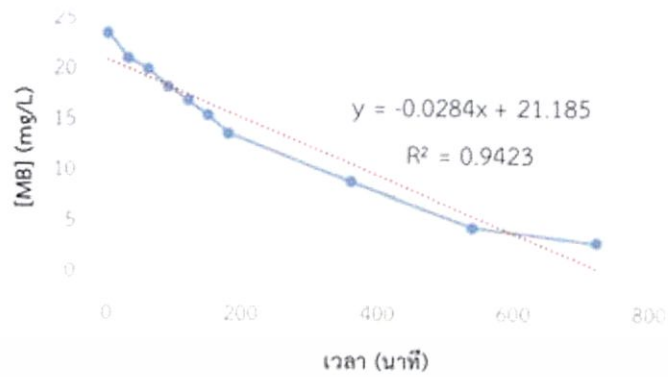
เมื่อ $\text{Rate} =$ อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง
 $k =$ ค่าคงที่อัตรา
 $[\text{MB}] =$ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู

จะเห็นได้ว่าที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่าคงที่อัตราที่ MB 2 mg/L (k_1) เท่ากับ $-0.0016 \text{ mgL}^{-1}/\text{นาที}$ ส่วน MB 25 mg/L (k_2) เท่ากับ $-0.0012 \text{ mgL}^{-1}/\text{นาที}$ โดยค่าคงที่อัตรามีค่ามากขึ้น แสดงว่าอัตราในการเกิดปฏิกิริยาเกิดเร็ว



รูปที่ 4.4 กราฟปฏิกิริยาอันดับต่างๆของ MB เข้มข้น 2 mg/L โดยใช้แผ่นคะตะลิสต์ A
(ก) อันดับศูนย์ (Zero order) (ข) อันดับหนึ่ง (First order) (ค) อันดับสอง (Second order)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

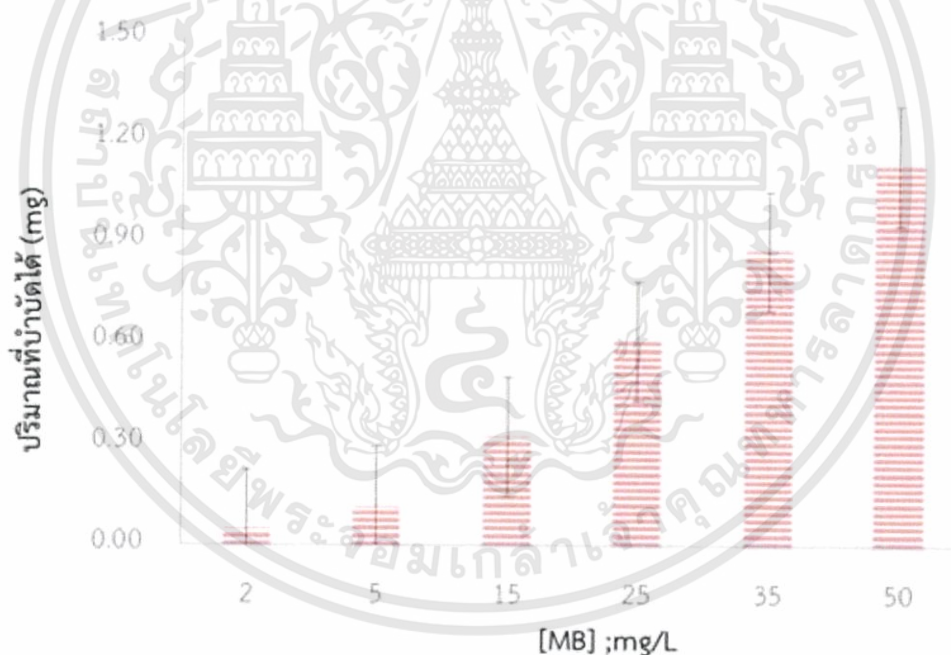


รูปที่ 4.5 กราฟปฏิกิริยาอันดับต่างๆของ MB เข้มข้น 25 mg/L โดยใช้แผ่นกระดาษกรอง A
(ก) อันดับศูนย์ (Zero order) (ข) อันดับหนึ่ง (First order) (ค) อันดับสอง (Second order)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

จากรูปที่ 4.6 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลูมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อสารละลายเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเมทิลีนบลูจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของแผ่นคะตะลิสต์ TiO_2 เป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสารละลายเมทิลีนบลูมีจำนวนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงเกิดการขัดขวางของโมเลกุลเมทิลีนบลูที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของแผ่นคะตะลิสต์ TiO_2 และทำให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจาย และการส่องผ่านของแสง UV ในแผ่นคะตะลิสต์มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบุษบา และคณะ (2552) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akyol and Bayramglu (2007) ที่ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมเพิ่มขึ้น ปริมาณที่บำบัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

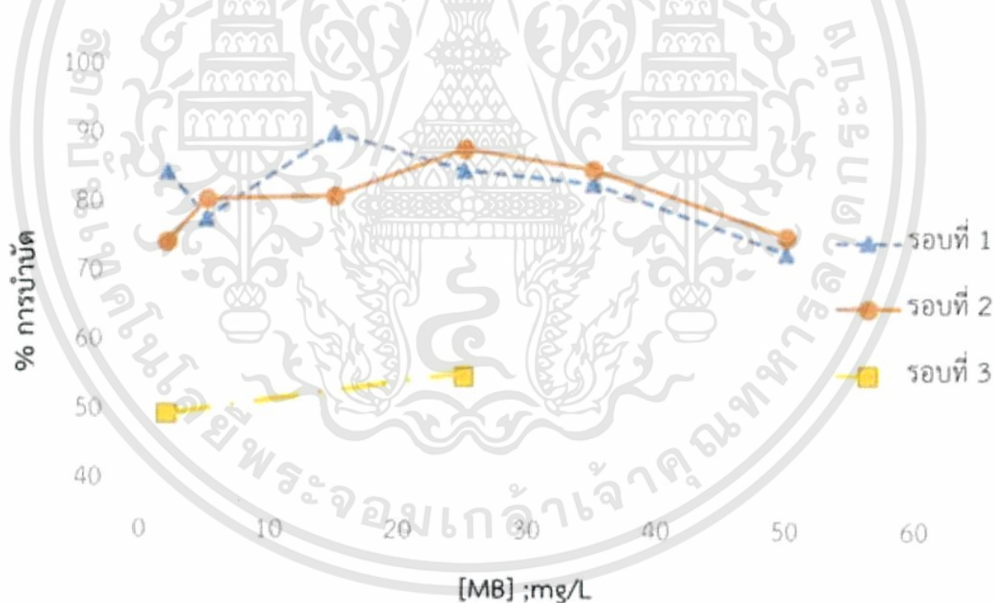


รูปที่ 4.6 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ณ ความเข้มข้นต่างๆ

ระยะเวลาการฉายแสง UV 12 ชั่วโมง; แผ่นคะตะลิสต์ A

4.5 ผลของจำนวนรอบที่ใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำ

ในการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้แผ่นคะตะลิสต์ที่เคลือบ TiO_2 ซ้ำ โดยกำหนดแผ่นคะตะลิสต์ A ที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 1 รอบ และ 2 รอบ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นที่ความเข้มข้น MB ที่ 2 และ 25 mg/L พบว่าการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ซ้ำรอบที่ 3 มีค่า % การบำบัด MB น้อยกว่า 60 % จึงเลือกที่จะศึกษาจำนวนซ้ำเพียง 2 รอบ และใช้ระยะเวลาการฉายแสง UV เท่ากับ 720 นาที แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 2, 5, 15, 25, 35 และ 50 mg/L ตามลำดับ ปริมาตร 30 mL ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UV_C พบว่าการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ในรอบที่ 1 ไม่แตกต่างจากการใช้บำบัดในรอบที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.7 และดังรายละเอียดในภาคผนวก ง โดยการ ใช้แผ่นคะตะลิสต์ซ้ำรอบที่ 1 และ 2 ยังคงมี TiO_2 ที่เคลือบติดอยู่ ซึ่งใช้การสังเกตด้วยตา แต่เมื่อใช้ซ้ำ รอบที่ 3 พบว่าสามารถบำบัดได้น้อยลง เนื่องจากแผ่นคะตะลิสต์เกิดการดูดซับ MB โดยสังเกตด้วยตา จะเห็นว่าแผ่นคะตะลิสต์มีสีฟ้าของ MB และ TiO_2 บางส่วนอาจการหลุดออก ทำให้แสงส่องผ่านไปยังแผ่นคะตะลิสต์ได้ไม่ดี เนื่องจาก PEG400 อาจเกิดการหลุดออกจาก TiO_2 ทำให้การใช้แผ่นคะตะลิสต์ จำนวนรอบที่ใช้ซ้ำมากๆ จึงบำบัดได้น้อยลง



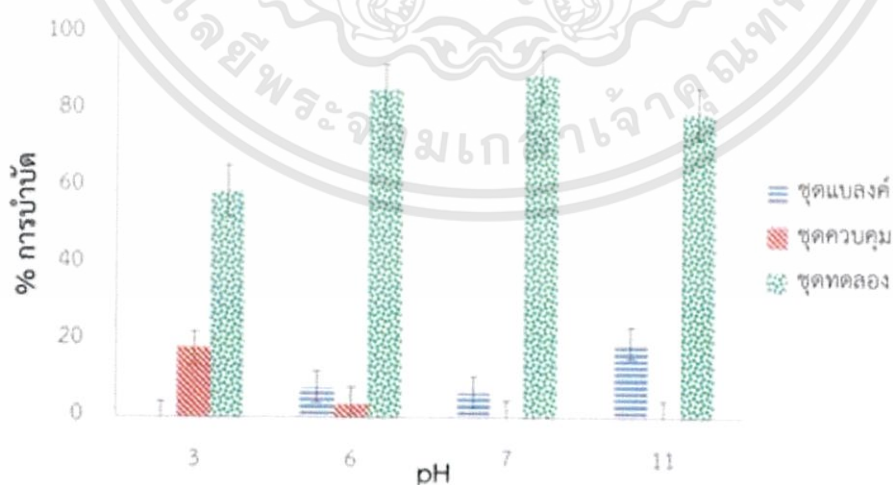
รูปที่ 4.7 ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ณ ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบการใช้แผ่นคะตะลิสต์ A ซ้ำ
ระยะเวลาการฉายแสง UV 12 ชั่วโมง

4.6 ผลของค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

ในการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด - เบสต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู ทำการแปรค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 3, pH เดิม (pH 6), 7 และ 11 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.8 พบว่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกในสภาวะที่มี TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UV_C ประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกในสภาวะที่มี TiO_2 เกิดได้ดีที่สุดคือ pH 7 ซึ่งโดยปกติสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 mg/L จะมีค่า pH ประมาณ 6 จึงจะเห็นได้ว่าที่ pH 6 และ 7 มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 85.30 และ 89.10 % ตามลำดับ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง และเนื่องจาก TiO_2 เป็นสารประเภท Amphoteric Surfactant คือมีทั้งประจุลบและประจุบวกอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อ MB มี pH เป็นกรด TiO_2 ก็จะแสดงประจุบวกออกมา แต่เมื่อ MB เป็นเบส TiO_2 จะแสดงประจุลบออกมา ดังนั้นเมื่อ TiO_2 มีค่า pH_{pzc} ($\text{pH}_{\text{pzc}} = 6.5$) ต่ำกว่า pH ของสารละลาย ทำให้พื้นผิวของ TiO_2 มีประจุลบ สีย้อมประจุบวกจึงยึดเกาะได้ดี ในขณะที่ pH อื่นๆ พื้นผิวของ TiO_2 มีประจุบวก ทำให้เกิดการผลักกัน (กนกวรรณ และคณะ, 2554)



