

ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้  
แร่ไพโรลูไซต์แบบตรึงในคอลัมน์

REMOVAL EFFICACY OF REACTIVE BLUE IN SYNTHETIC  
WASTEWATER USING PYROLUSITE IN  
FIXED BED COLUMN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2565  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL EFFICACY OF REACTIVE BLUE IN SYNTHETIC  
WASTEWATER USING PYROLUSITE IN  
FIXED BED COLUMN



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2022  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์แบบตรึงในคอลัมน์

Removal Efficacy of Reactive Blue in Synthetic Wastewater using Pyrolusite in Fixed Bed Column

ชื่อนักศึกษา      นางสาวจิตติญา      บัวจุม      รหัสนักศึกษา 62050373  
นายภณชัย      พรโสภณชัย      รหัสนักศึกษา 62050422  
นางสาวสุธิสา      ภาคเกษิ      รหัสนักศึกษา 62050462  
นางสาวอัญชลี      ทองน้อย      รหัสนักศึกษา 62050466

ปริญญา      วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา      เคมี

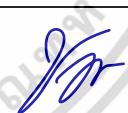

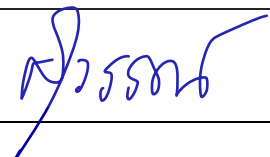
คณะ      วิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัย      สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา      2565

อาจารย์ที่ปรึกษา      รศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบใดก็ได้ และต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์แบบตรึงในคอลัมน์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิตติญา	บัวจุม	รหัสนักศึกษา 62050373
	นายภณชัย	พรโสภณชัย	รหัสนักศึกษา 62050422
	นางสาวสุธิสา	ภาคเกษิ	รหัสนักศึกษา 62050462
	นางสาวอัญชลี	ทองน้อย	รหัสนักศึกษา 62050466
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2565		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ โดยการทดลองแบบแบทช์และแบบคอลัมน์ ศึกษาลักษณะสัณฐานและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแร่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูโดยการทดลองแบบแบทช์ที่ความเข้มข้นสี 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วรอบในการเขย่า 120 รอบต่อนาที แปรค่าความเป็นกรด-ด่าง (3, 7 และไม่ปรับ) ระยะเวลาสัมผัส (10, 15 และ 20 นาที) ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ (5, 10, 15 และ 20 กรัม) และศึกษาจลนพลศาสตร์ จากนั้น นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปศึกษาอัตราการไหล (1, 2, 3 มิลลิเมตรต่อนาที) โดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ จากผลการศึกษาสัณฐานของแร่ พบว่ามีลักษณะเป็นผลึกแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นชัดเจนและมีรูพรุนค่อนข้างน้อย และมี หมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ C=C Stretching, C=O Stretching, N-H Bending, C-Cl, Mn=O Stretching และ Mn=O Bending สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู คือ ที่ pH 3, ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที, ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10 กรัม สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟบลูได้  $71.84 \pm 0.65$  เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ปฏิกิริยาอันดับสอง ( $R^2=0.9891$ ,  $K_2=1.3189$ ,  $q_e=0.2273$ ) และผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่สภาวะเหมาะสมและปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 20 กรัม พบว่า ที่อัตราการไหล 0.63 มิลลิเมตรต่อนาที สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟบลูได้  $94.63 \pm 1.37$  เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**คำสำคัญ :** แร่ไพโรลูไซต์ สีรีแอกทีฟบลู การกำจัด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Removal Efficacy of Reactive Blue in Synthetic Wastewater using Pyrolusite in Fixed Bed Column		
<b>Students</b>	Miss Jittiya Buachoom	Student ID 62050373	
	Mr. Phanachai Pornsophonchai	Student ID 62050422	
	Miss Suthisa Pakkasee	Student ID 62050462	
	Miss Aunchalee Tongnoi	Student ID 62050466	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>School</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2565		
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

### Abstract

This special project studied removal efficacy of reactive blue in synthetic wastewater using pyrolusite in batch and column experiment. Morphological properties and functional groups of pyrolusite were analyzed using SEM and FT-IR, respectively. Optimum conditions for removing reactive blue at a concentration of 80 mg/l and agitation speed of 120 rpm were examined in batch experiment by varying pH (3, 7, not adjusted), contact time (10, 15, 20 min), amount of pyrolusite (5, 10, 15, 20 g). Reaction kinetic was also investigated. Under optimum conditions, flow rates (1, 2, 3 mL/min) were varied using column experiment. The results showed that morphological properties of pyrolusite were thin crystal sheets, clearly stacked layers and relatively low porosity. Functional groups contained C=C Stretching, C=O Stretching, N-H Bending, C-Cl, Mn=O Stretching and Mn=O Bending. The optimal conditions for reactive blue removal were pH value of 3, contact time of 15 minutes and pyrolusite content of 10 g. Under these conditions,  $71.84 \pm 0.65\%$  of reactive blue was removed. The kinetic was consistent with the second-order reaction correlation equation ( $R^2 = 0.9891$ ,  $K_2 = 1.3189$ ,  $q_e = 0.2273$ ). The column experimental results under optimum conditions and 20 g of pyrolusite showed that at flow rate of 0.63 mL/min, removal efficiency of reactive blue was  $94.63 \pm 1.37\%$ .

เอกสารนี้ **Keywords:** Pyrolusite, Reactive blue, Removal เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำ ติดตามงานอยู่ตลอดและให้คำปรึกษารวมถึงช่วยตรวจสอบข้อมูลและปรับปรุงตลอดจนแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ และผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ และให้คำแนะนำในการแก้ไขโครงการพิเศษให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ วิทยาศาสตร์ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยอำนวยความสะดวกในการทดลองเครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงให้คำปรึกษาต่าง ๆ ในระหว่างการทดลอง อย่างเต็มที่

ขอขอบพระคุณ พนักงานทำความสะอาดที่คอยดูแลความเรียบร้อยของห้องปฏิบัติการ หลังจากใช้งานเสร็จ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสร้างแรงผลักดันให้ในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้ และรวมถึงเพื่อน ๆ และรุ่นพี่ ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำคอยช่วยเหลือ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จิตติญา	บัวจุม
สุธิสา	ภาคเกษิ
อัญชลี	ทองน้อย
ภณชัย	พรโสภณชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 สีย้อม .....	4
2.1.1 ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อม.....	4
2.1.2 สีรีแอกทีฟ.....	7
2.1.3 การวัดสีและสัญลักษณ์ของสี .....	9
2.1.4 มลพิษสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม .....	11
2.2 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม.....	12
2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม.....	12
2.2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย .....	15
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย.....	17
2.2.4 ลักษณะและคุณสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม.....	18
2.2.5 วิธีการกำจัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	19
2.2.6 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง .....	19
2.3 แร่ไฟโรลูไซต์ .....	20
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ไฟโรลูไซต์ .....	20
2.3.2 ประโยชน์ของแร่ไฟโรลูไซต์.....	21
2.3.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการกำจัดด้วยแร่ไฟโรลูไซต์.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ทฤษฎีของปฏิกิริยารีดอกซ์.....	23
2.4.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน.....	23
2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ .....	24
2.5.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง.....	24
2.5.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง .....	25
2.5.3 การแพร่ภายในรูพรุน.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	26
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>28</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี .....	28
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	28
3.1.2 วัสดุและสารเคมี.....	29
3.2 การเตรียมแร่ไพโรลูไซต์.....	29
3.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานวิทยาและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแร่ไพโรลูไซต์	29
3.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	29
3.3.2 การศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	30
3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟบลู.....	30
3.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู แบบแบทช์ .....	31
3.5.1 ศึกษาผลของ กรด-ด่าง ที่เหมาะสม .....	31
3.5.2 ศึกษาผลระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม .....	32
3.5.3 ศึกษาปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่เหมาะสม.....	32
3.6 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก,ปฏิกิริยาการดูดซับ หรือปฏิกิริยา ออกซิเดชัน-รีดักชันของผลการทดลอง .....	33
3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูแบบตรึงในคอลัมน์.....	33
3.7.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสม .....	33
3.8 การคำนวณทางสถิติ .....	34
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>35</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานทางวิทยาและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแร่ไพโรลูไซต์	35
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) .....	35
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	36
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบบแบทช์ .....	38
4.2.1 ผลการศึกษาของความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม .....	38
4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	40
4.2.3 ผลการศึกษาของปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่เหมาะสม .....	41
4.3 ผลการศึกษากลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ .....	42
4.4 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก, ปฏิกิริยาการดูดซับ หรือปฏิกิริยา ออกซิเดชัน-รีดักชันของแร่ไพโรลูไซต์.....	43
4.5 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบบตรึงในคอลัมน์.....	44
4.5.1 ผลการศึกษาของอัตราการไหลที่เหมาะสม.....	44
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>47</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง .....	48
ภาคผนวก .....	51
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายมาตรฐานสี .....	52
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	57
ภาคผนวก ค การทดลองทางสถิติ.....	70
ภาคผนวก ง คำนวณผลของจลศาสตร์.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อมที่นิยมใช้.....	6
2.2 คุณลักษณะของสีรีแอกทีฟบลู .....	8
2.3 สัญลักษณ์ของการจำแนกสี.....	10
2.4 ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีย้อมต่อปลา.....	11
2.5 ชนิดของโลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างของสีย้อมชนิดต่างๆ .....	12
2.6 คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสี .....	17
2.7 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์ .....	18
2.8 สมบัติทางกายภาพและเทคนิคของไฟโรลูไซต์ .....	21
3.1 สภาวะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	30
3.2 สภาวะของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FT-IR).....	30
3.3 วิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อน และหลังการทดลอง .....	31
4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่พบในสีรีแอกทีฟบลู, แร่ไฟโรลูไซต์, แร่ไฟโรลูไซต์หลังจาก นำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3 .....	38
4.2 ค่าคงที่ต่างๆ ของจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ .....	43
ก-1.1 ตารางแสดงค่า Wavelength (nm) .....	53
ข-1.1 ผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม.....	57
ข-2.1 ผลของวิธีการปรับสภาพแร่ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม .....	59
ข-3.1 ผลของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม.....	61
ข-4.1 ผลของอัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที.....	64
ข-4.2 ผลของอัตราการไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที.....	65
ข-4.3 ผลของอัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที.....	66
ค-1.1 ตารางผลวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab .....	70
ค-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ .....	70
ค-1.3 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ.....	71
ค-1.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดย ใช้ค่า ADMI.....	71
ค-1.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI .....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ค-2.1 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab..... 72  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์	73
ค-2.3 ตารางผลค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ .....	73
ค-2.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	73
ค-2.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของระยะเวลาสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	73
ค-3.1 ตารางผลวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab .....	75
ค-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์	75
ค-3.3 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ.....	75
ค-3.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	75
ค-3.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	76
ค-4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์โครมาโตกราฟีอัตราการไหล และเวลา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ .....	77
ค-4.2 ตาราง ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab .....	78
ค-4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์	78
ค-4.4 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์.....	78
ค-4.5 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	78
ค-4.6 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของอัตราการไหลที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI.....	79
ง-1 ผลของความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ .....	80
ง-2 ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์.....	81
ง-3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-4 ผลของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่กำจัดย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์.....	84
ง-5 ผลของเวลาการกำจัดย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำจัดโดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที.....	85
ง-6 ผลของเวลาการกำจัดย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำจัดโดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที.....	88
ง-7 ผลของเวลาการกำจัดย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่กำจัดโดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทั่วไปของสีย้อมกลุ่มรีแอกทีฟ .....	8
2.2 กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย.....	14
2.3 กระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ.....	14
2.4 กระบวนการพิมพ์สิ่งทอ .....	15
2.5 รูปแร่ไฟโรลูไซต์ .....	21
4.1 ภาพแร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการอบ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	35
4.2 โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันทางเคมี.....	36
4.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู.....	39
4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	40
4.5 ผลของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	41
4.6 Pseudo-First Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟบลู ณ เวลาต่างๆ .....	42
4.7 Pseudo-Second Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟบลู ณ เวลาต่างๆ .....	42
4.8 ภาพแสดงผลการศึกษาปฏิกิริยา .....	44
4.9 ภาพแสดงผลการเกาะติดของสีย้อมรีแอกทีฟบลูบนพื้นผิวของแร่ไฟโรลูไซต์.....	44
4.10 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู.....	45
4.11 กราฟแสดงอัตราการไหล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	46
ก-1.1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน .....	54
ข-1.1 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	58
ข-2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	60
ข-3.1 ผลของน้ำหนักแร่ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู.....	63
ข-4.1 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสีย 0.63 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	67
ข-4.2 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสีย 1.60 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	68
ข-4.3 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสีย 2.63 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู .....	69
ค-1.1 รูปแสดงผล ANOVA ความเป็นกรด-ด่าง .....	71
ค-1.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของความเป็นกรด-ด่าง.....	72
ค-2.1 กราฟแสดงผล ANOVA ระยะเวลาการสัมผัส .....	74
ค-2.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของระยะเวลาสัมผัส.....	74
ค-3.1 กราฟแสดงผล ANOVA ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์.....	76
ค-3.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของแร่ไฟโรลูไซต์.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-4.1 กราฟแสดงผล ANOVA อัตราการไหล.....	79
ค-4.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของอัตราการไหล.....	79
ง-1 Pseudo-First Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟบลู ณ เวลาต่างๆ .....	82
ง-2 Pseudo-Second Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟบลู ณ เวลาต่างๆ.....	83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ADMI	American Dye Manufacturers Institute
TLC	Thin-Layer Chromatography
%T	Transmittance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นอันดับต้นๆ ซึ่งประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ มากมาย เช่น การผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำ สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นจำนวนมากในกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) ทำให้น้ำเสียมีการปนเปื้อนของสี ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อน และอื่นๆ สูง โดยส่วนใหญ่ มลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีดังกล่าว สีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแว็ท สีดิสเพอร์ส เป็นต้น ถ้าน้ำเสียไม่ผ่านการบำบัดอย่างถูกวิธีก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้แก่ ทำลายทัศนียภาพ ลดปริมาณออกซิเจนในน้ำและลดปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่น้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง ทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ และยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (ชนิษฐา , 2550) ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด (ชนิษฐา, 2550)

แร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite,  $MnO_2$ ) คือ แมงกานีสไดออกไซด์ธรรมชาติที่ได้จากการทำเหมืองแร่ เป็นแร่ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองน้ำ และทำปฏิกิริยาดักจับสนิมเหล็ก มีแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) เป็นส่วนประกอบ 30-65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแร่ไพโรลูไซต์มีลักษณะสีแสดและสีผงละเอียดเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ มีแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่อยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย บราซิล กาบอง อินเดีย เม็กซิโก แอฟริกาใต้ และยูเครน ซึ่งเป็นประเทศที่มีการผลิตแร่แมงกานีสเป็นส่วนใหญ่ของโลก สถานที่ที่ค้นพบแร่ไพโรลูไซต์ในประเทศไทย ได้แก่ อำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดอื่นๆ ที่มีการค้นพบแร่ไพโรลูไซต์ คือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ลำพูน สุโขทัย แพร่ อุทัยธานี เลย สระแก้ว ระยอง ฉะเชิงเทรา (กรมทรัพยากรธรณี, 2558)