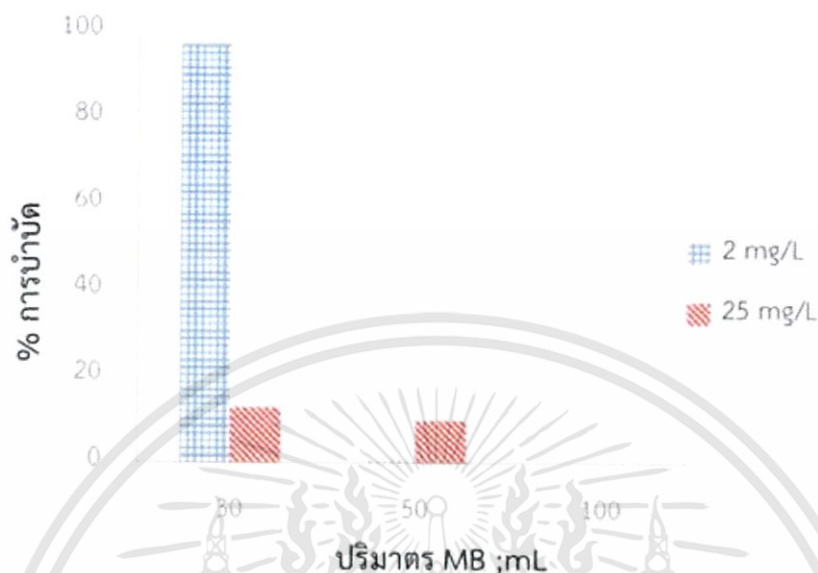
ดังนั้นจึงเลือกใช้ MB ที่สภาวะ pH 6 เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัด และปริมาณการใช้สารเคมีในการปรับ pH



รูปที่ 4.8 ผลการบำบัด MB ความเข้มข้น 25 mg/L ณ ค่า pH ต่างๆ

ระยะเวลาการสัมผัสแสง UV 12 ชั่วโมง; แผ่นคะตะลิสต์ A

4.7 ผลของปริมาณสารละลายเมทิลีนบลูต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

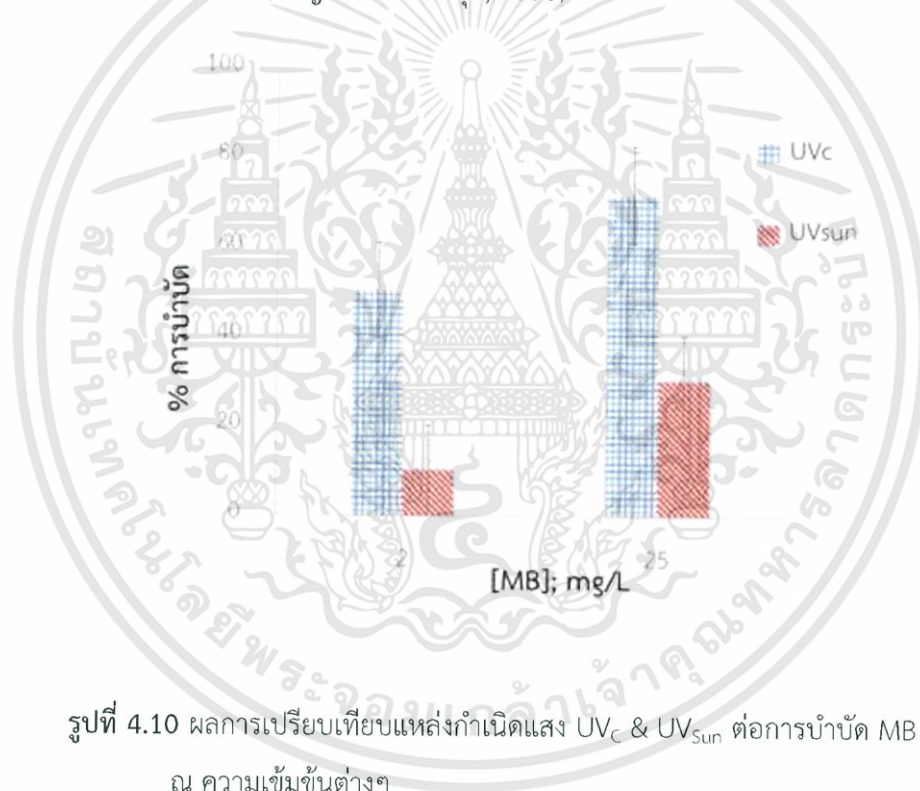


รูปที่ 4.9 ผลการบำบัด MB ความเข้มข้น 2 mg/L และ 25 mg/L ณ ปริมาตรต่างๆ ระยะเวลาฉายแสง UV 6 ชั่วโมง; แผ่นคะตะลิสต์ A; UV_{sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง

จากรูปที่ 4.9 ทำการศึกษาผลของปริมาณต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยการแปรค่าความเข้มข้นของ MB เริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/L และ 25 mg/L ปริมาตร 30 mL, 50 mL และ 100 mL ตามลำดับ การบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูปริมาณต่างๆ โดยมีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดเพื่อกระตุ้นการเกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ซึ่งที่ปริมาตร 30 mL, 50 mL และ 100 mL มีความลึกของสารละลายเป็น 0.6 cm, 1.0 cm และ 1.8 cm ตามลำดับ พบว่าการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาตรของ MB มากขึ้น เนื่องจากปริมาตรของ MB มาก ทำให้แสง UV จึงส่องผ่านไปยังแผ่นคะตะลิสต์ได้น้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด MB ลดลง และระดับความลึกมีค่าต่ำจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ดี ดังนั้นปริมาตรของ MB ที่เหมาะสมคือ 30 mL โดยที่ MB 2 mg/L สามารถบำบัดได้ถึง 96.79 % และ MB 25 mg/L บำบัดได้ 12.72 %

4.8 ผลการของแหล่งกำเนิดแสงต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

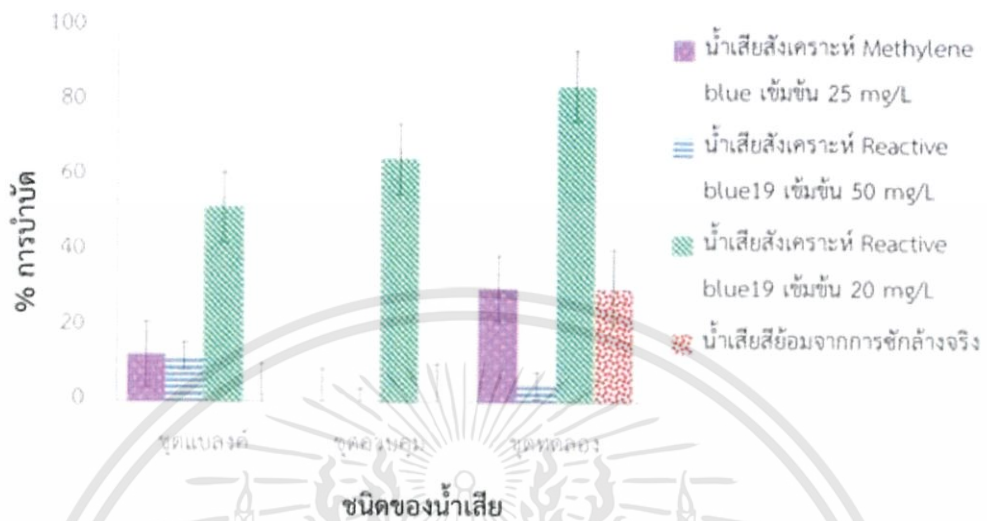
จากรูปที่ 4.10 พบว่าการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูมีผลต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยสารละลายเมทิลีนบลูทั้งสองความเข้มข้นสามารถบำบัดได้ดีที่หลอดไฟชนิด UV_C ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 280 nm หรือมีความเข้มแสงภายในห้องทดสอบ 179 ± 3 Lux เนื่องจากการฉายแสง UV เป็นพลังงานกระตุ้น ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกต้องมากกว่า หรือเท่ากับพลังงานแบนด์แกปจึงจะเกิดขึ้นได้ แต่แสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกมีช่วง UV_{sun} ในปริมาณน้อยมากหรืออยู่ในช่วง 5 - 10 % เพราะชั้นโอโซนดูดกลืนแสง UV ไว้ (ศูนย์ตรวจวิเคราะห์โอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558) และมีความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ 548×100 Lux ความเข้มและปริมาณของแสง UV_C ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงน้อยกว่าในห้องทดสอบจึงสามารถบำบัดสารละลาย MB ได้น้อยกว่า (กาญจนา และนนุช, 2553)



รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสง UV_C & UV_{sun} ต่อการบำบัด MB
ณ ความเข้มข้นต่างๆ

ระยะเวลาการฉายแสง UV 6 ชั่วโมง; แผ่นอะลูมิเนียม A

4.9 ผลการการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบชนิดของน้ำเสียต่างๆ ต่อการบำบัดสีย้อม
ระยะเวลาการฉายแสง UV 6 ชั่วโมง; UV_{Sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง
แผ่นอะคริลิก A

จากรูปที่ 4.11 ทำการศึกษาผลการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ใช้ระยะเวลาการฉายแสง UV 360 นาที โดยมีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง (UV_{Sun}) เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติ ไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ แต่มีข้อเสียคือ การรับแสงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น จึงเลือกศึกษาที่ 360 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์มีแสง UV ชัดเจนจนเกือบลับขอบฟ้า พบว่าการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ ด้วยแผ่นอะคริลิก A เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีแสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโฟโตแคตะไลติกสามารถบำบัดได้น้อย โดยน้ำเสียสังเคราะห์เมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 25 mg/L สามารถบำบัดได้ 30.23 % น้ำเสียสีย้อมจากการซักล้างจริงสามารถบำบัดได้ 30.44 % น้ำเสียสังเคราะห์รีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/L สามารถบำบัดได้ 4.42 % และน้ำเสียสังเคราะห์รีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 mg/L ซึ่งเป็นน้ำเสียสีย้อมที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการดูดซับด้วยกากกาแฟมาแล้วทำให้สามารถสลายได้ตัวเองมากถึง 51.84 % และบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกได้ดีถึง 84.37 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยแสงอาทิตย์สามารถบำบัดได้จริงถือเป็นการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียได้ และจะเห็นว่าน้ำเสียสีย้อมที่ผ่านการบำบัดขั้นพื้นฐาน เช่น การดูดซับมาแล้วจะทำให้การบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการทดลองในโครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู และสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ที่มีแผ่นคะตะลิสต์เคลือบ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแสง UV ซึ่งมีความสำคัญต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

การเตรียมแผ่นคะตะลิสต์จาก TiO_2 และ PEG400 อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลอง คือ ใช้ TiO_2 30 mg ต่อ PEG400 3 mL เมื่อนำไปบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู พบว่าระยะเวลาการฉายแสงที่เหมาะสมต้องใช้เวลา 12 ชั่วโมงหรือ 720 นาที เป็นต้นไป จึงจะเกิดการบำบัดได้มากกว่า 85 % เมื่อใช้ UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง ความเข้มแสง 179 ± 3 Lux ในห้องทดสอบ ความเข้มข้น MB เริ่มต้น 2 mg/L การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ MB เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด MB มีเปอร์เซ็นต์ต่ำลง สำหรับการนำแผ่นคะตะลิสต์ A ที่เตรียมกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าแผ่นคะตะลิสต์สามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง

เมื่อศึกษาผลของค่า pH ของสารละลาย MB ต่อการบำบัด พบว่าที่ pH ของสารละลายปกติ (pH 6) มีประสิทธิภาพเหมาะสมแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่า pH กรณีที่น้ำเสียมีค่า pH อยู่ในช่วง pH 6 - 7 ส่วนการเปรียบเทียบแหล่งกำเนิดแสง UV จากหลอดไฟ (179 ± 3 Lux) กับดวงอาทิตย์ (548×100 Lux) พบว่าเมื่อใช้เวลาฉายแสง 6 ชั่วโมง แสง UV_{Sun} มีความสามารถในการบำบัดได้ 30.23 % และเมื่อเพิ่มความลึก ทำให้มีประสิทธิผลลดลงจากความสามารถของการส่องผ่านของแสง UV ลงบนแผ่นคะตะลิสต์

การบำบัดน้ำเสียจากสีสังเคราะห์ที่พบลู 19 และน้ำเสียจากการซักล้างจริงเทียบกับสารละลายเมทิลีนบลู โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง UV_{Sun} สามารถบำบัดสีได้เพียงเล็กน้อย (< 30 %) แต่ น้ำเสียจากสีสังเคราะห์ที่พบลู 19 ที่ผ่านการดูดซับด้วยกากกาแฟแล้วสามารถบำบัดได้ 84.37 % ดังนั้นการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเหมาะกับการบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment) ซึ่งเป็นการบำบัดที่มีปริมาณสีย้อมน้อยๆ หรือผ่านการบำบัดขั้นพื้นฐานมาก่อนแล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ก่อน – หลังการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสงต้องทำการปิดหลอดไฟชนิด UV_C ก่อนทำการเก็บตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง
2. ก่อน – หลังการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้หลอดไฟชนิด UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสงควรมีการเปิดประตูห้องทดสอบทิ้งไว้ เพื่อระบายอากาศและกลิ่นซึ่งอาจทำให้เกิดอันตราย
3. ควรทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู เช่น การปั่นกววน การเพิ่มพื้นที่ผิวของแผ่นคะตะลิสต์ ปริมาณที่เหมาะสมของ PEG400



เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ สมคิด, วิชา สุภะโกศล, สมลักษณ์ พันธุ์งอก และไพลิน เกาตระการวิวัฒน์. 2554. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมเมทิลไวโอเลตด้วยถ่านกัมมันต์ที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2556. อุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ : สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ.
- กาญจนา ลือพงษ์ และนงนุช ศศิธร. 2553. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตะไลติกร่วมกระบวนการดูดซับ. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- ขนิษฐา หทัยสมิทธิ์ และสมบัติ ฑีฆทรัพย์. 2554. “การจัดการน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยเทคโนโลยีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์.” วารสารการอาชีพและเทคนิคการศึกษา. 1(2): 4-10.
- ขนิษฐา หทัยสมิทธิ์. 2553. ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมทิลินบลู และสีเหลืองโดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบฟิล์มแบบบริแอกทีฟดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Magnetron sputtering). วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิทยาศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏ บ้านสมเด็จเจ้าพระยา.
- จินดาพร บุญวัฒนา. 2558. UV-Visible spectrophotometer. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
- ฉลาด บรรเทา และชูลิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2548. การบำบัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ชัยชนา ธนชยานนท์. 2548. ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap energy) ของวัสดุกิ่งตัวนำ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ฐานความรู้ เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. “เมทิลินบลู.” [Online]. Available: <http://www.chemtrack.org/>. 2547.
- ณัฐกร ราชบุตร, นิชชา แก้วเสียง, นิชา มุริจันทร์ และน้ำเพชร สุวรรณประเสริฐ. 2555. การบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีสีรีแอกทีฟด้วยวิธีการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น. วิทยานิพนธ์ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ธิดารัตน์ สิวฒนาถาวรชัย และชนิดดา รังไสว. 2554. ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมรีแอกทีฟและสีย้อมเบสิกด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ. วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยรังสิต.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นวพันธ์ ชัยนิกิจ. 2550. อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บุษบา พิพิธวัฒนวงศ์, ปทุมพร เชิดฉาย และสุปราณี โคลตประโคน. 2552. การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ภาควิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พฤกระยา พงศ์ยี่หล้า. 2555. การบำบัดแอมโมเนียในอากาศเสียจากโรงงานผลิตน้ำยางชั้นด้วยปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติก. วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พลอย สุจริตธรรม, วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, มัณฑนา สุวรรณ และสิทธิสุนทร สุโพธิณะ. 2555. ประสิทธิภาพของกระดาษกรองใยแก้วเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารโพลูอิน โดยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.
- รชานนท์ กลอนดอน. 2556. การกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก โดยเคลือบสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์บนผิวเครื่องปั้นดินเผาต้านเกวียน. วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก. ปริญญาโทวิทยาศาสตรบัณฑิต. สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสาขาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศูนย์ตรวจวิเคราะห์โอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. “รังสีอัลตราไวโอเล็ต.” [Online]. Available: <http://www.ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm>. 2558.
- สายรุ้ง นพขุนทด. 2554. กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- สีหราช ลาภเกิน, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ และภารดี ช่วยบำรุง. 2556. สารยึดติดที่เหมาะสมกับการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สำหรับกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- แสวง เกิดประทุม. 2556. รังสีอัลตราไวโอเล็ต. นักวิชาการอาวุโส. ฝ่ายวิศวกรรม. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

- อดิพล สว่างอารมณ์. 2557. ศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตไลติก. สาขาวัสดุศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- Akyol, A. and Bayramoglu, M. 2008. **The degradation of an azo dye in a batch slurry photocatalytic reactor.** Chemical Engineering and Processing 47. 2150–2156
- Ammar, H., Lachheb, H., Ksibi, M., Elaloui, E., Guillard, C. and Herrmann, J. 2005. **Photocatalytic degradation pathway of methylene blue in water.** Applied Catalysis B: Environmental, Volume 39, Issue 1, 8 November 2005, Pages 75-90
- Lakshmi, S., Renganathan, R. and Fujita, S. 2004. **Study on TiO₂-mediated photocatalytic degradation of methylene blue.** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 88, Issues 2–3, 31 May 2004, Pages 163-167
- Kyung-Jun, H., Jae-Wook, L., Wang-Geun, S., Hee Dong, J., Se-Il, L. and Seung-Joon, Y. 2012. **Adsorption and photocatalysis of nanocrystalline TiO₂ particles prepared by sol-gel method for methylene blue degradation.** Advanced Powder Technology, Volume 23, Issue 3, May 2012, Pages 414-418
- Zhe-Qi, L., LongWang, H., YunZi, L., JunZhang, J., ShanZhang, L. 2015. **Preparation and photocatalytic performance of magnetic TiO₂-Fe₃O₄/ graphene (RGO) composites under VIS-light irradiation.** Ceramics International, Volume 14, Issue 9, Part A, November 2015, Pages 10634-10643



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

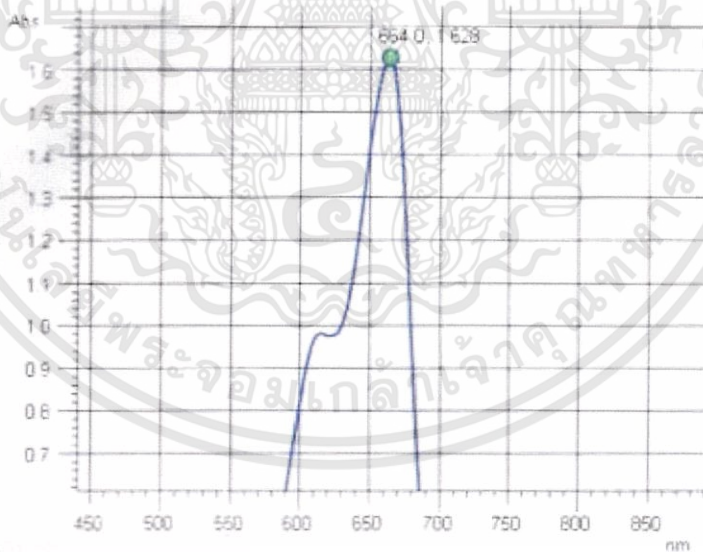
ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐานสารละลายชนิดต่างๆ

กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู

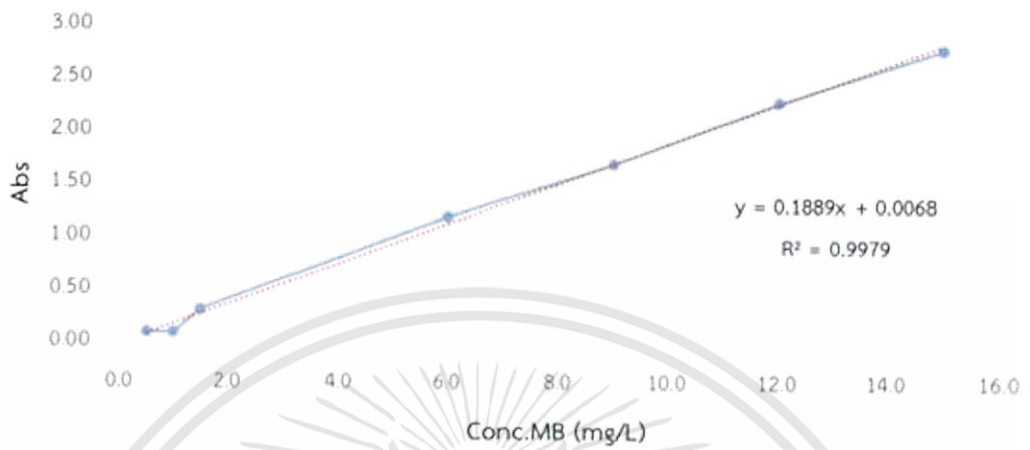
การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue)

เตรียมสารละลายสต็อกเมทิลีนบลูความเข้มข้น 100 mg/L โดยชั่งเมทิลีนบลูมา 25 mg ปรับด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 250 mL จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้มา 25 mL แล้วปรับด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 50 mL ได้เป็นสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 50 mg/L ปิเปิดสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูดังตารางที่ ก-1 ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นแล้วทำการสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายเมทิลีนบลูดังรูปที่ ก-1 พบว่าที่ความยาวคลื่นสูงสุดในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูคือ 665 nm และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานจะได้กราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลีนบลูในการทดลอง

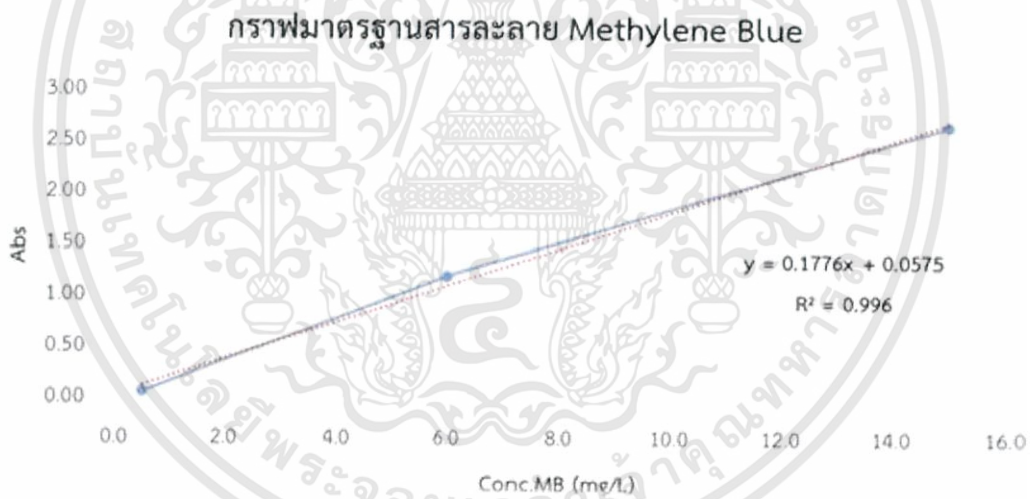


รูปที่ ก-1 กราฟสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายเมทิลีนบลู

กราฟมาตรฐานสารละลาย Methylene Blue



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 1



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ตรวจสอบความถูกต้องของกราฟมาตรฐานที่ใช้ด้วยการเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นเท่ากับค่ากึ่งกลางของกราฟมาตรฐาน และนำมาวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น ณ เวลาต่างๆ โดยหาค่า Initial Calibration Verification Standrad (ICVS) ต้องไม่เกิน 10% และ Continuing Calibration Verification Standrad (CCVS) ซึ่งจะต้องไม่เกิน 15%

1. หาค่า ICVS

$$\text{จากกราฟมาตรฐานครั้งที่ 1 (รูป ก-2) จะได้สมการ } y = 0.1889x + 0.0068$$

$$R^2 = 0.9979$$

สมมติ สารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานกึ่งกลาง (6 mg/L) มีค่า Abs = 1.205

$$\text{คิดเป็นความเข้มข้นได้ } 1.205 = 0.1889x + 0.0068$$

$$x = 6.34 \text{ mg/L}$$

และทำการวัด Abs ของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานกึ่งกลาง (6 mg/L) เริ่มต้นการทดลอง

$$= 1.147$$

$$\text{คิดเป็นความเข้มข้น} = 6.04 \text{ mg/L}$$

$$\text{หาค่า ICVS} = \frac{(C_s - C_{s0}) \times 100}{C_s}$$

$$= \frac{(6.34 - 6.04) \times 100}{6.34}$$

$$= 4.79$$

เมื่อค่า ICVS เกิน 10 % ต้องทำกราฟมาตรฐานใหม่

2. หาค่า CCVS

$$\text{จากกราฟมาตรฐานครั้งที่ 1 (รูป ก-2) จะได้สมการ } y = 0.1889x + 0.0068$$

$$R^2 = 0.9979$$

สมมติ สารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานกึ่งกลาง (6 mg/L) มีค่า Abs = 1.205

$$\text{คิดเป็นความเข้มข้นได้ } 1.205 = 0.1889x + 0.0068$$

$$x = 6.34 \text{ mg/L}$$

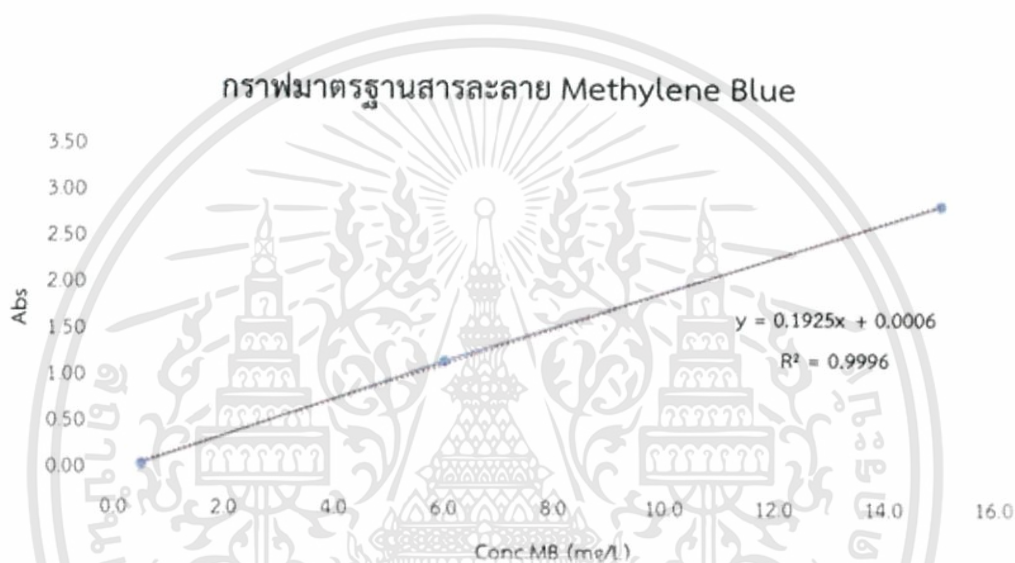
และทำการวัด Abs ของสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐานกึ่งกลาง (6 mg/L) ณ เวลาการทดลอง

$$= 1.158$$

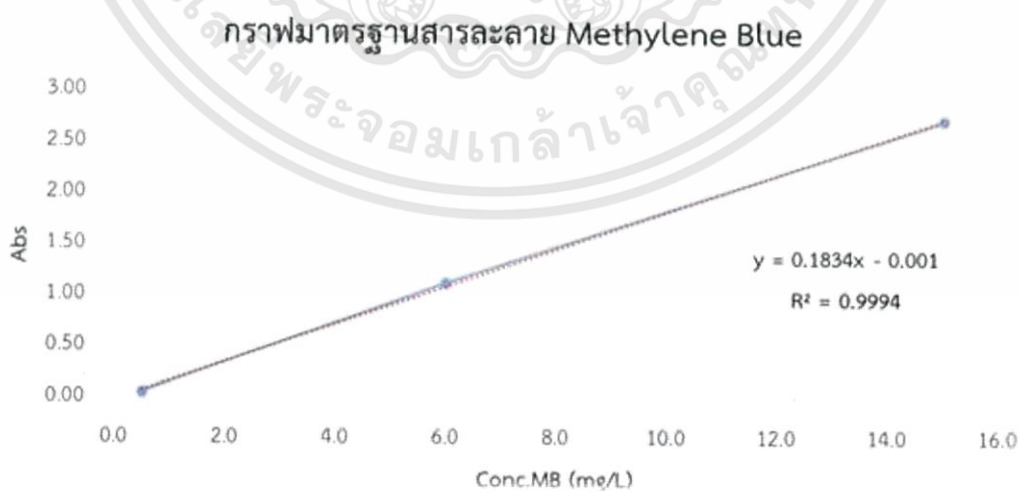
$$\text{คิดเป็นความเข้มข้น} = 6.09 \text{ mg/L}$$

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่า CCVS} &= \frac{(C_s - C_{s0}) \times 100}{C_s} \\
 &= \frac{(6.34 - 6.09) \times 100}{6.34} \\
 &= 3.88
 \end{aligned}$$

เมื่อค่า CCVS เกิน 15 % ต้องทำกราฟมาตรฐานใหม่



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 3



รูปที่ ก-5 กราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ต้องการ (mg/L)	ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู เข้มข้น 50 mg/L (mL)
0.5	0.25
1.0	0.50
1.5	0.75
3.0	1.50
6.0	3.00
9.0	4.50
12.0	6.00
15.0	7.50

คำนวณการเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 mg/L

สารละลาย 1000 mL มีเมทิลีนบลู 0.100 g

สารละลาย 250 mL มีเมทิลีนบลู 0.025 g

ดังนั้น ชั่งเมทิลีนบลู 0.025 g ละลายในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 50 mg/L

จากความสัมพันธ์ $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ C_1 เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

C_2 เป็นความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

V_1 เป็นปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

V_2 เป็นปริมาตรของสารละลายที่ต้องใช้

ตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูจากความเข้มข้น 100 mg/L เป็นความเข้มข้น 50 mg/L ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 mL จะต้องปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 mg/L มาดังนี้

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$\text{จะได้ } 50 \times 50 = 100 \times V_2$$

$$V_2 = 25 \text{ mL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 25 mL ในขวดปรับปริมาตร ขนาด 50 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 6.0, 9.0, 12.0 และ 15 mg/L

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 0.5 mg/L ในขวดปรับปริมาตร ขนาด 25 mL

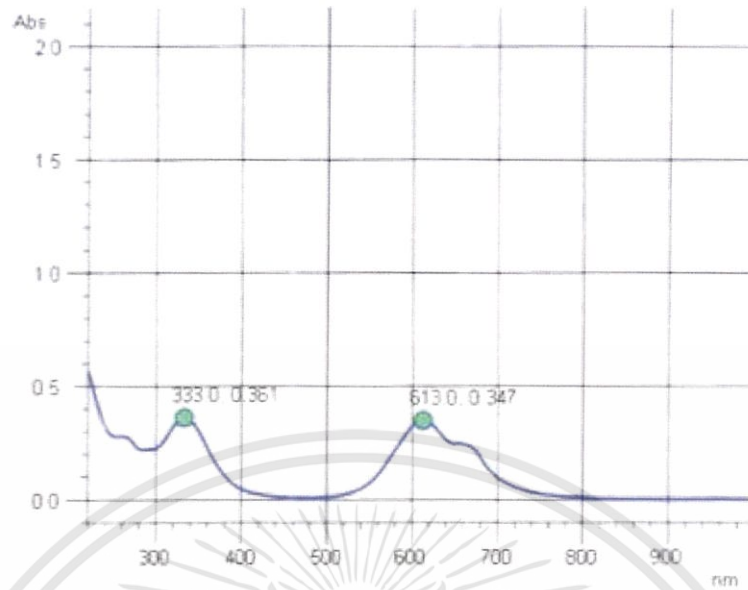
$$\begin{aligned} \text{จากความสัมพันธ์} \quad C_1V_1 &= C_2V_2 \\ \text{จะได้} \quad 0.5 \times 25 &= 50 \times V_2 \\ V_1 &= 0.25 \text{ mL} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 0.25 mL ใส่ในขวดปรับ ปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และสำหรับสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ ความเข้มข้นต่างๆ คำนวณเช่นเดียวกับข้างต้นดังตารางที่ ก-1

กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมทางการค้า

การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมทางการค้า

เตรียมสารละลายสีย้อมทางการค้าความเข้มข้น 100 mg/L โดยชั่งสีย้อมทางการค้าสีฟ้ามา 25 mg ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 250 mL จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้มา 25 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยน้ำกลั่น ได้เป็นสารละลายเข้มข้น 50 mg/L ปิเปต สารละลายมาตรฐานสีย้อมทางการค้าดังตารางที่ ก-2 ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL และปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ แล้วนำไปสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารสีย้อมทางการค้า ดัง รูปที่ ก-6 พบว่าที่ความยาวคลื่นสูงสุดในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมทางการค้าคือ 615 nm และวัดค่าการดูดกลืนแสงจะได้กราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสีย้อม ทางการค้าในการทดลอง



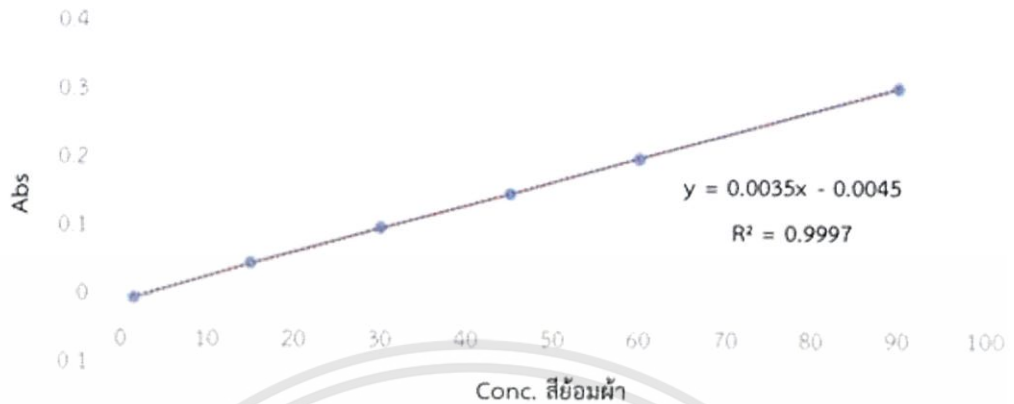
รูปที่ ก-6 กราฟสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า



รูปที่ ก-7 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟมาตรฐานสีย้อมผ้า



รูปที่ ก-8 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้าทางการค้า ครั้งที่ 2

ตารางที่ ก-2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมทางการค้า

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมทางการค้า ที่ต้องการ (mg/L)	ปริมาตรของสารละลายสีย้อม ทางการค้าเข้มข้น 50 mg/L (mL)
0.5	0.25
1.0	0.50
1.5	0.75
3.0	1.50
6.0	3.00
9.0	4.50
12.0	6.00
15.0	7.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณการเตรียมสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้า

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 100 mg/L

สารละลาย 1000 mL มีสี่ย้อมทางการค้า 0.100 g

สารละลาย 250 mL มีสี่ย้อมทางการค้า 0.025 g

ดังนั้น ซี่งสี่ย้อมทางการค้า 0.025 g ละลายในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 50 mg/L

จากความสัมพันธ์ $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ C_1 เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

C_2 เป็นความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น

V_1 เป็นปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ

V_2 เป็นปริมาตรของสารละลายที่ต้องใช้

ตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียมสารละลายสี่ย้อมทางการค้าจากความเข้มข้น 100 mg/L เป็นความเข้มข้น 50 mg/L ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 mL จะต้องปิเปตสารละลายสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 100 mg/L มาดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad 50 \times 50 &= 100 V_2 \\ V_1 &= 25 \text{ mL} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 25 mL ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3. เตรียมสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 6.0, 9.0, 12.0 และ 15 mg/L

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 0.5 mg/L ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL

จากความสัมพันธ์ $C_1V_1 = C_2V_2$

$$\text{จะได้} \quad 0.5 \times 25 = 50 V_2$$

$$V_1 = 0.25 \text{ mL}$$

ดังนั้น ปิเปตสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 0.25 mL ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น สำหรับสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมทางการค้าที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวนเช่นเดียวกับข้างต้นดังตารางที่ ก-2

กราฟมาตรฐานรีแอกทีฟบลู 19

การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 (Reactive blue 19)

เตรียมสารละลายสต็อกรีแอกทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 1000 mg/L โดยชั่งรีแอกทีฟบลูมา 1.0 g ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 1000 mL จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้มา 25 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 50 mL ด้วยน้ำกลั่น ได้เป็นสารละลายเข้มข้น 50 mg/L ปิเปิดสารละลายมาตรฐานรีแอกทีฟบลู 19 ดังตารางที่ ก-3 ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปสแกนหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 และวัดค่าการดูดกลืนแสงจะได้กราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายรีแอกทีฟบลู 19 ในการทดลอง



รูปที่ ก-9 กราฟมาตรฐานสารละลายรีแอกทีฟบลู 19

ตารางที่ ก-3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟลู 19

ความเข้มข้นของสารละลายสีรีแอกทีฟลูที่ต้องการ (mg/L)	ปริมาตรของสารละลายสีรีแอกทีฟลู เข้มข้น 500 mg/L (mL)
50	2.5
100	5.0
150	7.5
200	10.0
250	12.5
300	15.0
350	17.5

คำวนการเตรียมสารละลายมาตรฐานรีแอกทีฟลู 19

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานรีแอกทีฟลู 19 เข้มข้น 500 mg/L

สารละลาย 1000 mL มีรีแอกทีฟลู 0.5 g

สารละลาย 250 mL มีรีแอกทีฟลู 0.125 g

ดังนั้น ซังรีแอกทีฟลู 0.125 g ละลายในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟลูเข้มข้น 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 mg/L

ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟลูเข้มข้น 500 mg/L ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL

จากความสัมพันธ์

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

จะได้

$$500 \times 25 = 500 V_2$$

$$V_1 = 2.5 \text{ mL}$$

ดังนั้น ปีเปตสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟลูเข้มข้น 500 mg/L ปริมาตร 2.5 mL ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น สำหรับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟลู 19 ที่ความเข้มข้นต่างๆ จำนวนเช่นเดียวกับข้างต้นดังตารางที่ ก-3

ภาคผนวก ข

การบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูและสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ

ตารางที่ ข-1 ผลของระยะเวลาการฉายแสงต่อการบำบัด MB 2 mg/L ด้วยแผ่นอะครีลิก A

30 mg เวลา (นาที)	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
		จุดเบลงค์	จุดควบคุม	จุดทดลอง	จุดเบลงค์	จุดควบคุม	จุดทดลอง	
				\bar{X}			\bar{X}	ค่าที่แท้จริง
0	28.5	1.56	1.53	1.76				
30	29.7	1.51	1.54	1.67	3.09	-0.35	4.81	5.16
60	30.2	1.48	1.55	1.60	5.15	-1.05	9.16	10.21
90	30.2	1.46	1.46	1.41	6.19	4.53	19.91	15.38
120	30.9	1.42	1.47	1.22	8.59	4.18	30.50	26.32
150	30.2	1.38	1.44	1.12	11.00	5.92	36.55	30.63
180	30.2	1.36	1.42	0.99	12.37	7.67	43.88	36.21
360	31.4	1.11	1.23	0.50	28.52	19.51	71.88	52.36
540	31.2	1.09	1.23	0.26	30.24	19.86	85.01	65.15
720	31.0	1.02	1.13	0.12	34.36	26.13	92.92	66.79
900	31.2	0.95	1.11	0.05	38.83	27.53	97.37	69.85
1080	31.4	0.96	0.99	0.00	38.14	35.54	99.81	64.27
1260	30.9	0.96	0.92	-0.01	38.14	39.72	100.84	61.12
1440	30.1	0.935	0.839	0.01	39.86	45.30	99.31	54.02

ตารางที่ ข-2 ผลของระยะเวลาการฉายแสงต่อการบำบัด MB 2 mg/L ด้วยแผ่นอะครีลิก B

70 mg เวลา (นาที)	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
		จุดเบลงค์	จุดควบคุม	จุดทดลอง	จุดเบลงค์	จุดควบคุม	จุดทดลอง	
				\bar{X}			\bar{X}	ค่าที่แท้จริง
0	29.2	1.89	1.67	1.91				
30	29.7	1.97	1.74	1.81	-4.53	-4.17	5.14	9.31
60	30.4	1.91	1.77	1.71	-1.42	-6.09	10.35	16.44
90	31.4	1.96	1.74	1.59	-3.97	-4.17	16.69	20.86
120	31.2	1.95	1.75	1.54	-3.12	-4.81	19.14	23.95
150	31.2	1.96	1.74	1.35	-3.68	-4.49	29.03	33.52
180	31.9	1.91	1.71	1.25	-1.13	-2.56	34.61	37.18
360	31.7	1.92	1.74	0.83	-1.70	-4.49	56.38	60.87
540	33.3	1.95	1.70	0.56	-3.12	-1.92	70.49	72.41
720	33.6	1.84	1.72	0.27	2.27	-2.88	85.91	88.80
900	32.2	1.84	1.69	0.16	2.27	-1.28	91.71	92.99
1080	32.0	1.87	1.69	0.12	0.85	-1.28	93.87	95.15
1260	32.7	1.87	1.64	0.09	0.85	1.92	95.26	93.34
1440	30.5	1.89	1.59	0.09	0.00	4.49	95.25	90.76

หมายเหตุ : [MB] = 2 mg/L, V_{MB} = 30 mL, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณของการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 2 mg/L โดยใช้ UV_C ร่วมกับแผ่นอะคริลิกที่ 30 mg และ 70 mg

1. การหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (Concentration of Methylene blue)

การหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูโดยการคำนวณจากสมการกราฟมาตรฐาน

$$y = 0.1870909x$$

เมื่อ y เป็นค่าการดูดกลืนแสง (Abs)

x เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (Conc.)

ชุด Blank ที่แผ่นอะคริลิก 30 mg ณ เวลา 0 นาที

$$\text{จะได้ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)} = 0.291$$

$$0.291 = 0.1870909x$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (x)} = 0.291/0.1870909$$

$$= 1.56 \text{ mg/L}$$

ชุด Blank ที่แผ่นอะคริลิก 30 mg ณ เวลา 30 นาที

$$\text{จะได้ ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)} = 0.282$$

$$0.282 = 0.1870909x$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (x)} = 0.282/0.1870909$$

$$= 1.51 \text{ mg/L}$$

2. การหาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู (% Removal)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0}$$

$$= \frac{(1.56 - 1.51) \times 100}{1.56}$$

$$= 3.21 \%$$

หมายเหตุ : การคำนวณในชุด Experimental ก็เช่นกัน แต่ % การบำบัด จะหักลบกับชุดควบคุม เพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของ TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ผลของระยะเวลาการฉายแสงต่อการบำบัด MB 25 mg/L ด้วยแผ่นอะคริลิก A

30 mg เวลา (นาที)	Temp (°C)	ความเข้มข้น				% การบำบัด			
		เจือจาง	ชุดเบสงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ชุดเบสงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ค่าที่แท้จริง
0	27.5	10	21.72	21.77	23.73				
30	27.9	10	20.13	19.76	21.25	7.31	9.24	10.55	1.31
60	28.2	10	19.87	20.40	20.15	8.53	6.32	15.13	8.81
90	28.2	10	19.87	20.50	18.47	8.53	5.83	22.03	16.19
120	28.3	10	19.45	19.87	17.10	10.48	8.75	27.95	19.20
150	29.2	10	19.45	19.87	15.67	10.48	8.75	33.93	25.17
180	29.4	10	19.34	19.76	13.87	10.97	9.24	41.49	32.25
360	31.2	10	19.18	19.45	9.16	11.70	10.70	61.08	50.38
540	32.4	10	18.55	18.12	4.69	14.62	16.78	80.03	63.26
720	31.1	10	18.23	18.49	3.21	16.09	15.07	86.39	71.32
900	30.7	10	17.75	19.60	5.98	18.28	9.97	74.81	64.84
1080	30.6	10	19.45	21.67	7.09	10.48	0.49	70.37	69.89
1260	30.0	10	18.65	18.07	2.88	14.14	17.02	87.74	70.72
1440	30.5	10	17.01	15.79	1.89	21.69	27.47	92.01	64.54

หมายเหตุ : [MB] = 25 mg/L, V_{MB} = 30 mL, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ ข-4 ผลของระยะเวลาการฉายแสงต่อการบำบัด MB 25 mg/L ด้วยแผ่นอะคริลิก B

30 mg Time (min)	Temp (°C)	ความเข้มข้น				% การบำบัด			
		เจือจาง	ชุดเบสงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ชุดเบสงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ค่าที่แท้จริง
0	28.5	10	24.87	21.68					
30	29.7	10	21.72	21.37	21.55	12.65	1.41	6.14	4.73
60	30.2	10	20.14	20.69	20.61	19.03	4.54	13.53	9.04
90	30.2	10	19.62	17.37	18.49	21.12	19.86	20.02	0.16
120	30.9	10	19.46	17.48	18.47	21.76	19.37	24.00	4.63
150	30.2	10	19.56	17.42	18.49	21.33	19.61	33.23	13.62
180	30.2	10	19.08	17.10	18.09	23.27	21.09	38.98	17.89
360	31.4	10	19.19	17.42	18.31	22.84	19.61	60.06	40.39
540	31.2	10	19.46	17.00	18.23	21.76	21.59	77.56	55.97
720	31.0	10	18.44	17.16	17.80	25.85	20.85	92.92	72.07
900	31.2	10	18.44	16.89	17.67	25.85	22.08	93.21	71.13
1080	31.4	10	18.71	16.89	17.80	24.77	22.08	95.33	73.25
1260	30.9	10	18.71	16.36	17.53	24.77	24.55	97.44	72.89
1440	30.1	10	18.87	15.93	17.40	24.13	26.52	97.54	71.02

หมายเหตุ : [MB] = 25 mg/L, V_{MB} = 30 mL, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณของการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 25 mg/L โดยใช้ UV_C ร่วมกับแผ่นอะคริลิกที่ 30 mg และ 70 mg

1. การหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (Concentration of Methylene blue)
การหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูโดยการคำนวณจากสมการกราฟมาตรฐาน

$$y = 0.1870909x$$

เมื่อ y เป็นค่าการดูดกลืนแสง (Abs)

x เป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (Conc.)