โครงการพิเศษนี้ ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อม ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ ระยะเวลาสัมผัส โดยการทดลองแบบแบทช์ และศึกษาอัตราการไหลโดยการทดลองแบบคอลัมน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ โดยการทดลองแบบแบตช์
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ แบบตรึงในคอลัมน์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมแร่ไพโรลูไซต์ โดยร่อนให้ได้ขนาด 10-20 เมช และล้างด้วยน้ำสะอาด นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำมาเก็บไว้ในโถแก้วดูดความชื้น
- 2) ศึกษาคุณลักษณะสัณฐานวิทยาของแร่ไพโรลูไซต์และหมู่ฟังก์ชันทางเคมี ได้แก่ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
- 3) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม โดยใช้สีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นโดยวัดค่าการส่องผ่าน (Transmittance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในหน่วย ADMI
- 4) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแร่ไพโรลูไซต์ที่ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบตช์ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 120 รอบต่อนาที โดยแปรค่าพีเอช (3, 7, ไม่ปรับ (pH 11)), ระยะเวลาสัมผัส (10, 15, 20 นาที), ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ (5, 10, 15, 20 กรัม)
- 5) วิเคราะห์ความเข้มข้นหลังการกำจัด โดยวัดค่าการส่องผ่าน (Transmittance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในหน่วย ADMI
- 6) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของแร่ไพโรลูไซต์ ได้แก่ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก, ปฏิกิริยาการดูดซับ และปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชที่ 3 แปรค่าปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10 กรัม และ 20 กรัม ตั้งทิ้งไว้ในที่สว่างและที่มืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 7) ศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ที่ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยแปรค่าเวลาที่ 10, 15 และ 20 นาที
- 8) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแร่ไพโรลูไซต์ที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์แบบตรึงในคอลัมน์ ที่ค่าความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชที่ 3 ค่าปริมาตรสารดูดซับ (แร่ไพโรลูไซต์) ที่ 20 กรัม โดยแปรค่าอัตราการไหล 1, 2 และ 3 มิลลิเมตรต่อนาที ที่เวลาสัมผัส 180 นาที โดยวัดค่าสีทุกๆ 10 นาทีที่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) คำนวณผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีประสิทธิภาพสูง
- 2) ลดปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สีย้อม

สีย้อม (Dye stuffs) คือ ชนิดของสีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด บางชนิดละลายน้ำได้ แต่บางชนิดไม่ละลายน้ำแต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิกหรือพันธะโควาเลนต์กับวัตถุหรือเส้นใยผ้าที่ย้อมโดยตรง สีที่เห็นนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน สามารถมองเห็นที่ความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันจึงทำให้มองเห็นสีที่แตกต่างกันไป (ขนิษฐา, 2550)

#### 2.1.1 ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อม

ประเภทของสีย้อมสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ แต่วิธีที่นิยมคือ จำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสง และมีความคงทนต่อความร้อน โรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ ออกเป็น 11 ประเภท (ขนิษฐา, 2550) คือ

1. สีเอซิด (Acid Dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจางสีเอซิด บางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ, ป่าน, ไนลอน, โยขนแกะ, ไหม และอะคริลิก ซึ่งวิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นเบส

2. สีไดเรกต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสสีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

3. สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ให้ประจุบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน, ไนลอน และใยอะคริลิก ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท, เส้นใยโพลีเอสเตอร์, ไนลอน และอะคริลิก การย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราไม่ว่ากรณีนี้ฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเม็ดแบบสังเคราะห์และต้องย้อมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

การดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสง และการซักฟอกค่อนข้างดี แต่จะซีดถ้าถูกควันทหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์

5. สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส

6. สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส, ไนลอน หรืออะซิเตท

7. สีแว้ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีแว้ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก และ สีแอนทราควินอยด์

8. สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome Dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช่ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม, ดีบุก, เหล็ก และอะลูมิเนียม สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9. สีอินเกรน (Ingrain Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10. สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11. สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก

โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม ประกอบด้วย 2 ส่วน (Zee *et al.*, 2003) คือ

1. Dye Chromophore Group ประกอบด้วยพันธะคู่และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม เมื่อแสงตกกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์ของโมเลกุลสีย้อม ทำให้เกิดการสั่นเนื่องจากการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่น จึงทำให้เกิดการเห็นสีในช่วงที่ความยาวคลื่นไม่ถูกดูดกลืน โดยประเภทของสีแบ่งตามกลุ่มโครโมฟอร์ แสดงดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Dye Functional Group หรือเรียกว่า Auxochrome ซึ่งเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย ทำให้สีย้อมกับเส้นใยยึดติดกัน โดยโครงสร้างส่วนนี้มักเป็นวงเบนซีนที่มีหมู่อะตอมไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ เช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{COOH}$ ,  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{NH}_2$  และ  $\text{OH}$  เป็นต้น ซึ่งโมเลกุลของสีย้อมจะยึดติดกับเส้นใยโดยหมู่ฟังก์ชันนี้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย อาจเกิดเป็นพันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ แร่งวันเตอร์วาลส์หรือเป็นการแทรกซึมของสีย้อมเข้าไปในเส้นใย

ตารางที่ 2.1 ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อมที่นิยมใช้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ประเภท	กลุ่มโครโมฟอร์	คุณสมบัติของสีย้อม
Reactive Dye	Azo Group (N=N)	เป็นสีที่มีประจุลบ ละลายน้ำได้เป็นต่างเมื่ออยู่น้ำ สีประเภทนี้มี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดในอุณหภูมิสูงที่ 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดในอุณหภูมิต่ำ
Direct Dye	Azo Group (N=N)	เป็นสีที่มีหมู่กรดซัลโฟนิก สามารถละลายน้ำได้
Acid Dye	Azo Group (N=N)	มีประจุลบ เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ สามารถละลายน้ำได้ดี ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน
Basic or Cationic Dye	Azo Group (N=N)	มีประจุลบ เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ สามารถละลายน้ำได้
Sulfur Dye	Sulfur Group	ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อย้อมต้องรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้
Azoic Dye	Azo Group (N=N)	ละลายน้ำไม่ได้ ต้องทำการย้อมด้วยฟีนอลที่ละลายน้ำได้ก่อน แล้วจึงย้อมทับด้วยสารอะโซ-คอมโพเนนท์จึงเกิดสี
Vat Dye	Anthraquinoid	ประกอบด้วยสีอินดิโกและสีแอนทราควินอยด์ ไม่ละลายน้ำ
Disperse Dye	Azo Group (N=N)	มีคุณสมบัติกระจายตัวได้ดี ในการย้อมต้องใช้แรงดันและอุณหภูมิสูง

สีย้อมแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการย้อมสี อัตราการเกิดปฏิกิริยา การให้และรับอิเล็กตรอน โครงสร้างทางเคมีของสีแต่ละชนิด มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสีนี้ (วรรณวิภา, 2547) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับอนุมูลของเส้นใยและสีย้อม
2. จลนพลศาสตร์ของสีย้อม
3. ความสามารถเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่งๆ
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความร้อน
7. ความทนต่อความชื้น

### 2.1.2 สีรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) (วรรณวิภา, 2547)

สีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสมได้ เป็นสีที่ย้อมง่าย และสามารถย้อมได้หลายวิธี เช่น การย้อมแบบแช่ในอ่างย้อม, ย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง ทั้งยังให้ผ้าย้อมที่มีความคงทนต่อการซักสูง เป็นสีที่มีความสดมากโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับสีไดเรกต์ หรือสีแวต และมีเฉดสีต่างๆ ให้เลือกครบ ราคาไม่แพงจนเกินไป โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีสี (Chromophore) ใช้แทนด้วยตัวอักษร “D” และกลุ่มทำปฏิกิริยา (Reactive Group) ใช้แทนด้วยอักษร “R” (PHISIT) ประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของ โครงสร้างอย่างง่าย คือ



เมื่อกำหนดให้

S = Solubilizing Group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric Group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ( $-SO_3Na$ ) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

D = Chromophoric Group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี Chromophore และสร้างการยึด เกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging Group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive System กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่  $-NH$ ,  $-NHCO$ ,  $-SO_2$ ,  $-NHSO_3$ , และ  $-NCH_3$  เป็นต้น

X = Reactive System เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ของเส้นใยลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดกับเส้นใย

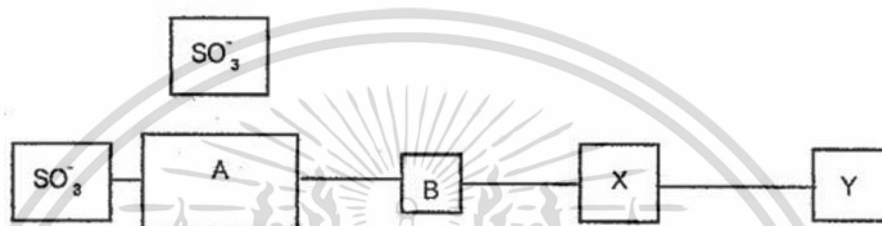
คุณสมบัติพิเศษที่ทำให้สีรีแอกทีฟแตกต่างจากสีย้อมฝ้ายอื่นๆ คือ การที่สีรีแอกทีฟ สามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสมได้ ปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในน้ำย้อมที่มีสภาวะเป็นด่าง และปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มทำปฏิกิริยาของสีย้อม ดังนี้ (PHISIT, ม.ป.ป.)

ไม่ว่าการแก้ไข ฟังสน ยกทั้งหมัดเห็นแต่แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพันธะแบบเอสเตออร์ (Nucleophilic Substitution Reaction) สิริแอกทีฟ ที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยในลักษณะนี้ได้แก่ พวกที่มีโครงสร้างเป็นวง

2. ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพันธะแบบอีเธอร์ (Nucleophilic Addition Reaction) สิริแอกทีฟ ที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยในลักษณะนี้ได้แก่ พวกที่มีโครงสร้างของกลุ่มทำปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยอะตอมมาเรียงเป็นแนวตรง

โดยสูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟแสดงดัง รูปที่ 2.1 และคุณลักษณะของสีย้อมรีแอกทีฟพบแสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของสีย้อมกลุ่มรีแอกทีฟ (โมเตอร์น ไดสตัทท์ แอนด์ พิกเมนต์ จำกัด, 2543)

เมื่อกำหนดให้  $\text{SO}_3^-$  คือ ตัวอย่างของหมู่ที่ละลายน้ำได้

A คือ Chromophore

B คือ Binding Group

X คือ Reactive Group

Y คือ Leaving Group

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging Group ก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic Ring

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของสีย้อมรีแอกทีฟพบ (Al-Degs et al., 2009)

คุณลักษณะ	ค่า
$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	604.0
Solubility at 25 °C (g/dm <sup>3</sup> )	60.0
pKa	5.5
C (%wt)	45.0
Number of Ionizable Groups	3
Number of Polar Functional Groups Located on Dyes that can Interact with	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ Act การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม S-O ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร 9 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คุณลักษณะของสีรีแอกทีฟบลู (Al-Degs et al., 2009)

คุณลักษณะ	ค่า
-C-O	2
-Cl	1
-NH	3
-NH <sub>2</sub>	1

### 2.1.3 การวัดสีและสัญลักษณ์ของสี

การสัมผัสรับรู้สีเป็นสิ่งที่ซับซ้อน เพราะเกี่ยวข้องกับหลายส่วนด้วยกัน การที่เรามองเห็นสีของวัตถุที่บดแสงต่างๆ นั้น เกิดจากการที่วัตถุนั้นสะท้อนแสงที่ตกกระทบวัตถุมาเข้าตาเรา การมองเห็นสีจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 อย่าง ได้แก่ แสง วัตถุ และประสาทตา ปัจจัยทั้งสามนี้มีความซับซ้อนทั้งเรื่องธรรมชาติแสงที่ฉายหรือส่องบนวัตถุ เรื่องของประสาทตาของแต่ละคน และความสามารถในการรับแสงช่วงคลื่นต่างๆ ที่มีระดับความเข้มหรือความสว่างต่างๆ กัน โดยทั่วไป การสื่อสารสีที่มองเห็นให้ผู้อื่นรับรู้และเข้าใจง่ายขึ้น จะนิยมใช้ 3 สิ่งประกอบกัน คือ

1. เฉดสี (Hue) ซึ่งจะระบุเป็นสีที่รู้จักกัน เช่น แดง เขียว ม่วง น้ำเงิน ส้ม เป็นต้น
  2. ความสว่าง (Value หรือ Lightness หรือ Brightness) ซึ่งจะเป็นสิ่งที่กำหนดว่าวัตถุ หรือสีนั้นสว่าง หรือ มืด เมื่อเทียบกับสิ่งอื่นๆ
  3. ความอิ่มตัว (Chroma หรือ Saturation) เป็นเทอมที่ระบุความสดของสีหรือความบริสุทธิ์ของสีหากสีอิ่มตัวน้อยหรือไม่สดใสจะเรียกว่า สีตุ่น
- การระบุสีเป็นค่าตัวเลขนั้นได้มีการพัฒนาโดยองค์การนานาชาติเกี่ยวกับแสงและสีคือ International Commission on Illumination (CIE) วิธีการที่รู้จักกันแพร่หลายได้แก่ ระบบ  $xyy$  ในปี คศ. 1931 ซึ่งอยู่บนฐานค่า 3 ค่า  $xyz$  ที่นิยามโดย CIE และระบบ  $L^*a^*b^*$  Color Space ในปี คศ. 1976 ที่มีฐานจากทฤษฎีสีตรงข้าม ซึ่งสมมติว่า ประสาทตามนุษย์รับรู้สีโดยมีคู่ตรงข้าม 3 คู่ ได้แก่ สว่าง (Light) มืด (Dark), แดง (Red) เขียว (Green), เหลือง (Yellow) น้ำเงิน (Blue) สียอมในท้องตลาดมีจำนวนมาก และมักจะมีสีใกล้เคียงกัน ทำให้จำแนกได้ยาก ดังนั้น จึงต้องมีสัญลักษณ์สี (ราตรี และคณะ, 2543) แสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ของการจำแนกสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์	ลักษณะ	สัญลักษณ์	ลักษณะ
สัญลักษณ์ของการจำแนกสี		สัญลักษณ์ของธรรมชาติสี	
บี (B)	สีน้ำเงิน	ซี (C=Chlorine)	ทนต่อสารคลอรีน (พอกขาวด้วยไฮโปคลอไรต์)
จี (G)	สีเขียวหรือสีเหลือง	ดี (D=Discharge)	สามารถลอกสีออกได้ดี
เจ (J)	สีเหลือง	ดี (Disperse)	สีชนิดกระจายตัวได้
เอ็ม (M)	สีแดงคล้ำ	เอฟ (F=Fast)	ความคงทนดีสีไม่ตก (สัญลักษณ์ตัวนี้จะระบุก่อนอย่างอื่น)
อาร์ (R)	สีแดง	เอฟ (F=Fine)	ให้สีสดใสไม่มีสิ่งอื่นปน (ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
วี (V)	สีม่วง	เอช (H=Half Woof)	ใช้กับผ้าขนสัตว์บนฝ้าย
วาย (Y)	สีเหลือง	เค (K=Kait)	ใช้ย้อมเย็นได้
สัญลักษณ์ของความเข้มสี		แอล (L=Light)	ทนแสงได้ดี
เอ (A)	เข้มขึ้นมาก	เอน (N=Neutral)	อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
อี (E)	เข้มขึ้นมากที่สุด (Excellent)	พี (P=Perion)	เหมาะสำหรับย้อมไนลอน
โอ (O)	เข้มขึ้นมาก	เอส (S=Soluble)	ละลายน้ำได้ดี
เอกซ์ (X)	เข้มขึ้นเป็นพิเศษ (Extra)	เอส (S=Silk)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
เค (K)	เข้มขึ้น (Konz)	ที (T=Tannin)	เหมาะสำหรับพิมพ์ลอกสีด้วยแทนนิน
สัญลักษณ์ของคุณภาพสี		ยู (U=Ultra)	กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ซีพี (CP=Chemical pure)	มีความบริสุทธิ์สูง	ดับเบิลยู (W=Washing)	ทนต่อการซักดี
เอฟแซด (FZ=Free from Zinc)	ไม่มีสังกะสีปน	ดับเบิลยู (W=Wool)	สีเดเรคท์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์
แซดเอฟ (ZF=Zinc free)	ไม่มีสังกะสีปน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADMI ย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute เป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนของสีย้อมและเม็ดสีในน้ำ โดยการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt จะวัดค่าสีเฉพาะหน่วยสีที่เป็นสีเหลืองเท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดค่าสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะมีเจดเป็นสีเหลืองถึงสีส้ม ในขณะที่การวัดค่าสีในหน่วย ADMI จะตรวจวัดปริมาณของสี (Color Value) ในทุกหน่วยสี ไม่เน้นที่สีใดสีหนึ่งโดยการตรวจวัดจะเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EPA เลขที่ 110.1 การวัดค่าสีในหน่วย ADMI ใน Standard Method for Examination of Water & Wastewater มี 2 วิธีมาตรฐาน ดังนี้

1. APHA 2120E ADMI Tristimulus Filter Method
2. APHA 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometer

โดยทั้ง 2 วิธีมาตรฐานดังกล่าว เป็นการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นการวัดค่าสีที่แท้จริง โดยวัดปริมาณเม็ดสีตั้งแต่เจดสีม่วงถึงเจดสีแดง (Success Jigsaw คิด ทำ สำเร็จ, 2559)

#### 2.1.4 มลพิษสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสามารถมองเห็นได้ง่ายแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปปริมาณของสีย้อมที่ปล่อยสู่แม่น้ำแล้วสังเกตเห็นได้ คือ 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (อังคณา, 2540) ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำที่ในปัจจุบันไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นถึงจะมีอยู่ในน้ำในปริมาณไม่มากก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็น จึงทำให้มีความจำเป็นต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้ง แม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำ สีย้อมมีโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำให้สีย้อมที่ปนเปื้อนยังอยู่ในสิ่งแวดล้อม สามารถแสดงค่าความเป็นพิษต่อปลาตามที่ แสดงในตารางที่ 2.4 (นันทยา, 2539) นอกจากนี้สีย้อมจะมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์แล้ว สีย้อมยังมีโลหะหนักที่อยู่ในโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แสดงในตารางที่ 2.5 (วิโรจน์, 2560)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีย้อมต่อปลา (Fish Toxicity) (นันทยา, 2539)

LC50 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนสีย้อม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
น้อยกว่า 1	2%
1-10	1%
10-100	27%
100-500	31%
มากกว่า 500	38%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ชนิดของโลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างของสีย้อมชนิดต่างๆ (วิโรจน์, 2560)

ชนิดของสีย้อม	โลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้าง
สีไดเร็กซ์	ทองแดง
สีรีแอกทีฟ	ทองแดง และ นิกเกิล
สีแวต	ไม่มีโลหะหนัก
สีดิสเพอร์ส	ไม่มีโลหะหนัก
สีแอซิด	ทองแดง โครเมียม และ โคบอลต์

## 2.2 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

โรงงานฟอกย้อมมีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียลงสู่สิ่งแวดล้อม ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการทิ้งน้ำเสียน้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อน และอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ น้ำเสียที่ได้จากการฟอกย้อมเกิดขึ้นเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า การเตรียมสีและตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในการทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ดังนั้น จึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียนี้อาจมีปริมาณสูง และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ ซึ่งสีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ สีแอซิด สีเบสิก สีไดเร็กซ์ สีแวต สีดิสเพอร์ส เป็นต้น (กาวิ, 2545)

### 2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่ง (กาวิ, 2545) ดังนี้

1. น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อมน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยบ้างระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1.1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะปริมาณไม่มากนักแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนที่ค่อนข้างสูง

1.2) น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะปริมาณมากแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

2. น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมมักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน แก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก่สารละลายสีย้อมโดยตรงก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียที่สกปรกที่สุด

3. น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น ในกระบวนการฟอกย้อม บ่อยครั้งที่จำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

4. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และในบางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

5. น้ำจากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานฟอกย้อมยังมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น น้ำจากการอุปโภคบริโภคของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานฟอกย้อม สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามวัตถุประสงค์หลัก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) ดังนี้

1. กระบวนการฟอกย้อมสีเส้นใยหรือเส้นด้ายวัตถุประสงค์หลักในกระบวนการนี้ คือ เส้นใยหรือเส้นด้ายลักษณะเป็นม้วนด้ายหรือขดด้าย ซึ่งการย้อมสีจะต้องทำให้สีซึมเข้าไปในเส้นใยหรือเส้นด้ายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งน้ำเสียที่ได้เกิดจากกระบวนการฟอกย้อมสีเส้นใยหรือเส้นด้าย แสดงดังรูปที่ 2.2

2. กระบวนการฟอกย้อมสีสิ่งทอวัตถุประสงค์หลักในกระบวนการนี้คือ ผืนผ้าที่ทอแล้วนำมาย้อมให้ทั้งผืนเป็นสีเดียวกัน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1) ขั้นตอนการเตรียมผ้าจะเป็นการนำผ้าไปคลี่ การเผาขนผ้า จากนั้นนำผ้าไปทำความสะอาด แล้วนำไปฟอกขาวและซุบมัน

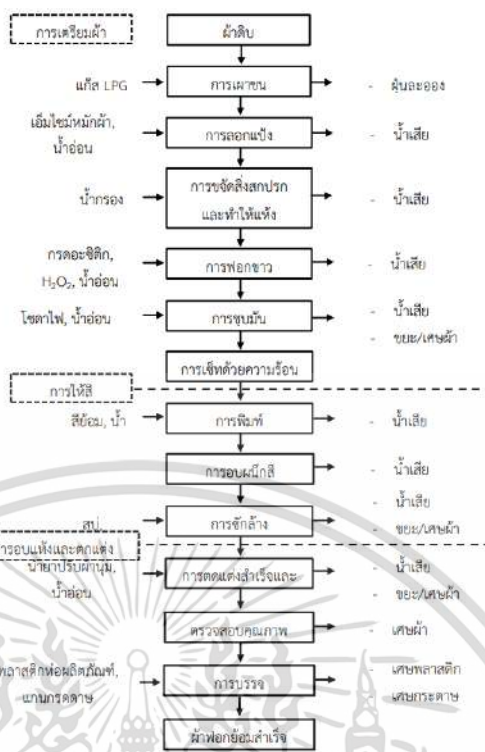
2.2) ขั้นตอนการย้อมสี จากขั้นตอนการเตรียมผ้า จะนำผ้าที่ได้ไปเข้าเครื่องย้อม

2.3) ขั้นตอนการอบแห้งและแล่ตากแห้งสำเร็จ เมื่อได้ผ้าจากขั้นตอนก่อนหน้า ผ้าจะถูกนำไปเข้าในเครื่องคลี่ผ้าต่อ จากนั้นนำไปอบแห้งและนำไปตากแห้ง น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมสีสิ่งทอ แสดงดังรูปที่ 2.3

3. กระบวนการพิมพ์สิ่งทอ เป็นกระบวนการพิมพ์ผ้าให้เกิดสีเฉพาะโดยใช้เทคโนโลยีเข้ามาในกระบวนการผลิต น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการพิมพ์สิ่งทอ แสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.4 กระบวนการพิมพ์สิ่งทอ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสียว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

สารเคมีที่ใช้ในโรงฟอกย้อมนั้น มีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ตัวอย่างของสารอนินทรีย์ เช่น ด่างและกรดอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), แอมโมเนียซัลเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ), โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) และสารฟอกขาวธรรมชาติ ส่วนสารอินทรีย์นั้นมีการใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วย กรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก ( $\text{HCOOH}$ ), กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) กรดไขมัน พวกสบู่ แป้ง สารอินทรีย์ที่ใช้แทนแป้ง ผงซักฟอก สารที่ทำให้เกิดความอ่อนนุ่ม สีย้อม สารนำพา และสารเคมีอื่นๆ อีก เช่น สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ ซึ่งล้วนแต่นำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อผ้าระหว่างกระบวนการตกแต่งสำเร็จทั้งสิ้น สารเคมีบางตัวอาจมีค่าบีโอดีสูง ซึ่งในขณะเดียวกันสารเคมีอื่นๆ ที่มีค่าบีโอดีต่ำและมีคุณสมบัติคล้ายกันก็สามารถมาใช้ทดแทนได้ จึงนิยมใช้สารเคมีที่มีค่าบีโอดีต่ำ เช่น การใช้ Carboxylmethyl Cellulose แทนแป้ง ซึ่งมีประโยชน์และไม่เป็นอันตราย หรือหาทางขจัดออกไปได้ง่ายโดยวิธีทางเคมีหรือทางฟิสิกส์

เมื่อนำน้ำใช้ไปผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดและปริมาณต่างๆ กัน หลังจากนั้นน้ำใช้ผ่านใช้ในกระบวนการผลิตแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสียวซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยน้ำเสียวที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ที่นำมาใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นผู้ใดไม่ผิดลิขสิทธิ์เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทที่ใช้

2. สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จสารเคมีที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อมและการตกแต่ง มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

2.1) สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemicals) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent), สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมมิสีให้ได้สีที่สม่ำเสมอ (Levelling Agent)

2.2) สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด, ด่าง, บัฟเฟอร์, เกลือ, สารฟอกขาว และสารลอกแบ่ง

2.3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ, สารกันเชื้อรา, สารกันไฟ และกันยับ

3. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนไม่มากนักน้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิต ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อมและจะหลุดติดตามในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

4. เศษเส้นใย ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งคือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

5. สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นอีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า, สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียในภายหลัง

สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม มีความหลากหลายในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี แต่น้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้ก็ยังมีข้อดีตรงที่สารส่วนใหญ่เป็นสารที่ง่ายต่อการบำบัด และมีค่าความเป็นพิษต่ำคุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสี แสดงดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	ลักษณะน้ำเสีย						จำนวนข้อมูล โรงงาน
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี (ADMI)	TKN (mg/L)	
ฟอกย้อมด้าย	7.87- 9.50	530- 1,020	1,050- 1,650	80- 256	471- 1,240	30-70	2
ฟอกย้อมผ้าทอ	7.50	380	575	294	1,484	23.8	1
ฟอกย้อม/พิมพ์ และแต่งสำเร็จ	7.50	190	464	63	375	14	1
ฟอกและซักรีด เสื้อผ้า	6.88	230	248	98	75	12.6	1

### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมกล่าวได้ว่าเป็นน้ำเสียที่มีความหลากหลายในแง่ของส่วนประกอบของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญคือ

1. กระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์ กระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

1.1) กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย กระบวนการนี้เริ่มจากนำเส้นด้ายดิบไปผ่านกระบวนการเตรียมแล้วจึงทำการย้อมสี

1.2) กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ เริ่มต้นจากการลอกแป้ง การทำความสะอาด การซुบมัน ฟอกขาว แล้วจึงนำมาย้อมสี ก่อนทำการตกแต่งสำเร็จ

1.3) กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการฟอกย้อมผ้าทอ แตกต่างกันที่การฟอกย้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง

2. ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอ ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอมีผลต่อลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสีย โดยเฉพาะแป้งที่ใช้กับผ้าฝ้าย ส่วนใหญ่จะเป็นแป้งธรรมชาติซึ่งจะมีค่าบีโอดีสูง

3. ชนิดและความสกปรกของเส้นใย โดยทั่วไปน้ำเสียจากการฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติจะมีความสกปรกมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมามากกว่า

4. ชนิดของสีย้อมและกรรมวิธีการย้อม เส้นใยแต่ละชนิดจะมีสีย้อมให้เลือกใช้ได้หลายประเภท แต่ละประเภทก็มีกรรมวิธีการย้อมและความจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการช่วยย้อมที่แตกต่างกัน ในการย้อมสีย้อมแต่ละประเภทมีกรรมวิธีการย้อมให้เลือกได้หลายวิธีแต่ละวิธีก็มีการใช้

เอกสารนี้เผยแพร่โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาและดำเนินการตามหน้าที่และอำนาจของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ว่ากล่าวถึงบุคคลหรือหน่วยงานใด ๆ ทั้งสิ้น

วิธีที่ 1 การย้อมที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส โดยใช้สารนำพา

วิธีที่ 2 การย้อมที่อุณหภูมิ 120-130 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันโดยไม่ใช้สารนำพา

วิธีที่ 3 การย้อมแบบ Pad-Thermosol

วิธีดังกล่าวข้างต้นต่างก็ให้น้ำเสียที่มีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ วิธีที่ 1 น้ำเสียจะมีสารนำพาซึ่งเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษปะปนออกมาด้วย ในขณะที่ วิธีที่ 2 จะไม่มีสารนำพา แต่จะมีปริมาณน้ำเสียมากกว่าวิธีที่ 3

#### 2.2.4 ลักษณะและคุณสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บน้ำแบบจ้วงตัก ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD), ค่าซีโอดี (COD), ค่าความเป็นกรดต่าง (pH), ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสีซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt Co)	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าฝ้าย	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าหรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

หมายเหตุ “1” ค่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับหรือน้อยกว่า 50 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ของเสียที่เป็นของแข็ง (Solid Wastes) ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ขนาดและประเภทของโรงงานลักษณะของเสีย ประสิทธิภาพของเครื่องจักรและระดับการดูแลเอาใจใส่ต่อปัญหาเรื่องของเสีย และเทคนิคการจัดการโรงงาน

ของเสียที่เป็นพิษ (Hazardous Wastes) ของเสียกลุ่มนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ทำลายหรือกำจัดยาก เนื่องจากความเป็นพิษของสารเหล่านั้นจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการฟอกย้อมจะเอกลำน้ำทิ้งก่อให้เกิดของเสียที่เป็นพิษน้อยมากหรือไม่เลย แต่จะมีบางโรงงานที่ก่อให้เกิดของเสียที่เป็นพิษได้ไม่มากนักโดยหน่วยการผลิตที่ใช้สารเคมี ซึ่งสามารถแสดงลักษณะที่เป็นพิษได้เช่น ลูกติดไฟได้ง่าย กัดกร่อน

โลหะ เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย การปนเปื้อนของสารกับสารอื่นๆ ก็สามารถทำให้เกิดของเสียที่เป็นพิษได้ ดังนั้นหน่วยงานที่จำเป็นต้องใช้สารเหล่านี้ จะต้องมึวิธีการใช้งานการจัดเก็บและการตรวจสอบที่ถูกต้อง เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับของเสียกลุ่มนั้น ตัวอย่าง เช่น สารเร่งปฏิกิริยาตัวทำลายอินทรีย์ น้ำยาซักแห้ง และสารช่วยย้อมบางประเภท เป็นต้น