ชุด Blank ที่แผ่นอะคริลิก 30 mg ณ เวลา 0 นาที

$$\text{จะได้ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)} = 0.411$$

$$0.411 = 0.1884935x$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (x)} = 0.411/0.1884935$$

$$= 2.18 \text{ mg/L}$$

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลูสูงเกินที่เครื่อง UV - Vis จะวัดได้จึงทำการเจือจาง

$$10 \text{ เท่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู} = 2.18 \times 10$$

$$= 21.80 \text{ mg/L}$$

ชุด Blank ที่แผ่นอะคริลิก 30 mg ณ เวลา 30 นาที

$$\text{จะได้ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)} = 0.381$$

$$0.381 = 0.1884935x$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (x)} = 0.381/0.1884935$$

$$= 2.02 \text{ mg/L}$$

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลูสูงเกินที่เครื่อง UV - Vis จะวัดได้จึงทำการเจือจาง

$$10 \text{ เท่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู} = 2.02 \times 10$$

$$= 20.20 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู (% Removal)

$$\begin{aligned} \% \text{ Removal} &= \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \\ &= \frac{(21.80 - 20.20)}{21.80} \times 100 \\ &= 7.34 \% \end{aligned}$$

ตารางที่ ข-5 ผลของอันดับปฏิกิริยาของ MB

ความเข้มข้น MB (mg/L)	order	k	R ²
2	0	-0.0024	0.9236
	1	-0.0016	0.9977
	2	0.0096	0.8753
25	0	-0.0284	0.9423
	1	-0.0012	0.9962
	2	0.0004	0.9485

หมายเหตุ : $V_{MB} = 30$ mL, ระยะเวลาการฉายแสง UV = 720 นาที, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะคริลิก A

ตารางที่ ข-6 ผลของความเข้มข้นต่างๆ ของ MB ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	pH stock	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
						\bar{X}			\bar{X}	
2	0	5.70	30.9	1.97	1.88	1.81				
	60		31.3	1.92	1.70	1.74	2.42	9.60	4.07	0.00
	720	6.14	32.5	1.91	1.82	0.22	2.96	3.11	88.10	84.99
5	0	5.3	30.3	4.86	5.03	4.92				
	60		30.8	5.02	5.10	4.97	-3.24	-1.34	0.11	0.11
	720	5.57	33.5	4.81	5.22	1.07	1.04	-3.69	78.28	0.00
15	0	5.48	31.5	10.78	11.35	10.73				
	60		32.1	9.38	11.01	7.82	13.05	2.98	27.10	24.13
	720	5.96	31.0	10.61	10.28	0.00	1.57	9.43	100.00	90.57
25	0	6.15	30.5	23.46	21.08	22.65				
	60		31.9	21.61	20.66	19.12	7.90	2.01	15.59	13.58
	720	5.98	32.2	21.61	20.34	2.53	7.90	3.52	88.82	85.30
35	0	6.75	28.2	32.66	32.22	34.82				
	60		30.8	34.13	33.53	29.88	-4.51	-4.06	14.19	14.19
	720	6.03	31.4	34.68	37.24	5.76	-6.18	-15.57	83.41	83.41
50	0	4.03	30.4	52.62	52.34	51.04				
	60		31.1	52.17	50.59	46.29	0.86	3.34	9.37	6.03
	720	4.00	32.1	52.00	53.24	13.54	1.18	-1.72	73.45	73.45

หมายเหตุ : [MB] = $V_{MB} = 30$ mL, ระยะเวลาการฉายแสง UV = 720 นาที, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะคริลิก A รอบที่ 1

ตารางที่ ข-7 ผลของการใช้แผ่นอะตะลิสต์ A ซ้ำรอบที่ 2 ต่อการบำบัด MB ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	pH stock	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
						\bar{X}			\bar{X}	
2	0	6.37	30.6	1.44	1.48	1.68				
	60		30.2	1.33	1.14	1.49	7.80	22.86	10.94	0.00
	720	7.12	31.7	1.28	1.25	0.17	11.70	15.24	89.95	74.71
5	0	6.35	31.4	4.55	4.45	4.56				
	60		32.1	4.89	4.85	4.28	-7.55	-8.94	6.38	6.38
	720	6.06	32.9	4.57	5.04	0.86	-0.48	-13.22	81.02	81.02
15	0	4.54	31.1	13.88	13.15	12.30				
	60		31.7	12.81	11.80	9.94	7.71	10.28	19.27	8.99
	720	5.77	33.3	12.70	10.73	0.00	8.52	18.42	100.00	81.58
25	0	5.57	31.3	17.31	17.48	18.29				
	60		32.5	13.37	14.56	15.78	22.76	16.75	13.54	0.00
	720	5.57	32.9	17.99	16.30	0.87	0.00	6.76	95.14	88.38
35	0	5.76	29.5	34.19	33.37	32.61				
	60		30.7	35.93	34.51	30.48	0.00	0.00	6.50	6.50
	720	5.66	31.8	35.17	34.19	4.73	0.00	0.00	85.53	85.53
50	0	4.88	32.4	47.49	48.00	45.54				
	60		33.2	47.04	46.76	38.71	0.95	2.58	15.14	12.56
	720	5.91	31.9	46.14	50.31	11.08	2.85	-4.81	75.77	75.77

หมายเหตุ : $V_{MB} = 30$ mL, ระยะเวลาการฉายแสง UV = 720 นาที, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ ข-8 ผลของการใช้แผ่นอะตะลิสต์ A ซ้ำรอบที่ 3 ต่อการบำบัด MB ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	pH stock	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
						\bar{X}			\bar{X}	
2	0	6.34	29.1	1.62	1.41	1.51				
	720	7.01	31.6	1.57	1.11	0.43	3.29	21.21	71.14	49.93
25	0	5.45	29.9	22.55	20.16	21.22				
	720	5.69	30.4	21.06	21.49	9.46	6.59	0.00	55.42	55.42

หมายเหตุ : $V_{MB} = 30$ mL, ระยะเวลาการฉายแสง UV = 720 นาที, UV_C เป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ ข-9 ผลของ pH ต่างๆ ต่อการบำบัด MB

pH	30 mg เวลา (นาที)	pH stock	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
						\bar{X}			\bar{X}	
3	0	3.06	31.5	19.79	21.37	20.27				
	60		31.9	19.68	17.34	16.65	0.55	18.88	17.55	0.00
	720	3.08	32.3	19.79	17.50	4.65	0.00	18.11	76.97	58.86
6	0	5.57	31.3	17.31	17.48	18.29				
	60		32.5	13.37	14.56	15.78	22.76	16.75	13.54	0.00
	720	5.57	32.9	17.99	16.30	0.87	0.00	6.76	95.14	88.38
7	0	7.01	30.4	20.12	20.67	21.21				
	60		32.2	18.87	20.07	19.34	6.23	2.90	8.88	5.98
	720	5.37	31.0	18.81	22.41	2.33	6.50	0.00	89.10	89.10
11	0	11.08	29.9	20.56	16.58	18.36				
	60		30.1	16.68	13.14	11.69	18.85	20.72	35.69	14.97
	720	10.65	31.9	16.52	19.08	3.80	19.63	-15.13	79.28	79.28

หมายเหตุ : [MB] = 25 mg/L, V_{MB} = 30 mL, ระยะเวลาการฉายแสง UV = 720 นาที, UV_c เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะคริลิก A

ตารางที่ ข-10 ผลของปริมาณ MB 30 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	ความเข้มแสง (Lux)	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
						\bar{X}			\bar{X}	
2	0	630x100	33	2.09	1.99	1.93				
	60		34	1.94	1.11	1.22	7.05	44.11	36.65	0.00
	180	1300x100	34	1.86	0.62	0.34	10.70	69.04	82.49	13.45
	360	557x100	32	1.88	2.27	0.06	10.18	0.00	96.79	96.79
25	0	630x100	33	25.25	23.34	23.21				
	60		34	23.34	13.63	11.80	7.56	41.59	48.59	7.01
	180	1300x100	34	22.74	5.83	3.22	9.94	75.00	86.39	11.39
	360	557x100	32	23.34	3.33	0.35	7.56	85.75	98.47	12.72

หมายเหตุ : ระยะเวลาการฉายแสง UV = 360 นาที, UV_{Sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะคริลิก A

ตารางที่ ข-11 ผลของปริมาณ MB 50 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	ความเข้มแสง (Lux)	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ค่าที่แท้จริง
2	0	630x100	33	2.16	2.05	1.83				
	60		34	2.03	1.16	1.32	6.30	43.35	27.91	0.00
	180	1300x100	34	1.89	0.64	0.56	12.59	68.88	69.51	0.62
	360	557x100	32	1.95	0.22	0.18	9.82	89.36	90.10	0.74
25	0	630x100	33	25.03	25.68	20.32				
	60		34	24.37	16.09	16.07	2.61	37.37	20.41	0.00
	180	1300x100	34	23.50	7.74	5.18	6.10	69.85	73.53	3.68
	360	557x100	32	23.72	4.31	1.42	5.23	83.23	92.74	9.52

หมายเหตุ : ระยะเวลาการฉายแสง UV = 360 นาที, UV_{Sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะลูมิเนียม A

ตารางที่ ข-12 ผลของปริมาณ MB 100 mL ณ ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ความเข้มข้น (mg/L)	30 mg เวลา (นาที)	ความเข้มแสง (Lux)	Temp (°C)	ความเข้มข้น			% การบำบัด			
				ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ชุดแปลงค์	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง \bar{X}	ค่าที่แท้จริง
2	0	630x100	33	2.16	1.90	2.07				
	60		34	2.01	1.33	1.57	6.82	29.89	24.04	0.00
	180	1300x100	34	1.83	0.49	0.90	15.40	74.14	56.64	0.00
	360	557x100	32	1.92	0.05	0.35	11.11	97.41	83.60	0.00
25	0	630x100	33	25.52	21.16	24.26				
	60		34	24.70	19.52	20.41	3.21	7.73	14.71	6.98
	180	1300x100	34	24.59	6.87	12.61	3.63	67.53	48.55	0.00
	360	557x100	32	23.34	1.15	5.54	8.55	94.59	77.59	0.00

หมายเหตุ : ระยะเวลาการฉายแสง UV = 360 นาที, UV_{Sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะลูมิเนียม A

ตารางที่ ข-13 การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียชนิดต่างๆ