### 2.2.5 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีทั้ง สี สารเคมี และโลหะหนัก ปนเปื้อน จำเป็นต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีการบำบัดทางกายภาพและทางเคมี สามารถบำบัดสีได้บางประเภท แต่ไม่สามารถบำบัดสีได้ทั้งหมด สีที่พบในน้ำเสียมีความเป็นพิษต่ำ แต่มีปัญหาในเรื่องของสีที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำได้ ส่งผลให้พืชใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ มีผลทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลงและส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในน้ำน้อยลง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) นอกจากนี้ปัญหาสีที่พบในน้ำเสียก็ยังมีปัญหาโลหะในน้ำเสียซึ่งมาจากกระบวนการย้อมสีและการตกแต่ง ได้แก่ คอปเปอร์ (Cu), โครเมียม (Cr), แคดเมียม (Cd), เหล็ก (Fe), ตะกั่ว (Pb), นิกเกิล (Ni), สังกะสี (Zn), และสารหนู (As) (Vipul *et al.*, 2014)

ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีดังนี้

1. ระบบบำบัดทางกายภาพ เป็นการกำจัดสารแขวนลอยได้ด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต่อไป การบำบัดขั้นต้นที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ตะแกรงดักขยะและถังปรับสภาพ

2. ระบบบำบัดทางเคมี ระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมของประเทศไทย ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมีการดูดซับ โอโซนและการกรอง

3. ระบบบำบัดทางชีวภาพ

ระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมของประเทศไทยมี 3 ประเภท ได้แก่

3.1) ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งจะนิยมใช้ คือ ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์และบ่อเติมอากาศ

3.2) ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน นิยมใช้ระบบบ่อไร้ออกซิเจน

3.3) ระบบบำบัดน้ำเสียเลียนแบบกลไกธรรมชาติ นิยมใช้ระบบบ่อปรับเสถียร (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

### 2.2.6 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการอนุญาตปล่อยน้ำเสีย จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 โดยเป็นการสมควรปรับปรุงการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการประกอบกิจการโรงงานเพื่อให้มีค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจสอบน้ำทิ้งจากโรงงานให้เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานสากล รวมถึงเป็นการควบคุม

การระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้น

แต่ได้กระทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำที่ขุ่นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง จึงมีการออกประกาศ มาตรฐาน น้ำที่ขุ่นของค่าสี (Color) ต้องไม่เกิน 300 ADMI ประกาศบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เป็นต้นไป

## 2.3 แร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite)

ไพโรลูไซต์ คือ แร่แมงกานีส หรือ แมงกานีสออกไซด์ ( $MnO_2$ ) เป็นชนิดที่เกิดในธรรมชาติ มากที่สุด ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและออกซิเดชันในการดักจับตัวโลหะและสารแขวนลอยที่ปนเปื้อนมา กับน้ำได้แก่ เหล็ก แมงกานีส สารหนู คลอรีน และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยแหล่งกำเนิดแร่แมงกานีส ขนาดใหญ่อยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย บราซิล กาบอง อินเดีย เม็กซิโก แอฟริกาใต้ และยูเครน ซึ่งเป็น ประเทศที่มีการผลิตแร่แมงกานีสเป็นส่วนใหญ่ของโลก สถานที่ที่ค้นพบแร่ไพโรลูไซต์ในประเทศไทย ได้แก่ อำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดอื่นๆที่มีการ ค้นพบแร่ไพโรลูไซต์ คือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ลำพูน สุโขทัย แพร่ อุทัยธานี เลย สระแก้ว ระยอง ฉะเชิงเทรา เป็นต้น (จำลอง และคณะ, 2554)

### 2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ไพโรลูไซต์

ไพโรลูไซต์มีลักษณะเป็นของแข็ง ผลึกเป็นรูปเตตระโกนอลแต่ส่วนมากมักพบในผลึกลักษณะ Polianite มีลักษณะภายนอกคล้ายกิ่งไม้ หรือ รูปไต ความวาวแบบกึ่งอโลหะหรืออาจจะคล้ายดิน (รูปที่ 2.5) ความแข็งมีค่าอยู่ที่ 1-2 มีสีดำ หรือน้ำตาล ถ้าอยู่ในรูปผงจะมีลักษณะสี มีความทึบแสง ความถ่วงจำเพาะ มีค่า 4.73-4.66 เฉลี่ย 4.75 องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย Mn ประมาณ 63.2 และ O ประมาณ 36.8 และมีโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ปนอยู่บ้างเพียงเล็กน้อย สมบัติทางกายภาพและ ทางเทคนิคของไพโรลูไซต์ แสดงดังตารางที่ 2.8 โดยทั่วไปไพโรลูไซต์มีมูลค่าเพียงเล็กน้อยในการ จำหน่าย จึงมักถูกบำบัดหรือเปลี่ยนเป็นสารประกอบแมงกานีสที่มีค่ามากกว่าเดิม ไพโรลูไซต์มี คุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้น ไพโรลูไซต์จึงสามารถใช้เป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำที่มีการสึกกร่อนอยู่ที่ 2-3% ต่อปี ในกระบวนการดูดซับเนื่องจากมีอยู่มากใน ธรรมชาติ ใช้งานง่ายและไม่ต้องปรับสภาพ (Demirkiran *et al.*, 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แร่ไพโรลูไซต์ (Siam Yamano, 2019)

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพและทางเทคนิคของไพโรลูไซต์ (เอเซีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น จำกัด , 2559)

รูปแบบทางกายภาพ	เป็นเม็ด
ขนาดเฉลี่ย	0.8, 1.2, 3.0 mm
สี	น้ำตาล, ดำ
ส่วนประกอบ	แมงกานีสออกไซด์ (MnO <sub>2</sub> ) 30-60%
อัตราการไหล	5-12 gpm/sq.ft.
อัตราการล้างย้อน	25-30 gpm/sq.ft.
อัตราการเป่าอากาศ	1-2 บาร์ความดันอากาศ
ความสูงของสารกรอง	ไม่ต่ำกว่า 20 นิ้ว
ช่วง pH ที่เหมาะสม	6.5-9.0
ระยะเวลาการใช้งาน	5-10 ปี (ขึ้นต่ำ 5 ปี)
อัตราการสึกกร่อน	2% ต่อปี

### 2.3.2 ประโยชน์ของแร่ไพโรลูไซต์

แร่ไพโรลูไซต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น

1. สามารถกำจัดเหล็ก แมงกานีส และสารหนู ที่เจือปนในน้ำ
2. ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก
3. อัตราการกรองดีกว่าเทคโนโลยีการกรองแบบเดิมถึง 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยบริษัท อีเอสเอส จำกัด ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการกำจัดด้วยแร่ไพโรลูไซต์

ในปัจจุบัน มีการใช้การเกิดออกซิเดชันของแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) กันอย่างแพร่หลาย เช่น การผลิต  $MnO_2$  / CNT Hybrid Coaxial Nanotube และยังสามารถทำให้สารบางชนิดในน้ำ ตกตะกอนได้ด้วย จากการศึกษาของ (Pietrelli *et al.*, 2019) ในการนำแร่ไพโรลูไซต์และโคลนแดง มาใช้ดูดซับสารหนู (As) และแมงกานีส (Mn) ออกจากน้ำดื่มพบว่า แมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) ในแร่ไพโรลูไซต์มาเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการออกซิไดซ์มากขึ้น

Victor *et al.* (2019) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อม Orange G โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ ได้แก่ Brinessite สีดำ Brinessite สีน้ำตาลจากการสังเคราะห์ และแร่ไพโรลูไซต์เชิงพาณิชย์ ในการทดลอง พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการกำจัดสีอย่างเห็นได้ชัด การเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชันของแมงกานีสในสารละลายที่  $pH < 7$   $Mn^{IV}$  สามารถเปลี่ยนเป็น  $Mn^{II}$  ได้อย่างง่าย ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\bullet OH$ ) ดังปฏิกิริยาที่ 2.1

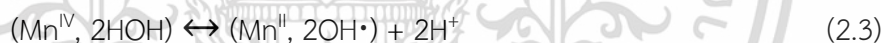


ซึ่งการก่อตัวของอนุมูลไฮดรอกซิล สามารถอธิบายได้โดยการสร้างสารตั้งต้นคิมเพล็กซ์  $Mn^{IV}$ -HOH ตามด้วยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเพื่อลด  $Mn^{IV}$  ไปยัง  $Mn^{II}$  ต้องการปลดปล่อยอนุมูลไฮดรอกซิลตามรูปแบบปฏิกิริยา 2.2-2.5

Formation of The Precursor Complex:



Electron Transfer:



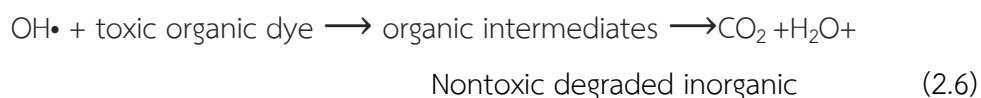
Release of Hydroxyl Radicals:



Release of Reduced  $Mn^{II}$ :



อนุมูลไฮดรอกซิลที่สร้างขึ้นสามารถออกซิไดซ์สีย้อมอินทรีย์ที่เป็นพิษเป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่เป็นพิษ ดังปฏิกิริยาที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ทฤษฎีของปฏิกิริยารีดอกซ์

ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) คือปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้นจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง ทำให้สถานะออกซิเดชันหรือเลขออกซิเดชันของธาตุเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางธาตุสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอนจะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยารีดักชัน ทั้งสองปฏิกิริยานี้จะเกิดควบคู่กันไปเสมอ ดังนั้นปฏิกิริยารีดอกซ์ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reaction)

### 2.4.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนจากวงโคจรให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (จะเกิดคู่กัน) สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน มักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สารให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่น ทำให้เลขออกซิเดชันของสารนั้นเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.7



จากปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่า Zn ให้อิเล็กตรอน 2 ตัว ทำให้เลขออกซิเดชันของ Zn เปลี่ยนจาก 0 เป็น +2

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สารรับอิเล็กตรอนจากสารอื่น ทำให้เลขออกซิเดชันของสารนั้นลดลง ดังสมการที่ 2.8



จากปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่า  $\text{Cu}^{2+}$  รับ 2 อิเล็กตรอน ทำให้เลขออกซิเดชันของ  $\text{Cu}^{2+}$  เปลี่ยนจาก +2 เป็น 0

เมื่อรวมปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2.9



จากปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่า Zn ให้อิเล็กตรอนแก่  $\text{Cu}^{2+}$  ทำให้เลขออกซิเดชันของ Zn เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น +2 แต่เลขออกซิเดชันของ  $\text{Cu}^{2+}$  ลดลงจาก +2 เป็น 0 เรียกสารที่ให้อิเล็กตรอนแก่สารอื่นแล้วเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเรียกสารที่รับอิเล็กตรอนจากสารอื่นแล้วเลขออกซิเดชันลดลงว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agent) จากปฏิกิริยารีดอกซ์ของโลหะสังกะสีในสารละลายทองแดง ตัวรีดิวซ์ คือ โลหะสังกะสี (Zn) และตัวออกซิไดส์ คือ สารละลายเอ็กสารนี้ทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) (เพ็ญศรี, 2539) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยามกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Reaction) และปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-Second Order Reaction) เป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ ยังมีสมการการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับที่ถูกนำมาอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย

### 2.5.1. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับแบบเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ ดังสมการที่ 2.7



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (Adsorbent) และ AxS คือสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed Compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.8)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที<sup>-1</sup>)

$q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

$q_e$  คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.8 โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการที่ 2.9

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.9)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จะได้ สมการที่ 2.10

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log (q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-\frac{k_1}{2.303}$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2. สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาการดูดซับ ดังสมการที่ 2.11



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง สามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.12)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่<sup>-1</sup>)

เมื่ออินทิเกรตสมการ 2.12 โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้ สมการที่ 2.13

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad (2.13)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น จะได้ สมการที่ 2.14

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q_t}$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_e}$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

### 2.5.3. การแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle Diffusion)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว ยังสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.15

$$q_t = k t^{0.5} + C \quad (2.15)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อเขียนระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**พัฒนศักดิ์ และคณะ (2557)** ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบเป็นตัวดูดซับแบบตรึงในคอลัมน์ โดยศึกษาผลความสูงของแกลบ 0.5-1.7 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู 25-100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหล 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่า แกลบมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเท่ากับ 1.68 ตารางเมตรต่อกรัม  $5.88 \times 10^{-3}$  ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 14.01 นาโนเมตร ตามลำดับ ที่ความสูงของแกลบ 1.7 เซนติเมตร อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพและร้อยละการดูดซับของคอลัมน์ที่อิ่มตัวที่จุดการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง และร้อยละ 46.15 ตามลำดับ สมการยูน-เนลสัน สามารถนำมาใช้ในการทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดีตลอดการทดลองในขณะที่เวลาที่ใช้ในการดูดซับจากผลการทดลองและจากแบบจำลอง Bed-Depth/Service Time มีค่าใกล้เคียง

**วรรณวิภา (2547)** ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็กโดยใช้การทดลองแบบแบทช์และแบบคอลัมน์ การทดลองนี้ใช้สีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow การทดลองแบบแบทช์ใช้ในน้ำเสียสังเคราะห์ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด คือ พีเอช 3, ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที, ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที, ขนาดของผงเหล็ก 12-100 เมช, ความเข้มข้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของเศษผงเหล็ก 1 กรัม ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow คือ เฉลี่ย 99.61%, 98.61%, 97.04%, 99.00%, 98.82% และ 94.89% ตามลำดับ สำหรับการลดบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของสีทั้งห้าสีสามารถลดได้ใกล้เคียงกันคือ เฉลี่ย 73.26%, 80.75%, และ 71.96% ตามลำดับ และค่าพีเอชเฉลี่ยหลังการทดลองที่วัดได้ คือ พีเอช 6.02 นอกจากนี้ยังพบว่า สมดุลการดูดซับสีย้อมเป็นแบบแลงเมียร์จากการศึกษาทางจลนศาสตร์เคมีโดยใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 5 ปฏิกริยาการกำจัดสีย้อมเป็นปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ส่วนในการทดลองแบบคอลัมน์สภาวะที่เหมาะสมการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ 5 คือ อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อวินาที

**Demirkiran et al., (2017)** ศึกษาการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์เป็นตัวดูดซับทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำ Pyrolusite ซึ่งมี  $MnO_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เวลาสัมผัส pH เริ่มต้นของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ความเร็วในการกวน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวดูดซับต่อการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่า เปอร์เซ็นต์ของสีย้อมดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณไพโรลูไซต์ที่เพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 25 ppm pH เริ่มต้น 6 เวลาสัมผัส 90 นาที ความเร็วในการปั่นกวน 250 รอบต่อนาที ขนาดอนุภาค 63 ไมโครเมตร และปริมาณตัวดูดซับ 12 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพของการดูดซับสีบนแร่ไพโรลูไซต์คือ

99% นอกจากนี้ พบว่า ไอโซเทอร์มกระบวนการดูดซับเป็นแบบ Langmuir และจลนศาสตร์แบบ Pseudo-Second Order Kinetic

ไม่ว่าการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนแร่ไพโรลูไซต์เป็นแบบ Langmuir และจลนศาสตร์แบบ Pseudo-Second Order Kinetic

**Pietrelli et al. (2019)** ศึกษาการนำแร่ไพโรลูไซต์และโคลนแดงมาใช้ดูดซับสารหนู (As) และ แมงกานีส (Mn) ออกจากน้ำดื่ม โดยใช้คอลัมน์สำหรับแท่งไพโรลูไซต์โคลนแดง และคลอรีน โดยแปรค่าปริมาณคลอรีนและแร่ไพโรลูไซต์ที่ต่างกัน เมื่อผ่านน้ำเสียที่มีแมงกานีส (Mn) และสารหนู (As) ลงในคอลัมน์ พบว่าแมงกานีส (Mn) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น ถูกแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO<sub>2</sub>) ในแร่ไพโรลูไซต์มาเร่งปฏิกิริยา ช่วยให้เกิดการออกซิไดซ์มากขึ้น ทำให้มีการตกตะกอน บนตัวแร่ไพโรลูไซต์มากขึ้น จากการทดลองพบว่าแร่ไพโรลูไซต์ที่ปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของคอลัมน์ และคลอรีนที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยกำจัดสารหนูและแมงกานีส เท่ากับ 99.30 และ 95.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