ชนิดน้ำเสีย	30 mg เวลา (นาท)	ความเข้มแสง (Lux)	Temp (°C)	ค่าเฉลี่ย			% การบำบัด			
				จุดแสง	จุดควบคุม	จุดทดลอง	จุดแสง	จุดควบคุม	จุดทดลอง	ค่าที่แท้จริง
น้ำเสียสังเคราะห์ MB เข้มข้น 25 mg/L	0	1110x100	34	26.19	2.45	2.76				
	60	1094x100	32	22.37	2.24	2.13	14.58	8.89	22.79	13.90
	180	846x100	33	21.98	2.51	2.47	16.04	0.00	10.64	10.64
	360	791x10	34	22.86	2.78	1.92	12.71	0.00	30.23	30.23
น้ำเสียสังเคราะห์แอกทิฟบลู 19 เข้มข้น 50 mg/L	0	1110x100	34	47.05	46.86	46.08				
	60	1094x100	32	45.10	48.44	47.62	4.13	0.00	0.00	0.00
	180	846x100	33	43.90	52.51	48.13	6.69	0.00	0.00	0.00
	360	791x10	34	41.31	55.10	44.04	12.20	0.00	4.42	4.42
น้ำเสียสังเคราะห์แอกทิฟบลู 19 เข้มข้น 20 mg/L	0	1110x100	34	9.82	5.29	6.04				
	60	1094x100	32	5.29	5.94	4.32	46.18	0.00	28.54	28.54
	180	846x100	33	5.19	1.95	2.36	47.13	63.05	60.87	0.00
	360	791x10	34	4.73	1.86	0.94	51.84	64.80	84.37	19.57
น้ำเสียย้อมจากการซักล้างจริง	0	1110x100	34	58.69	61.56	60.76				
	60	1094x100	32	41.47	64.34	52.46	0.00	0.00	13.65	13.65
	180	846x100	33	73.14	70.73	50.08	0.00	0.00	17.57	17.57
	360	791x10	34	85.69	65.27	42.27	0.00	0.00	30.44	30.44

หมายเหตุ : ระยะเวลาการฉายแสง UV = 360 นาที, UV_{Sun} เป็นแหล่งกำเนิดแสง, แผ่นอะคริลิก A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

หลักการและวิธีใช้เครื่องมือวิเคราะห์

หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (จินดาภา, 2558)

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง และค่า intensity ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่าน หรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ สมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่าน หรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิด และปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ ค-1 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น GENESYS 10S UV – Vis

ส่วนประกอบของเครื่อง UV – Vis Spectrophotometer

1. **Light source** แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง และคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H₂ และ D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโตรสโกปี UV molecular absorption และช่วง visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโตรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

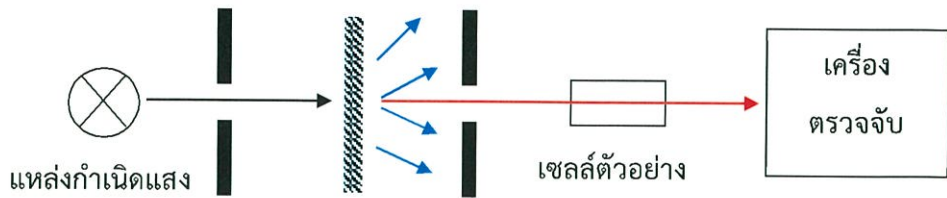
2. **Monochromator** ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสง โดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติกให้เป็นแสงโมนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆหรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ กระจกสี ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติง (Grating)

3. **Cell sample** เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวตต์ (Cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. **Detector** ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบันคือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)

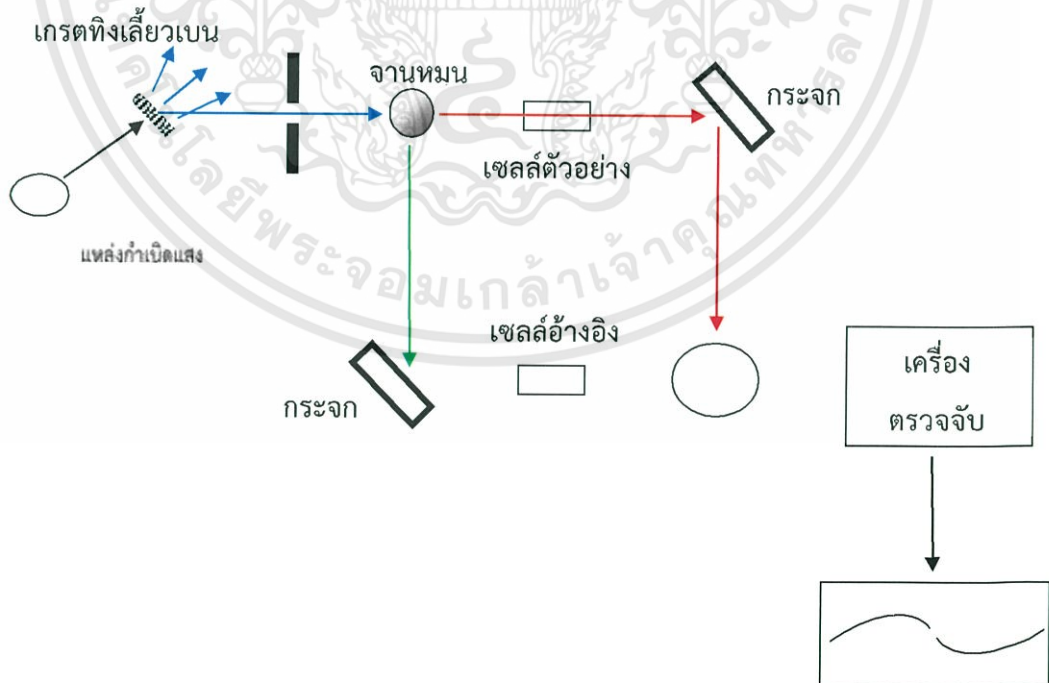
ชนิดของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1. **Single-Beam spectrophotometer** (รูปที่ ค-2) เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์ โมนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจาก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลักกัน



รูปที่ ค-2 Single-Beam spectrophotometer

2. Double-Beam Spectrophotometer (รูปที่ ค-3) ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่

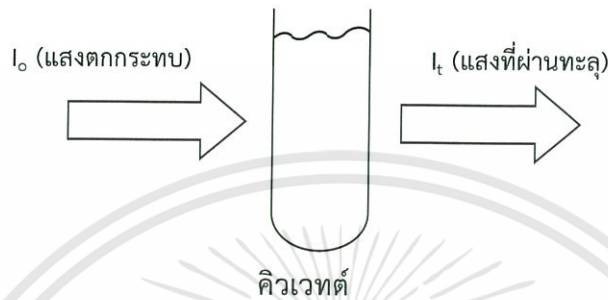


รูปที่ ค-3 Double-Beam spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎการดูดกลืนแสง

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน



รูปที่ ค-4 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)

$$I_t = I_0 \times 10^{-kt} \quad (\text{ค-1})$$

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กฎของเบียร์ (ค.ศ.1852) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งเมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) จะได้สมการดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc} \quad (\text{ค-2})$$

เมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's law) โดยการบวกสมการที่ (ค-1) และสมการที่ (ค-2)

จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-?ct} \quad (\text{ค-3})$$

แต่แสงส่องผ่าน (Transmittance, T) มีค่าเท่ากับ I_t/I_0 และแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance, A หรือ optical density, OD) มีค่าเท่ากับ $\log(I_0/I_t)$ ดังนั้น

$$A = ?ct \quad (\text{ค-4})$$

หรือ
$$A = -\log T \quad (\text{ค-5})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ = molar absorptivity สารแต่ละชนิดมีค่า ϵ คงที่ในแต่ละช่วงคลื่น
มีหน่วยเป็น $\text{mole}^{-1}\text{cm}^{-1}$

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย mole/L

t = ความหนาของสารละลายในหน่วย cm

วิธีใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงแต่ละแบบอาจมีเทคนิคการใช้ และวิธีการใช้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งผู้ใช้ควรศึกษาคู่มือการใช้งานโดยละเอียดก่อน สำหรับวิธีใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยทั่วไปมีดังนี้

1. ถอดถุงคลุมเครื่องออก
2. เปิดสวิตช์ไฟฟ้าเพื่ออุ่นเครื่องนาน 10 - 30 นาที
3. ปิดแสงจากภายใน หรือภายนอกไม่ให้เกิดกระทบตัวไวแสง โดยการปิดฝาครอบช่องใส่คิวเวทต์ และปิดช่องแสงออก
4. ปรับ 0%T ด้วยปุ่มปรับศูนย์ ค่าความเข้มของแสงควรจะคงที่ ถ้าไม่คงที่อาจเกิดจากการอุ่นเครื่องไม่พอ หรือเครื่องมือมีความผิดปกติ
5. เลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัด โดยกดปุ่มเลือกความยาวคลื่น
6. เลือกตัวกรองตัดแสงรบกวนที่เหมาะสม
7. ใส่รีเอเจนต์อ้างอิง (reagent blank) ลงในช่องใส่คิวเวทต์ ปิดฝาช่องใส่คิวเวทต์
8. ปรับ 100%T หรือ OD ด้วยปุ่มควบคุมการปรับในขั้นตอนนี้ต้องกระทำทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงที่ใช้วัด
9. ใส่สารตัวอย่างลงในช่องใส่คิวเวทต์ ปิดฝาช่องใส่คิวเวทต์
10. อ่านค่า %T หรือ Abs
11. ปิดสวิตช์ไฟฟ้า ปล่อยให้เครื่องเย็นก่อนคลุมเครื่องด้วยถุงคลุมเครื่องมือ

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างของแผ่นคะตะลิสต์ A กับ B ที่ความเข้มข้น MB
2 mg/L และ 25 mg/L

1. ความเข้มข้น MB 2 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus แผ่นคะตะลิสต์

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
แผ่นคะตะลิสต์	2	A, B

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
แผ่นคะตะลิสต์	1	0.1380	0.1380	0.01	0.944
Error	4	97.2355	24.3089		
Total	5	97.3735			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.93040	0.14%	0.00%	0.00%

Means

แผ่นคะตะลิสต์	N	Mean	StDev	95% CI
A	3	86.39	4.38	(78.49, 94.30)
B	3	86.09	5.43	(78.19, 93.99)

Pooled StDev = 4.93040

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

แผ่นคะตะลิสต์	N	Mean	Grouping
A	3	86.39	A
B	3	86.09	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs แผ่นคะตะลิสต์

2. ความเข้มข้น MB 25 mg/L

One-way ANOVA: %การบำบัด versus แผ่นคะตะลิสต์

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
แผ่นคะตะลิสต์	2	A, B

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
แผ่นคะตะลิสต์	1	73.64	73.640	13.28	0.022
Error	4	22.18	5.546		
Total	5	95.82			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.35503	76.85%	71.06%	47.91%

Means

แผ่นคะตะลิสต์	N	Mean	StDev	95% CI
A	3	92.92	2.72	(89.14, 96.70)
B	3	85.91	1.92	(82.14, 89.69)

Pooled StDev = 2.35503

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

แผ่นคะตะลิสต์	N	Mean	Grouping
A	3	92.92	A
B	3	85.91	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of %การบำบัด vs แผ่นคะตะลิสต์

การวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างของแผ่นคะตะลิสต์ A ขั้วรอบที่ 1 และ 2
ณ ความเข้มข้น MB 2 mg/L และ 25 mg/L

1. ความเข้มข้น MB 2 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	158.3	158.31	1.80	0.251
Error	4	351.9	87.97		
Total	5	510.2			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9.37911	31.03%	13.79%	0.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	84.98	6.15	(69.95, 100.02)
2	3	74.71	11.75	(59.68, 89.74)

Pooled StDev = 9.37911

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
1	3	84.98	A
2	3	74.71	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs รอบ

2. ความเข้มข้น MB 5 mg/L

One-way ANOVA: %การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	11.29	11.289	1.87	0.243
Error	4	24.11	6.027		
Total	5	35.39			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.45490	31.89%	14.87%	0.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	78.280	1.649	(74.345, 82.215)
2	3	81.02	3.06	(77.09, 84.96)