**Fransiscus (2019)** ศึกษาการใช้แร่ Pyrolusite ซึ่งมีอยู่อย่างมากในแถบภูเขาเต็งการาของประเทศอินโดนีเซียในการดูดซับแคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) โดยศึกษาปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่า pH และอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับปริมาณ Cd และ Pb จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่า pH ที่สูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมคือที่ pH7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เป็นไปตามสมการ Langmuir โดยสามารถ ดูดซับสูงถึง 108.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 123.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลอุณหภูมิพลศาสตร์และแบบจำลองไอโซเทอร์มพบว่า เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนและเกิดขึ้นเอง ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาทางเคมีผลักดันกลไกความสามารถในการดูดซับ Cd และ Pb ของ Pyrolusite เท่ากับ 108.70 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 123.45 มิลลิกรัมต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น BlueSter B ยี่ห้อ Lab Tech Model บริษัท โปรวิชั่น ไฮแอนติพิค จำกัด ประเทศไทย
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น QUANTA 250 ยี่ห้อ FEI บริษัท FEI Company ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น FIVEEASY PLUS FEP 20 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น MS3002TS/00 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
6. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert บริษัท ITS (Thailand) Co., Ltd. ประเทศไทย
7. Hotplate รุ่น Hei-Tec ยี่ห้อ Magnetic Stirrers บริษัท Heidolph Instruments GmbH & CO. KG ประเทศเยอรมนี
8. ตะแกรงร่อนขนาด (Sieve) 10 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. ตะแกรงร่อนขนาด (Sieve) 20 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)
11. Magnetic bar ขนาด 4 เซนติเมตร
12. กระดาษวัดค่าพีเอช (pH paper) ยี่ห้อ Merck ประเทศเยอรมนี
13. เครื่องกรองลดความดัน รุ่น A-3S บริษัท Tokyo Rikakikai Co., Ltd. ประเทศจีน
14. เครื่องเขย่าแบบแนวราบ รุ่น SHO-1D ยี่ห้อ WiseShake บริษัท Daihan Scientific Co., Ltd. ประเทศเกาหลี
15. Micropipette 100 – 1000 ไมโครลิตร รุ่น SHO-1D ยี่ห้อ Mettler บริษัท Rainin Instrument, LLC, Mettler Toledo Company ประเทศสหรัฐอเมริกา
16. ป้อนอัตราการไหล รุ่น 7524.45 ยี่ห้อ Masterflex L/S บริษัท Barnant Co. ประเทศสหรัฐอเมริกา
17. ท่อสายยาง (Tubing) L/S 13
18. กระดาษกรองเบอร์ 2 ยี่ห้อ Whatman ประเทศจีน
19. ถูน้ำเกลือ บริษัท ไทยโอซูก้า จำกัด ประเทศไทย
20. คอลัมน์แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 21. เครื่องแก้วต่างๆ

### 3.1.2 วัสดุและสารเคมี

1. แร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) จาก บริษัท พีเอส กรุป วอเตอร์ พลัส จำกัด
2. สีย้อม Reactive blue ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไตสตาร์ ไทย จำกัด ประเทศไทย
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) 98% เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FLUKA ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

### 3.2 การเตรียมแร่ไพโรลูไซต์

1. ชั่งแร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) 1 กิโลกรัม โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง
2. คัดแยกขนาดแร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด (Sieve) ขนาด 10 เมช และขนาด 20 เมช โดยเลือกใช้ขนาดแร่ไพโรลูไซต์ 10-20 เมช
3. ล้างแร่ไพโรลูไซต์ด้วยน้ำจนกว่าสีของน้ำล้างแร่ไพโรลูไซต์จะมีลักษณะใส
4. จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เก็บไว้ใช้งานต่อไป

### 3.3 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานวิทยาและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแร่ไพโรลูไซต์

#### 3.3.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ศึกษาโครงสร้างผลึกของแร่ไพโรลูไซต์ก่อนการทดลอง โดยนำแร่ไพโรลูไซต์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง โดยที่ยังไม่กำจัด นำมาส่งกล้องโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยใช้สภาวะของเครื่องมือดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Mode	High vacuum
Detector	SEM
HV (kv)	15.00
WD (mm)	8.1
Mag	50000 x
det	ETD
HFW	8.29

### 3.3.2 การศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

ศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ของสีย้อมรีแอกทีฟลู แร่ไฟโรลูไซด์ และแร่ไฟโรลูไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3 โดยใช้สภาวะของเครื่องมือดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

Spectra range	4000-400 $\text{cm}^{-1}$
Time	32 scans/min
Resolution	4 $\text{cm}^{-1}$

### 3.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟลู

เตรียมสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟลู โดยประยุกต์วิธีของ (Orfao *et al.*, 2006)

1. Stock Solution น้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟลู ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมโดยชั่งสีรีแอกทีฟลู 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้น เติมน้ำกลั่นปริมาตร 900 มิลลิลิตร คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน

2. เติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ปริมาณ 40 กรัม จากนั้น นำไปต้มจนกว่าโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ละลายหมด โดยควบคุมอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส

3. เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงที่กำหนดและโซเดียมคลอไรด์ละลายหมดแล้ว ให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1.5 กรัม นำไปต้มต่อที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 2 กรัม นำไปต้มต่อที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ไม่ว่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

6. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟบลู ดังตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังการทดลอง (วรพีพรรณ และคณะ, 2563)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
ค่าการส่องผ่าน (Transmittance,%T)	เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(UV-Visible Spectrophotometer)
ค่าสี (ADMI)	Method 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometric Method (APHA, AWWA and WEF., 2012)

**3.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู แบบแบทช์ โดยประยุกต์วิธี**  
(วรพีพรรณ และคณะ, 2563)

**3.5.1 ศึกษาผลของ กรด-ด่าง ที่เหมาะสม**

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟบลู ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.4

2. ปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 1 และ 0.1 โมลต่อลิตร หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 และ 0.1 โมลต่อลิตร

3. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. เติมแร่ไฟโรลูไซต์ที่อบไล่ความชื้น ปริมาณ 10 กรัม และปิดปากขวดด้วยพาราฟิล์ม จากนั้น นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

5. จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 โดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน

6. นำส่วนใสที่กรองได้ไปวิเคราะห์วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสี ในรูป ADMI (American Dye Manufacturers Institute) โดยวัด Transmittance (%T) ที่ความยาวคลื่นตามตารางในภาคผนวก ก ตารางที่ ก 1 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-6 อีก 2 ซ้ำ

8. ทำแบลงค์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์

9. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่แร่ไฟโรลูไซต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่แปรค่า pH 7 และไม่ปรับ pH (11)

### 3.5.2 ศึกษาผลระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลีย้อมรีแอกทีฟบลู ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.4

2. ปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์ ให้มี pH เท่ากับ pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1

3. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. เติมแร่ไฟโรลูไซต์ที่บไล้ความชื้น ปริมาณ 10 กรัม และปิดปากขวดด้วยพาราฟิล์ม จากนั้น นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

5. จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 โดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน

6. นำส่วนใสที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นสี ในรูป ADMI โดยวัด Transmittance (%T) ที่ความยาวคลื่นตามตารางในภาคผนวก ก ตารางที่ ก 1 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-6 อีก 2 ซ้ำ

8. ทำแปลงค์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์

9. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่แร่ไฟโรลูไซต์

10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่แปรค่าเวลาสัมผัส 10 และ 20 นาที

11. คำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับสีรีแอกทีฟบลู

### 3.5.3 ศึกษาปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลีย้อมรีแอกทีฟบลู ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.4

2. ปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีค่า pH เท่ากับ pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1

3. ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. เติมแร่ไฟโรลูไซต์ที่บไล้ความชื้น ปริมาณ 10 กรัมและปิดปากขวดด้วยพาราฟิล์ม จากนั้น นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.2

5. จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 โดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำส่วนใสที่กรองได้ไปวิเคราะห์วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นสี ในรูป ADMI โดยวัด Transmittance (%T) ที่ความยาวคลื่นตามตารางในภาคผนวก ก ตารางที่ ก 1 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำแบลนด์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์
9. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่ไม่ใส่แร่ไฟโรลูไซต์
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่แปรค่าปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ 5 กรัม, 15 กรัม และ 20 กรัม

### 3.6 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก, ปฏิกิริยาการดูดซับ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของการทดลอง

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟบลู ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.4
2. จากนั้นปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีค่า pH เท่ากับ pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1
3. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. เติมแร่ไฟโรลูไซต์ที่บไล่ความชื้น ปริมาณ 10 กรัม และ 20 กรัม
5. ตั้งทิ้งไว้ในที่สว่างและมีมืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. บันทึกผลการทดลองว่าเป็นปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก, ปฏิกิริยาการดูดซับ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน

### 3.7 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูแบบตรงในคอลัมน์

#### 3.7.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสม

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟบลู ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสต็อกน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 3.4
2. จากนั้นปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์ ให้มีค่า pH เท่ากับ pH ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1
3. เปิดน้ำเสียสังเคราะห์จากข้อ 2 ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ใส่ปีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
4. นำสำลีสมาซังน้ำหนัก 0.5 กรัม บรรจุใส่ลงในคอลัมน์ โดยใช้คอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ก่อนที่จะใส่แร่ไฟโรลูไซต์
5. นำแร่ไฟโรลูไซต์ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.3 ปริมาณ 20 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ ความสูงแร่ 5.2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ให้น้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ปั๊มในการควบคุมอัตราการไหลให้อยู่ที่ 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออก
7. แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
8. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นสี ในรูป ADMI (American Dye Manufacturers Institute) โดยวัด Transmittance (%T) ที่ความยาวคลื่นตามตาราง
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-8 อีก 2 ซ้ำ
10. ทำแบลนด์ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ และนำน้ำเสียใส่ลงในถุงน้ำเกลือ
11. ทำชุดควบคุม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ไม่ใส่แร่ไฟโรลูไซด์และนำน้ำเสียใส่ลงในถุงน้ำเกลือ
12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-11 แต่แปรค่าอัตราการไหล 1.60 และ 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที

### 3.8 การคำนวณทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการวิเคราะห์ โดยใช้ One Way-ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม โดยใช้ Tukey's Multiple Comparison ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 4

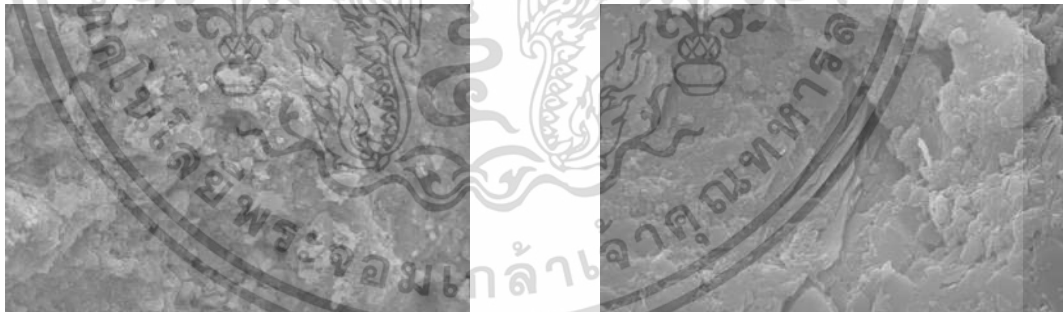
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบตช์และแบบตรึงในคอลัมน์ ซึ่งการทดลองแบบแบตช์ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ ส่วนแบบตรึงในคอลัมน์ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ อัตราการไหล ได้ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานวิทยาและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแร่ไพโรลูไซต์

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope , SEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแร่ไพโรลูไซต์ที่นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแร่ไพโรลูไซต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (ก) จะเห็นว่าแร่ไพโรลูไซต์เป็นผลึกเกาะรวมกลุ่มกัน การจัดเรียงตัวไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุนระหว่างอนุภาคน้อย ผิวขรุขระ และที่กำลังขยาย 50,000 เท่า (ข) จะเห็นแร่ไพโรลูไซต์เป็นผลึกแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นชัดเจน และรูพรุนค่อนข้างน้อยมาก ชัดเจนกว่ากำลังขยาย 10,000 เท่า



(ก)

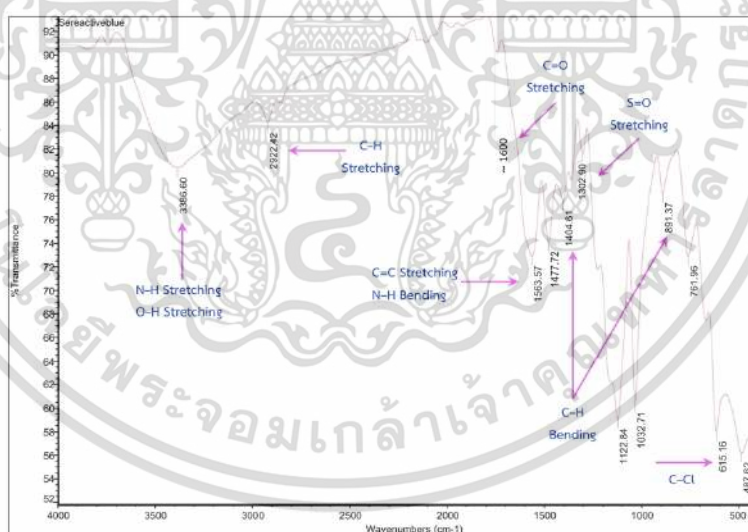
(ข)

**รูปที่ 4.1** ภาพแร่ไพโรลูไซต์ที่ผ่านการอบ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 50,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