Pooled StDev = 2.45490

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
2	3	81.02	A
1	3	78.280	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of %การบำบัด vs รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความเข้มข้น MB 15 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	121.230	121.230	*	*
Error	4	0.000	0.000		
Total	5	121.230			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0	100.00%	100.00%	100.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	90.57	0.00	(90.57, 90.57)
2	3	81.58	0.00	(81.58, 81.58)

Pooled StDev = 0

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
1	3	90.57	A
2	3	81.58	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs รอบ

4. ความเข้มข้น MB 25 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	14.26	14.26	0.20	0.680
Error	4	288.63	72.16		
Total	5	302.89			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
8.49454	4.71%	0.00%	0.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	85.30	6.79	(71.68, 98.91)
2	3	88.38	9.91	(74.76, 102.00)

Pooled StDev = 8.49454

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
2	3	88.38	A
1	3	85.30	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs รอบ

5. ความเข้มข้น MB 35 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	6.742	6.742	0.20	0.678
Error	4	135.087	33.772		
Total	5	141.829			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.81135	4.75%	0.00%	0.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	83.41	5.40	(74.09, 92.73)
2	3	85.53	6.20	(76.21, 94.85)

Pooled StDev = 5.81135

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
2	3	85.53	A
1	3	83.41	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs รอบ

6. ความเข้มข้น MB 50 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus รอบ

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
รอบ	2	1, 2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
รอบ	1	8.120	8.120	0.42	0.554
Error	4	78.037	19.509		
Total	5	86.157			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.41692	9.42%	0.00%	0.00%

Means

รอบ	N	Mean	StDev	95% CI
1	3	73.45	2.91	(66.37, 80.53)
2	3	75.78	5.53	(68.70, 82.86)

Pooled StDev = 4.41692

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

รอบ	N	Mean	Grouping
2	3	75.78	A
1	3	73.45	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

Interval Plot of % การบำบัด vs รอบ

การวิเคราะห์ทางสถิติหาความแตกต่างของค่า pH 6 กับ 7 ที่ความเข้มข้น MB
25 mg/L

One-way ANOVA: % การบำบัด versus pH

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
pH	2	6, 7

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	1	21.70	21.70	0.55	0.498
Error	4	156.68	39.17		
Total	5	178.38			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6.25866	12.16%	0.00%	0.00%

Means

pH	N	Mean	StDev	95% CI
6	3	85.30	6.79	(75.26, 95.33)
7	3	89.10	5.68	(79.07, 99.13)

Pooled StDev = 6.25866

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping
7	3	89.10	A
6	3	85.30	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous 95% CIs

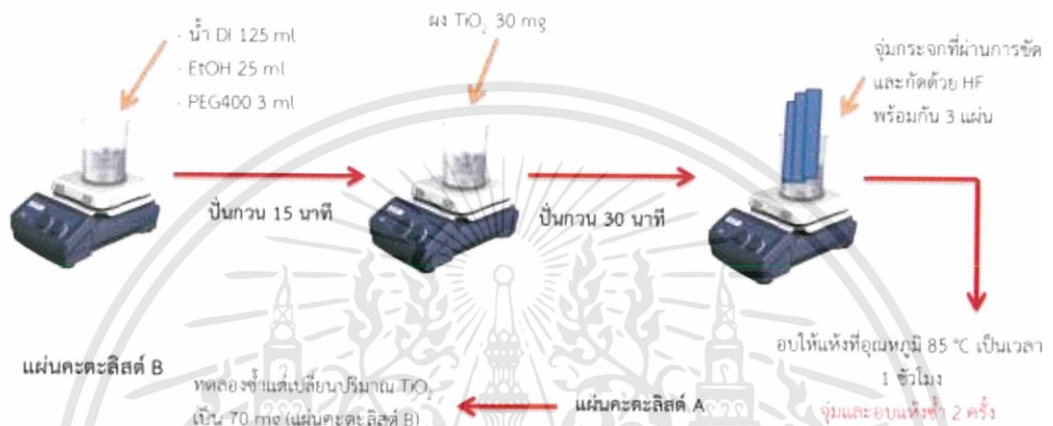
Interval Plot of %การบำบัด vs pH



ภาคผนวก จ

รูปประกอบผลการทดลอง

รูปที่ จ-1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นคะตะลิสต์



รูปที่ จ-2 ลักษณะของแผ่นคะตะลิสต์ที่ผ่านการเคลือบ TiO_2 ปริมาณต่างๆ



แผ่นคะตะลิสต์ A

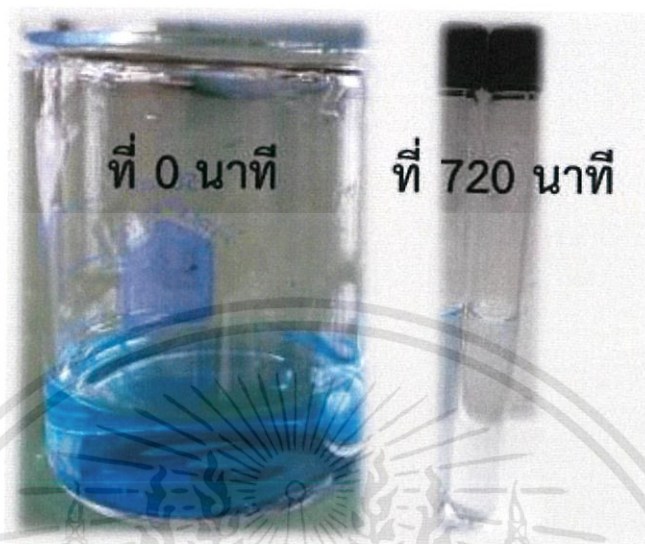
TiO_2 ปริมาณ 30 mg/L

แผ่นคะตะลิสต์ B

TiO_2 ปริมาณ 70 mg/L

หมายเหตุ : แผ่นกระจกขนาด 2.5 x 7.5 cm. เคลือบด้วยวิธีจุ่มในสารละลายแขวนลอยปริมาตร 150 mL

รูปที่ จ-3 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม

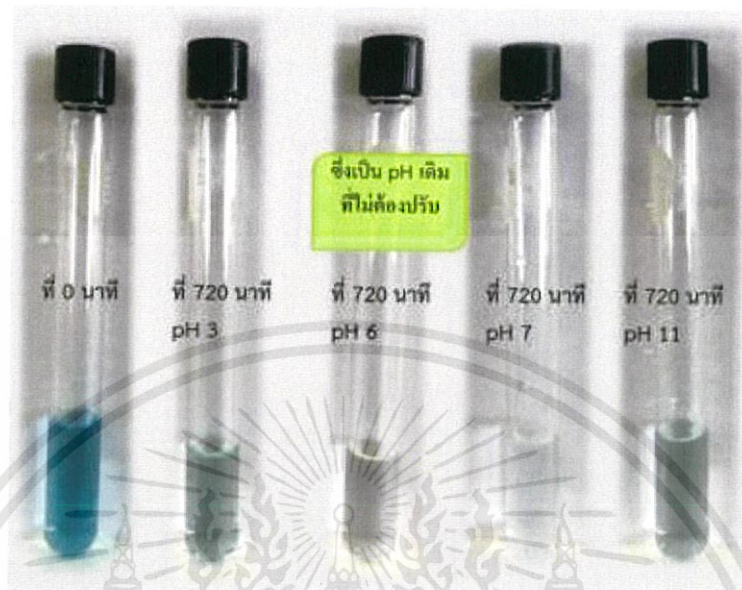


รูปที่ จ-4 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกด้วยปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ-5 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ pH ต่างๆ



รูปที่ จ-6 MB ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ปริมาตรต่างๆ



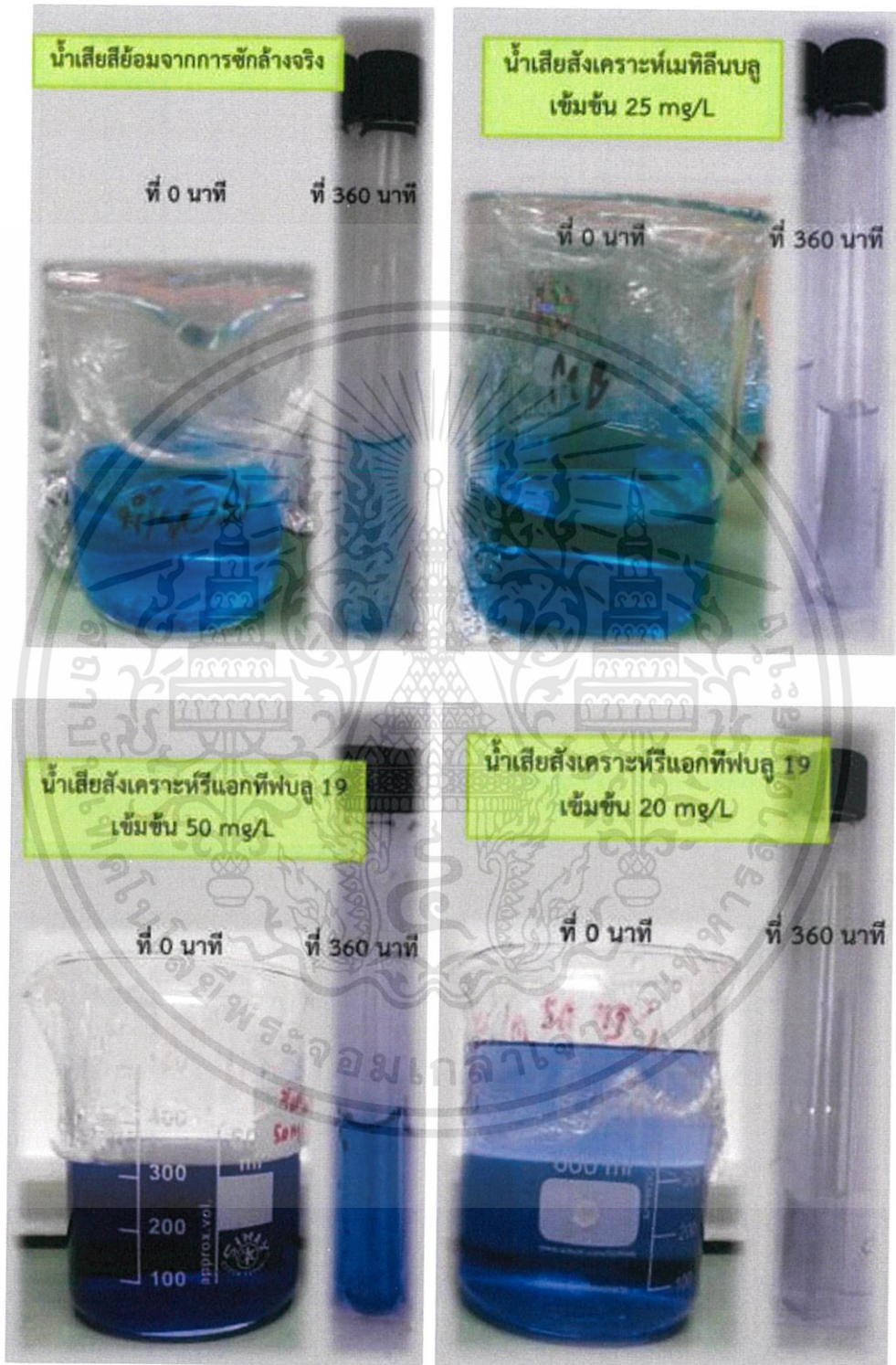
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ-7 การจัดวางตำแหน่งงานเพาะเชื้อที่บรรจุ MB ในการฉายแสง UV_{sun}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ-8 น้ำเสียชนิดต่างๆที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้