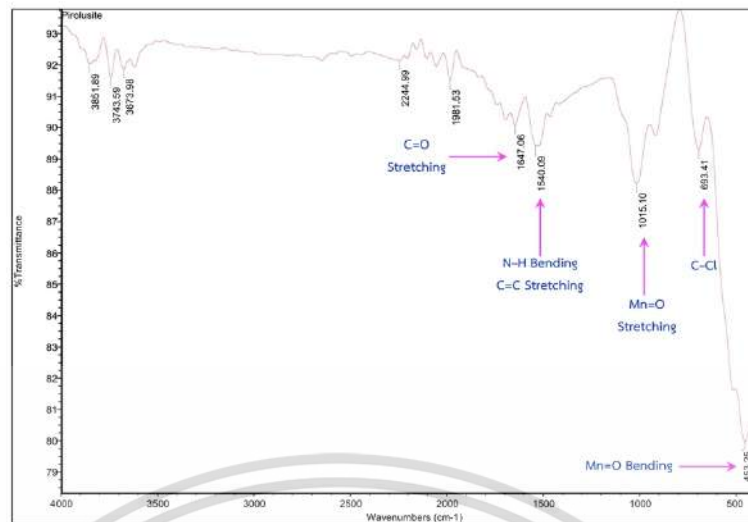
#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วย FT-IR ซึ่งจะพบว่า สีรีแอกทีฟบลู ปรากฏพีก N-H Stretching, O-H Stretching, C-H Stretching, C=C Stretching, C=O Stretching, N-H Bending, S=O Stretching และ C-Cl ที่เลขคลื่น 3386.60, 3386.60, 2922.42, 1563.57, ~ 1600, 1563.57, 1302.90 และ 615.16  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แร่ไพโรลูไซต์ จะปรากฏพีก C=C Stretching, C=O Stretching, N-H Bending, C-Cl, Mn=O Stretching และ Mn=O Bending ที่เลขคลื่น 1540.09, 1647.06, 1540.09, 693.41, 1015.10 และ 453.25  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แร่ไพโรลูไซต์หลังจากนำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3 จะปรากฏพีก C=C Stretching, C=O Stretching, N-H Bending, C-Cl, Mn=O Stretching และ Mn=O Bending ที่ เลขคลื่น 1594.64, ~ 1660, 1594.64, ~ 680, 998.40 และ 448.40  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ FT-IR จะพบว่าแร่ไพโรลูไซต์มี Mn=O เป็นองค์ประกอบหลัก จากผลการวิเคราะห์แร่ไพโรลูไซต์หลังจากนำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3 จะพบว่าพีกของ Mn=O มีค่าความเข้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจาก Mn=O ในแร่ไพโรลูไซต์บางส่วนถูกปกคลุมด้วยสีย้อมรีแอกทีฟบลู จึงสรุปได้ว่าแร่ไพโรลูไซต์สามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟได้เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.2 โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (ก) ซีรีแอคทีฟบลู (ข) แร่ไพโรลูไซต์ (ค) แร่ไพโรลูไซต์  
หลังจากนำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่พบในสีรีแอกทีฟบลู, แร่ไฟโรลูไซต์, แร่ไฟโรลูไซต์ หลังจากนำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3

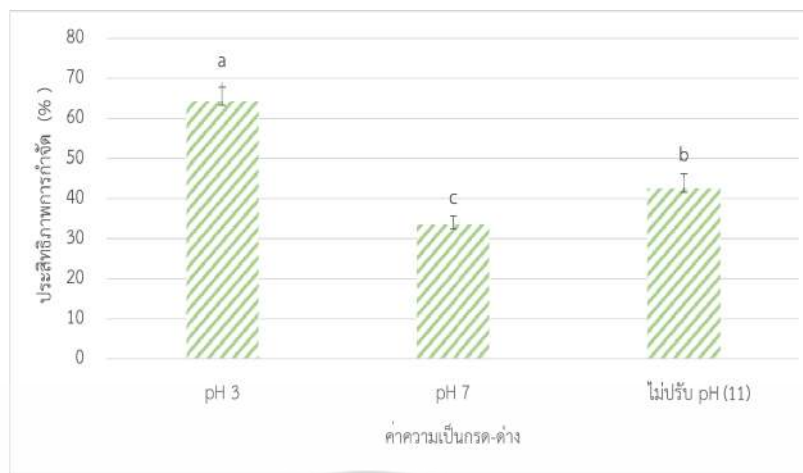
Bond Functional Group	สีรีแอกทีฟบลู (cm <sup>-1</sup> )	แร่ไฟโรลูไซต์ (cm <sup>-1</sup> )	แร่ไฟโรลูไซต์หลังจากนำไปบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3 (cm <sup>-1</sup> )
N-H Stretching	3386.60	–	–
O-H Stretching	3386.60	–	–
C-H Stretching	2922.42	–	–
C=C Stretching	1563.57	1540.09	1594.64
C=O Stretching	~ 1600	1647.06	~ 1660
C-H Bending	891.37, 1404.61	–	–
N-H Bending	1563.57	1540.09	1594.64
C=N Stretching	2200 ~ 2300	–	–
S=O Stretching	1302.90	–	–
Mn=O Stretching	–	1015.10	998.40
Mn=O Bending	–	453.25	448.40
C-Cl	615.16	693.41	~ 680

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบบแบทช์

### 4.2.1 ผลการศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

ผลการศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ 10.0001 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที โดยการแปรค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 3, 7 และไม่ปรับ pH (11) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดใน ตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



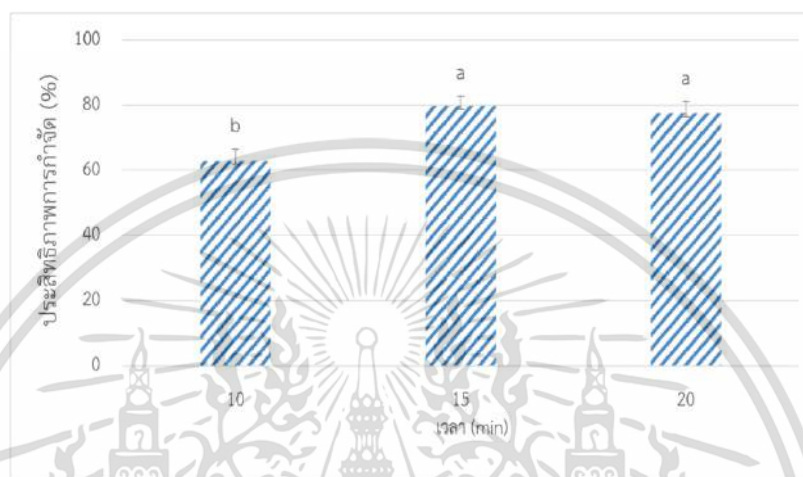
รูปที่ 4.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลู

จากผลการศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม พบว่า pH 3, 7 และไม่ปรับ pH (11) มีค่าเฉลี่ยสีย้อมก่อนการกำจัดในหน่วย ADMI เท่ากับ  $3350.4690 \pm 195.12$ ,  $3731.5650 \pm 259.95$  และ  $3223.4370 \pm 214.81$  ตามลำดับ และค่าสีย้อมหลังการกำจัดในหน่วย ADMI ได้  $1090.7868 \pm 55.01$ ,  $2487.7100 \pm 253.34$  และ  $1847.2570 \pm 150.08$  ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ  $64.32 \pm 3.59$ ,  $33.44 \pm 2.22$  และ  $42.66 \pm 3.42$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง เนื่องจากที่สภาวะกรด  $MnO$  ในรูป  $Mn^{IV}$  จะแตกตัวเป็น  $Mn^{II}$  และเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลอิสระ ( $\cdot OH$ ) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลอิสระ ( $\cdot OH$ ) จะทำปฏิกิริยากับสีย้อมรีแอกทีฟพลูเกิดการแตกตัวทำให้สีย้อมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของงานวิจัยของ Victor *et al.* (2019) พบว่าการบำบัดสี Orange G ด้วย  $MnO$  มีการกำจัดสีดีที่สุดในช่วง pH 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เป็นกรด อย่างไรก็ตามที่ไม่ปรับ pH น้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่า pH เป็น 11 ซึ่งมีแนวโน้มการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นมากกว่าพีเอช 7 ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากตัวแร่ไฟโรลูไซต์อาจมีองค์ประกอบอื่นที่มีความเป็นเบสเจือปนอยู่ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ อาจเป็นพวกแอลคาไลน์ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมหรือแอลคาไลน์เอิร์ท อาจละลายออกมาทำให้ pH เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิรังรอง (2558) พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมเมทิลเรดจะดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 3 เนื่องจากสีย้อมเมทิลเรดเป็นสีย้อมกรด การดูดซับจะดีเมื่อสารละลายมีพีเอชต่ำ และเมื่อพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะมีแนวโน้มลดลงและจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมากกว่า 7 จากการนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติโดยใช้ One Way ANOVA พบว่าที่ pH 3 มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าที่พีเอชอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1.3 ภาคผนวก ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 3 และใช้แร่ไพโรลูไซต์ 10.0001 กรัม นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 10, 15 และ 20 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.1ภาคผนวก ข )



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระยะเวลาสัมผัส 10, 15, 20 นาที มีค่าเฉลี่ยสีย้อมรีแอกทีฟบลูก่อนการกำจัดเท่ากับ  $2620.0350 \pm 249.55$ ,  $2551.2260 \pm 78.32$  และ  $2582.9840 \pm 128.34$  ADMI ตามลำดับได้ มีค่าเฉลี่ยสีย้อมรีแอกทีฟบลูหลังการกำจัดเท่ากับ  $973.9120 \pm 162.19$ ,  $518.7140 \pm 93.04$  และ  $576.9370 \pm 66.10$  ADMI ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเท่ากับ  $62.93 \pm 3.46$ ,  $79.73 \pm 3.08$ ,  $77.56 \pm 3.63$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระยะเวลาที่สัมผัสกับสีย้อมรีแอกทีฟบลูเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟบลูจะสามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของแร่ไพโรลูไซต์ได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมที่เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สมดุล จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติโดยใช้วิธี One Way ANOVA ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1.2 ภาคผนวก ค ) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่เวลา 15 และ 20 นาที สูงกว่าที่เวลา 10 นาที โดยระยะเวลาสัมผัส 15 และ 20 นาที แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพชรวรรณ (2559) พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับจะทำให้ค่า

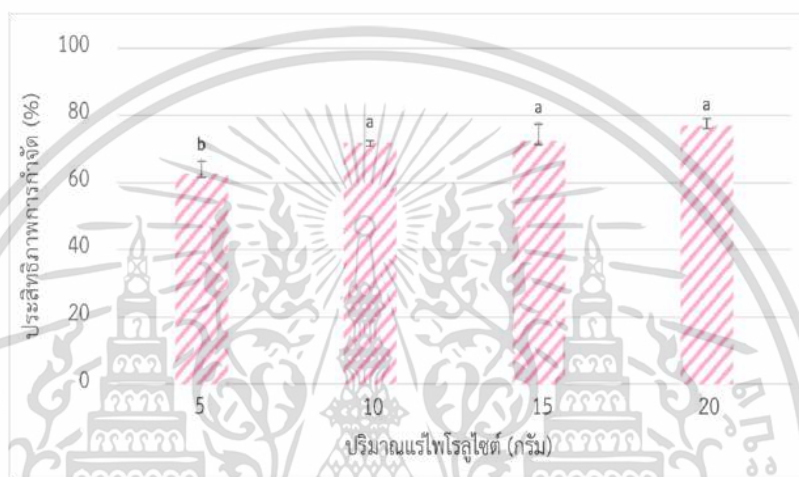
ความสามารถของตัวดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มโอกาสของสีย้อมรีแอกทีฟบลูในการสัมผัสกับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของแร่ไพโรลูไซต์ และงานวิจัยของ Victor *et al.* (2019) พบว่า ช่วงเวลาที่ 15 และ 30 นาที มีการบำบัดสี Orange G ไม่ต่างกัน

#### 4.2.3 ผลการศึกษาของปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่เหมาะสม

ผลการศึกษาปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 3 เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที โดยแปรค่าปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่ 5.0000, 10.0001, 15.0000 และ 20.0002 กรัม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1ภาคผนวก ข )



รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลู

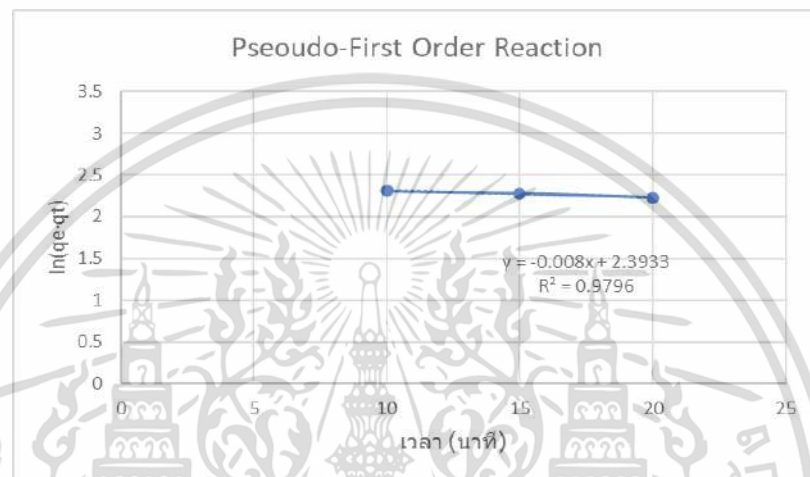
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลูที่ปริมาณของแร่ไพโรลูไซต์ที่ 5.0000, 10.0001, 15.0000 และ 20.0002 กรัม พบว่ามีค่าเฉลี่ยสีย้อมรีแอกทีฟพลูก่อนการกำจัดเท่ากับ  $2884.6850 \pm 60.11$ ,  $2762.9460 \pm 72.76$ ,  $2699.4300 \pm 15.87$  และ  $2821.1690 \pm 204.17$  ADMI มีค่าเฉลี่ยสีย้อมรีแอกทีฟพลูหลังการกำจัดเท่ากับ  $1079.7720 \pm 104.12$ ,  $778.0710 \pm 27.50$ ,  $746.3130 \pm 129.97$  และ  $645.7460 \pm 24.25$  ADMI ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดที่  $62.56 \pm 3.72$ ,  $71.83 \pm 0.65$ ,  $72.33 \pm 4.97$  และ  $77.03 \pm 1.97$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลูเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ และเริ่มคงที่ที่ 10.0001 กรัม เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม One Way ANOVA พบว่าที่ปริมาณแร่ 10.0001, 15.0000 และ 20.0002 กรัม สูงกว่า 5.0000 กรัม โดยที่ปริมาณแร่ 10.0001, 15.0000 และ 20.0002 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟพลูได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3.3 ภาคผนวก ค)

เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแร่ไพโรลูไซต์กับสีย้อม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

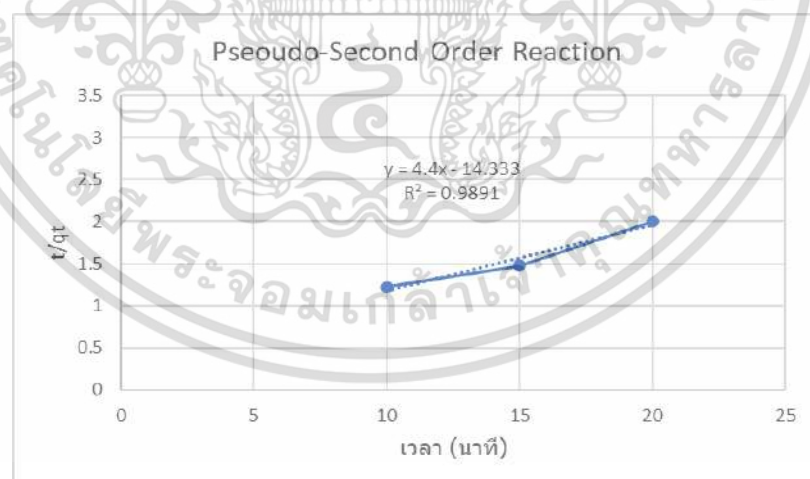
รีแอกทีฟสูงมากขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิรัชรอง (2558) และงานวิจัยของ Victor *et al.* (2019)

### 4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 Pseudo-First Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟสูง ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.7 Pseudo-Second Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟสูง ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ต่างๆของจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์

สี	Pseudo-First Order Reaction			Pseudo-Second Order Reaction		
	$K_1$	$q_e$	$R^2$	$K_2$	$q_e$	$R^2$
สีรีแอกทีฟบลู	0.0184	247.3432	0.9796	1.3189	0.2273	0.9891

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของจลนพลศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่า การดูดซับสีรีแอกทีฟบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์เป็นไปตาม Pseudo-Second Order Reaction เนื่องจากค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า Pseudo-First Order Reaction ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9891

#### 4.4 ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก, ปฏิกิริยาการดูดซับ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของแร่ไพโรลูไซต์

ผลการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของแร่ไพโรลูไซต์ในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 3 ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10.0001 และ 20.0002 กรัม ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในที่สว่างและมีด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อตั้งไว้ที่สว่าง ที่ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 20.0002 กรัมสามารถกำจัดสีได้ดีกว่าปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10.0001 กรัม (รูปที่ 4.8 ก) โดยได้ผลเช่นเดียวกับเมื่อตั้งไว้ที่มืด (รูปที่ 4.8 ข) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าแสงไม่ได้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงคาดว่าไม่น่าจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก จากการตรวจสอบพื้นผิวของแร่ไพโรลูไซต์โดยตา พบว่าไม่มีสีรีแอกทีฟบลูเกาะอยู่ (รูปที่ 4.9) จึงคาดว่าอาจมีปฏิกิริยาการดูดซับเกิดในรูพรุน ดังนั้น การกำจัดสีรีแอกทีฟบลูน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของแมงกานีสที่เป็นองค์ประกอบของแร่ไพโรลูไซต์และปฏิกิริยาการดูดซับบนพื้นผิวเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ควรทำการทดลองเพื่อยืนยันต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ภาพแสดงผลการศึกษาปฏิกิริยา (ก) ที่สว่าง (ข) ที่มีด



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 ภาพแสดงผลการเกาะติดของสีย้อมรีแอกทีฟบนพื้นผิวของแร่ไพโรลูไซต์

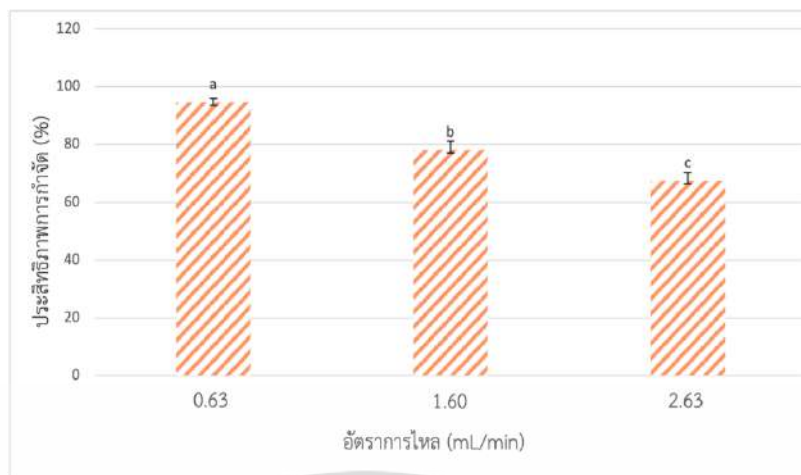
(ก) ที่สว่าง แร่ 10.0001 กรัม และ 20.0002 กรัม

(ข) ที่มีด แร่ 10.0001 กรัม และ 20.0002 กรัม

#### 4.5 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบบตรงในคอลัมน์

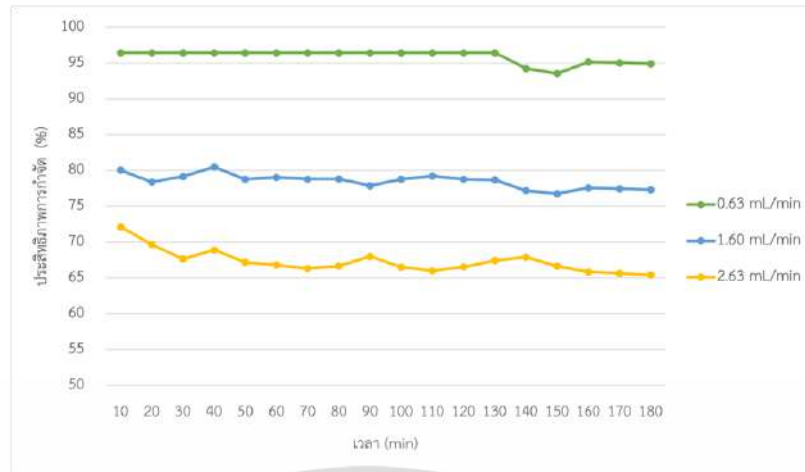
##### 4.5.1 ผลการศึกษาของอัตราการไหลที่เหมาะสม

ผลการศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณแร่ 20.0002 กรัม ความสูงแร่ 5.2 เซนติเมตร ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยแปรค่าอัตราการไหล 0.63, 1.60 และ 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ รูปเอกสารนี้ที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.1 ภาคผนวก ข) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลู

จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 0.63, 1.60 และ 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าเฉลี่ยสีย้อมก่อนการกำจัดเท่ากับ  $2883.8028 \pm 162.94$ ,  $3750.6786 \pm 775.74$  และ  $3360.1728 \pm 131.31$  ADMI ค่าเฉลี่ยสีย้อมหลังการกำจัดเท่ากับ  $158.0843 \pm 30.73$ ,  $809.2409 \pm 146.46$  และ  $1092.2694 \pm 85.72$  ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ  $94.63 \pm 1.37$ ,  $78.18 \pm 2.98$  และ  $67.48 \pm 2.72$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One Way ANOVA พบว่าอัตราการไหล 0.63, 1.60 และ 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถกำจัดสีย้อมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-4.4 ภาคผนวก ค) เนื่องจากอัตราการไหลที่ต่างกันส่งผลให้แร่ไฟโรลูไซด์มีเวลาสัมผัสกับสีย้อมรีแอกทีฟลูต่างกัน โดยเมื่ออัตราการไหลต่ำๆ ทำให้แร่ไฟโรลูไซด์มีเวลาสัมผัสกับสีย้อมรีแอกทีฟลูนานขึ้น จึงทำให้สีย้อมรีแอกทีฟลูเกิดปฏิกิริยากับแร่ไฟโรลูไซด์มากยิ่งขึ้น เป็นผลทำให้ความสามารถการกำจัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกนกวรรณ (2560) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์และแร่ไฟโรลูไซด์น้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของค่าสี (Color) ต้องไม่เกิน 300 ADMI จากผลการทดลอง พบว่าที่อัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าสี ADMI หลังจากการกำจัดมีค่าเฉลี่ย  $158.0843 \pm 30.73$  ADMI ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วนที่อัตราการไหล 1.60 และ 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าสี ADMI หลังจากการกำจัดมีค่าเฉลี่ย  $809.2409 \pm 146.46$  และ  $1092.2694 \pm 85.72$  ADMI ตามลำดับ ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง 300 ADMI นอกจากนี้ยังพบว่า ที่เอกสารนี้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง แร่ไฟโรลูไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอัตราการไหล เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟบลู 80 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที โดยทำการศึกษาผลการวิเคราะห์คุณลักษณะ ทางสัณฐานวิทยาของแร่ไพโรลูไซต์และสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ โดยการทดลองแบบแบทช์ และอัตราการไหล โดยการทดลองแบบคอลัมน์ สามารถสรุปผลแบ่งตามการทดลองได้ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่าแร่ไพโรลูไซต์เป็นผลึกแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นชัดเจน และมีรูพรุน ค่อนข้างน้อย

2. การกำจัดสีรีแอกทีฟบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมี กระบวนการดูดซับบนพื้นผิวเพียงเล็กน้อย

3. สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ คือ ที่ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟบลู 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที pH 3 ระยะเวลาการสัมผัส 15 นาที ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10 กรัม มี ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ที่  $71.84 \pm 0.65$  เปอร์เซ็นต์

4. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าการดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำ เสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์เป็นแบบ Pseudo-Second Order Reaction ( $R^2=0.9891$ )

5. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์แบบตรง ในคอลัมน์ 20 กรัม ที่ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟบลู 80 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 3 อัตราการไหล 0.63 มิลลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่  $94.63 \pm 1.37$  เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูมีค่าค่อนข้างคงที่ในระยะเวลา 180 นาที

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มระยะเวลาในการทดลองแบบคอลัมน์จนเข้าสู่สภาวะสมดุล
2. ควรทดลองนำแร่ไพโรลูไซต์ที่ผ่านการใช้งานกลับมาใช้ซ้ำ
3. ควรศึกษาโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะในน้ำเสียหลังการกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ ศรีม่วง. (2560). **ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมไหมโดยใช้ถ่านหินบดเคลือบเพอร์ริคโคลไรต์**. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น).
- กรมทรัพยากรธรณี. (2558). **ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite)**. (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม).
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2551). **คู่มือ Lean Management for Environment สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2556). **ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อมที่นิยมใช้**. (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม).
- กาวิ ศรีกุลกิจ. (2545). **หลักการย้อมสีสิ่งทอ ว.คัลเลอร์เวย์. 6[34]: 20-22.**
- ชนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. (2550). **ประเภทของสีย้อม**. สืบค้นเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.tpa.or.th/writer/ประเภทของสีย้อม>
- จำลอง ปินตาวงศ์. อานนท์ นนทโส. และสถาพร กาวินทร. (2554). **แนวทางการบริหารจัดการทรัพยากรแร่แมงกานีส ปิงบประมาณ พ.ศ. 2554**. (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ).
- นันทยา ยานูเมศ (2539). **ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. *Thai Environmental Engineering Journal*.
- พชรวรรณ อึ้งศิริสวัสดิ์. (2559). **การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้เปลือกหน่อไม้แห้ง**. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น).
- พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี. ชนิษฐา แก้วอิน. รวิินทร์ สุทธินันท์. และ โกวิทย์ ปิยะมังคลา. (2557). **การดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้แกลบ แบบตรึงในคอลัมน์**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 24(2), 398-408.
- เพ็ญศรี ทองนพเหนือ. (2539). **เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า**. (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- โมเดิร์นไดสตัฟฟ์ แอนด์ ฟิกเมนท์ส จำกัด. (2543). **โครงสร้างสีย้อม**. สืบค้นเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2565, จาก [http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files//00982/chapter2.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files//00982/chapter2.pdf)
- ราตรี ปิ่นทอง. ลักษณะ ต้นติจรรยารัตน์. และ สุธาสิณี วงศ์ศรีวัฒนกุล. (2543). **การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและมันสำปะหลัง**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- วรพีพรรณ. (2563). **การบำบัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียด้วยแร่ไพโรลูไซต์**.
- วรรณวิภา ผลาหาญ. (2547). **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผลเหล็ก**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ม.ป.ท.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- วรุฒ วรณวัตร. กมลชนก คุ่มปลื. กนกพร รसानนท์. และชุตติกาญจน์ พรหมชัย. (2564). การบำบัดสารละลายลิกนินและสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้อนุภาคนาโนเหล็กวาเลนซ์ศูนย์. (ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ (2558). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. (สาขาวิชาเคมี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์).
- วิโรจน์. (2560). การดูดซับโลหะหนักของเซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. (2542). กระบวนการพอกย้อมเส้นด้าย. (กองส่งเสริมเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน).
- อังคณา อมรศรี. (2540). สีย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์, 6(35):16.
- เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็ม โซลูชั่น. (2559). การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสของแร่ไพโรลูไซต์เปรียบเทียบกับแมงกานีสกรีนแซนด์และแมงกานีสซีโอไลต์. (กรุงเทพฯ: เอเชีย วอเตอร์ ซิสเต็มโซลูชั่น).
- Al-Degs, Y. S., Khraisheh, M. A., Allen, S. J., & Ahmad, M. N. (2009). Adsorption characteristics of reactive dyes in columns of activated carbon. *J Hazard Mater*, 165(1-3), 944-949.
- Demirkiran, N., Turhan Ozdemir, G.D., Sarac, M., Dardagan, M. (2017). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by pyrolusite ore. *Mongolian Journal of Chemistry*. 5-11.
- Fransiscus (2019). The use of pyrolusite to remove Pb and Cd in aqueous solutions: Isotherm and thermodynamic. Department of Chemical Engineering, University Of Surabaya, Raya Kalirungkut, Surabaya, 60293, Indonesia.
- Judd, D.B. and Wyszecski, G. (1975). *Color in Business, Science and Industry* (3<sup>rd</sup> ed.). New York: Wiley.
- Orfao, J.J.M., Silva, A. I. M., Pereira, j. C. V., Barata, S. A., Fonseca, I.M., Faria, P. C. C., and Pecera, M. F. R. (2006). Adsorption of a reactive dye on chemical modified activated carbons-Influence of pH. *Colloid and Interface Science*. 296, 480-489.
- PHISIT.( ม.ป.ป.). **สีรีแอกทีฟ (REACTIVE DYES)**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กันยายน 2565, จาก <https://www.phisit.com/knowledge/สีรีแอกทีฟ-reactive-dyes/>
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Pietrelli, L. I. (2019). Removal of Mn and As from drinking water by red mud and pyrolusite. *Journal of Environmental Management*, 526-533.
- Siam Yamano. (2019). แร่ YAMANO เป็นแร่ที่ได้จากธรรมชาติ 100%. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กันยายน 2565, จาก <https://www.siamyamano.com>
- Success Jigsaw คิด ทำ สำเร็จ. (2559). คำสี ADMI มาตรฐานใหม่ตามกฎหมาย. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กันยายน 2565, จาก <https://successjigsaw.com/tag/คำสี-admi/>
- Victor, R.P.D., Fontes, L.L.M., Neves, A.A., de Queiroz, M.E.L.R., de Oliveira A.F., Miranda, L.D.L. (2019). Removal of Orange G dye by manganese oxide nanostructures. *J. Braz. Chem. Soc.* 30(8), 1769-1778.
- Vipul, B., Paresh, k., and Gaurav, S. (2014). Toxicity of heavy metals pollutants in textile mills effluents. *International of Scientific & Engineering Research.* 5(7), 664-666.
- Zee, F.V., Bisschops, I., Blanchard, V., Bouwman, R., Lettinga, G., and Field, J. (2003). The contribution of biotic and abiotic processes during azo dye reduction in anaerobic sludge. *Water Resource.* 37(13), 3098-3109.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## การเตรียมสารละลายมาตรฐานสี

การวัดค่าสีในหน่วย ADMI (วรุต และคณะ, 2564)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
2. เครื่องแก้วต่างๆ
3. คิวเวตแบบควอตซ์

### สารเคมี

1. สารช่วยกรอง Celite No.505
2. กรดซัลฟิวริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง สำหรับปรับ pH
3. สารละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट ( $K_2PtCl_6$ ) 250 หน่วยสี

### วิธีการทดลอง

- 1.เตรียมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 200, 250, 300, 400 และ 500 ADMI โดยการเจือจางสารละลายสต็อกจากสารมาตรฐานสี 500 ADMI โดยปิเปตมา 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็นปริมาตร 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร สำหรับสารละลายสีมาตรฐานที่มีสีเท่ากับ 500 ADMI ไม่ต้องปรับปริมาตร จากนั้นนำมาวัด ค่าทรานส์มิเทนซ์ (%T) แต่ความยาวคลื่น ตามตารางที่ 1
- 2.ทำการกรองตัวอย่างน้ำ ด้วยฟิวเตอร์ขนาดรูพรุน 40 ไมโครเมตร
- 3.นำไปวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ตามตารางที่

ก-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก การวัดหาค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ที่ความยาวคลื่นต่างๆและคำนวณกราฟมาตรฐานสี ตารางที่ ก-1.1 ตารางแสดงค่า Wavelength (nm)

Coordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	642.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

4. เมื่อได้ค่า %T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่ามารวมกันในแต่ละแกน จากนั้นคูณด้วย Factor ของแกนนั้นๆ จะได้ค่าที่คูณ Factor ของแกน X, Y, Z โดยจะให้สัญลักษณ์เป็น Xs, Ys, และ Zs ตามลำดับ และให้ค่าของน้ำกลั่น เป็น Xc, Yc, และ Zc ตามลำดับ

5. นำค่า Xs, Ys, Zs, Xc, Yc, และ Zc แปลงค่าเป็น Munsell จะได้เป็น Vxs, Vys, Vzs, Vxc, Vy และ Vz ตามค่าตารางของ Adam-Nickerson (Judd, D.B. et al., 2000)

6. เมื่อได้ค่าแล้วให้นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE ของแต่ละตัวจากสมการของ Bridgeman

$$DE = \left[ (0.23\Delta Vy)^2 + (\Delta(Vx-Vy))^2 + (0.4\Delta(Vy-Vz))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อ

$$\Delta Vy = Vyc - Vys$$

$$\Delta (Vx - Vy) = (Vxc - Vyc) - (Vxs - Vys)$$

$$\Delta (Vy - Vz) = (Vyc - Vzc) - (Vys - Vzs)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จากนั้นนำค่า DE ที่ได้มาคำนวณค่า ADMI จากสมการ

$$\text{ADMI Unit} = \frac{(F)(DE)}{b}$$

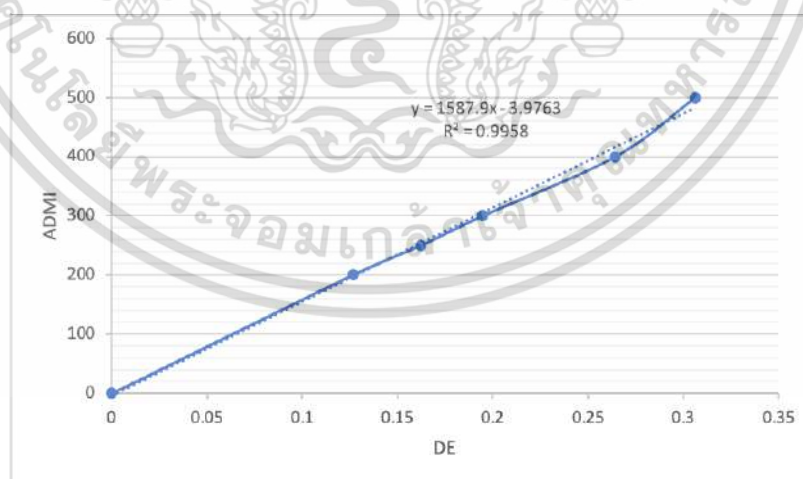
เมื่อ

F คือ Calibration Factor ค่าที่ได้จากการหากราฟของค่า ADMI กับค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

b คือ ความกว้างของเซลล์วัดแสง (cm)

#### ผลการทดลอง

Blank	Xc	Yc	Zc	Vxc	Vyc	Vzc	DE	ADMI
0	98.02	100.00	117.94	9.90	9.90	9.89	0	0
Std.	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
200	95.27	97.63	105.93	9.79	9.80	9.48	0.126511	200.88
250	94.97	97.24	103.07	9.78	9.79	9.38	0.162296	257.70
300	94.74	97.15	100.83	9.77	9.79	9.30	0.194690	309.15
400	93.49	96.04	94.97	9.71	9.74	9.08	0.264299	419.68
500	94.06	96.54	92.70	9.74	9.76	8.99	0.306354	486.46



รูปที่ ก-1.1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. สมการการคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสี

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ADMI)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นที่ถูกกำจัดในเวลาต่างๆ (ADMI)

## วิธีการคำนวณหาค่าสีในหน่วย ADMI

ตัวอย่างการคำนวณในหน่วย ADMI pH 3

- นำตัวอย่างวัดหาค่า (%T) ในช่วงความยาวคลื่น ตามตารางที่ 1 ได้ค่าดังนี้

ตัวอย่าง pH 3	%T แต่ละความยาวคลื่น วัด 10 ความยาวคลื่น									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Blank										
x	98.92	98.92	98.92	98.92	98.92	98.92	98.92	98.92	98.92	99.66
y	99.32	99.45	99.48	99.38	99.41	99.43	99.47	99.5	99.52	99.58
z	98.36	98.41	98.52	98.6	98.65	98.72	98.78	98.83	98.91	99.02
Sample										
x	80.65	83.28	72.79	65.75	62.11	59.98	58.46	56.89	66.78	79.79
y	83.89	80.16	77	73.58	70.4	66.41	63.38	60.49	58.25	59.06
z	79.26	80.09	80.85	81.32	81.83	82.46	83.2	83.72	84.16	83.64
Control										
x	99.94	99.36	90.68	86.19	83.59	81.99	81.03	80.28	85.78	92.26
y	97.95	95.32	93.27	91.15	89.22	86.64	84.53	82.38	80.91	81.65
z	99.84	99.62	99.52	99.43	99.31	99.19	98.98	98.79	98.5	97.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บวกค่าแกนแต่ละแกน และคูณด้วย Factor ของแต่ละแกนนั้นๆ ได้ค่าดังนี้

Blank	
x	$989.94 \times 0.09806 = 97.07$
y	$994.54 \times 0.10000 = 99.45$
z	$986.80 \times 0.11814 = 116.58$
Sample	
x	$686.48 \times 0.09806 = 67.32$
y	$692.62 \times 0.10000 = 69.26$
z	$820.53 \times 0.11814 = 96.94$
Control	
x	$881.10 \times 0.09806 = 86.40$
y	$883.02 \times 0.10000 = 88.30$
z	$990.60 \times 0.11814 = 117.03$

3. ใช้ค่า Xs, Ys, Zs, Xc, Yc, และ Zc แปลงค่าเป็น Munsell จะได้เป็น Vxs, Vys, Vzs, Vxc, Vy และ Vzc ตามค่าตารางของ Adam-Nickerson (Judd, D.B. et al., 2000) จะได้ค่า Vxs = 9.88 , Vys =9.88, Vzs = 9.85  
 Vxs = 8.51, Vys =8.54, Vzs = 9.15  
 Vxs = 9.42, Vys =9.42, Vzs = 9.86

4. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE จากสมการของ Bridgeman และ นำค่า DE ไปหาค่า ADMI ต่อไปตามสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ

$C_0$  คือ ความเข้มสีเริ่มต้น (ADMI)

$C_t$  คือ ความเข้มสีที่ถูกกำจัดในเวลาต่างๆ (ADMI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ผลการทดลอง

ผลการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พารามิเตอร์ต่างๆ

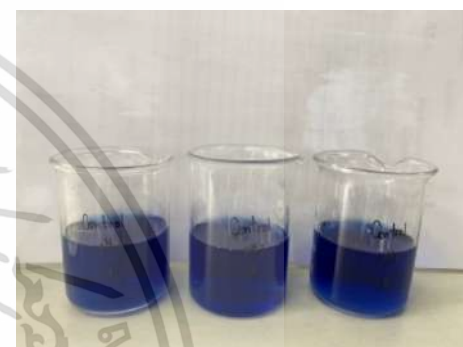
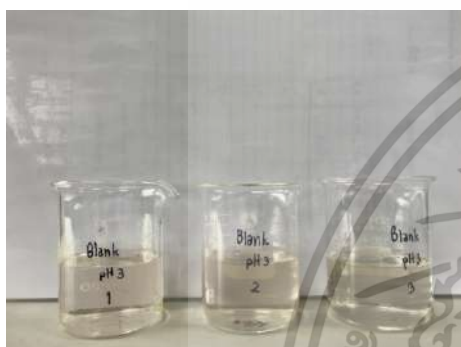
ภาคผนวก ข-1 ผลการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ

ตารางที่ ข-1.1 ผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

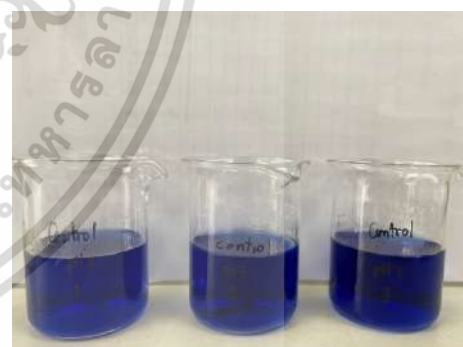
pH	ค่าที่วัดได้ ก่อนการกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังการกำจัด(ADMI)					ประสิทธิ ภาพในการ กำจัดสี (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
ไม่ปรับpH	3429.8640	3239.3160	3001.1310	3223.4370	214.8071	2016.6330	1730.8110	1794.3270	1847.2570	150.0824	42.66
3	3271.0740	3207.5580	3572.7750	3350.4690	195.1244	1222.6830	1222.6830	1127.4090	1190.9250	55.0065	64.32
7	3795.0810	3445.7430	3953.8710	3731.5650	259.9504	2556.5190	2207.1810	2699.4300	2487.7100	253.2356	33.44



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ข-1.1 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

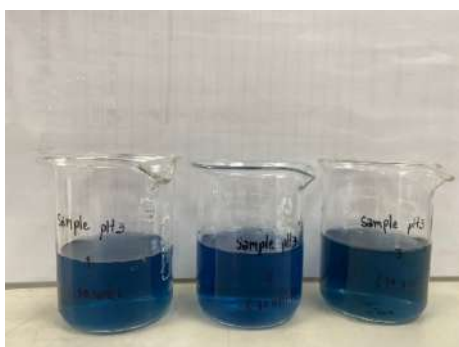
(ก) ผลของไม่ปรับ pH (11) (ข) ผลของ pH3 (ค) ผลของ pH7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

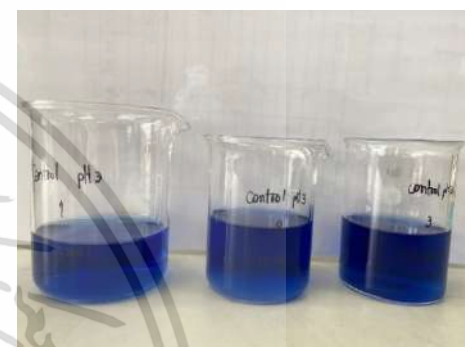
ภาคผนวก ข-2 ผลการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

ตารางที่ ข-2.1 ผลของวิธีการปรับสภาพแร่ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

เวลา (นาท)	ค่าที่วัดได้ ก่อนการกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังการกำจัด (ADMI)					ประสิทธิภาพในการ กำจัด สี (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
10	2350.0920	2842.3410	2667.6720	2620.0350	249.5581	857.4660	1159.1670	905.1030	973.9120	162.1940	62.93
15	2588.2770	2604.1560	2461.2450	2551.2260	78.3292	555.7650	587.5230	412.8540	518.7140	93.0424	79.73
20	2445.3660	2604.1560	2699.4300	2582.9840	128.3484	651.0390	524.0070	555.7650	576.9370	66.1095	77.55



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ข-2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของรีแอกทีฟบลู

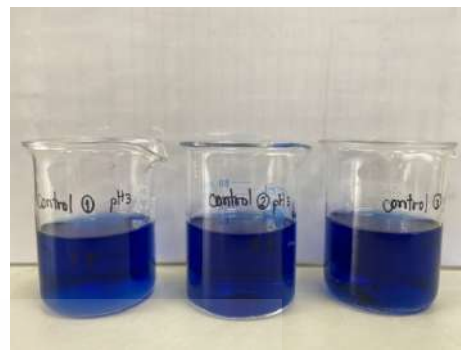
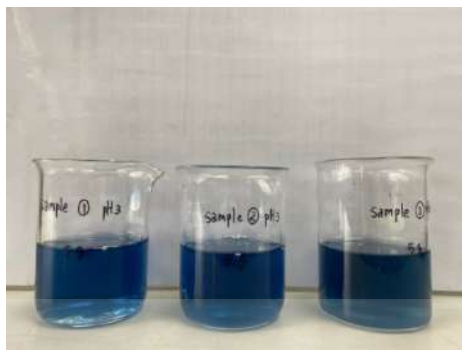
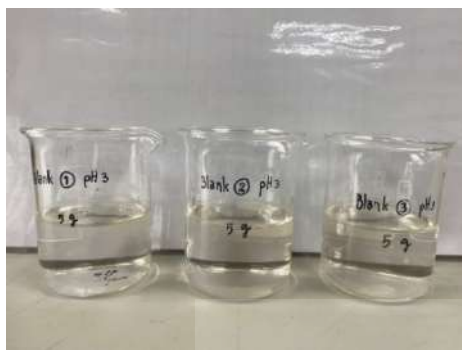
(ก) เวลาสัมผัส 10 นาที (ข) เวลาสัมผัส 15 นาที (ค) เวลาสัมผัส 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

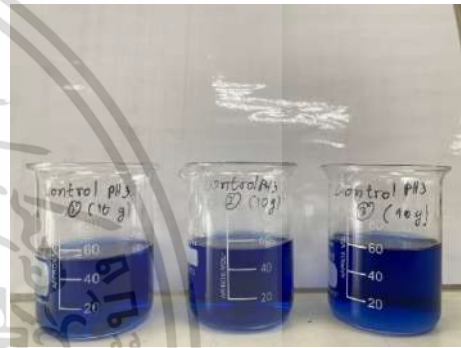
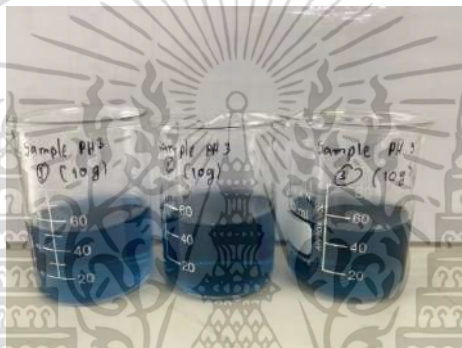
ภาคผนวก ข-3 ผลการกำจัดสีย้อมรีเอกทีพบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ต่างๆ

ตารางที่ ข-3.1 ผลของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

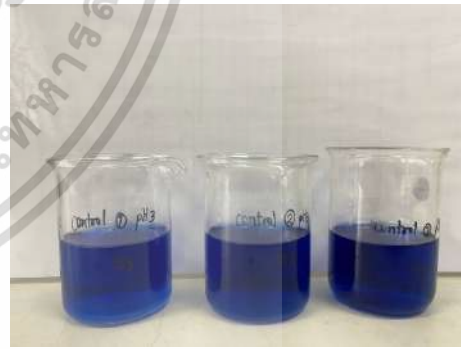
น้ำหนัก (กรัม)	ค่าที่วัดได้ ก่อนกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังกำจัด (ADMI)					ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสี (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
5	2953.4940	2858.2200	2842.3410	2884.6850	60.1169	1063.8930	1190.9250	984.4980	1079.7720	104.1256	62.56
10	2683.5510	2826.4620	2778.8250	2762.9460	72.7667	762.1920	809.8290	762.1920	778.0710	27.5032	71.84
15	2683.5510	2715.3090	2699.4300	2699.4300	15.8790	857.4660	603.4020	778.0710	746.3130	129.9752	72.33
20	2588.2770	2905.8570	2969.3730	2821.1690	204.1754	651.0390	619.2810	666.918	645.7460	24.2556	77.02



(ก)

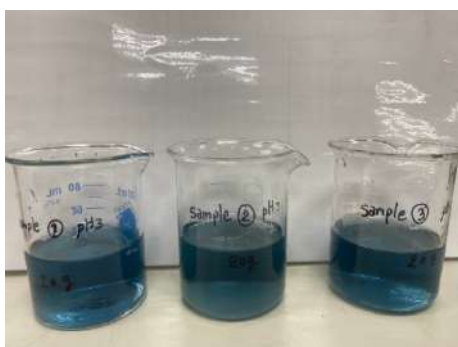


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ ข-3.1 ผลของน้ำหนักแร่ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

- (ก) ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 5 กรัม      (ข) ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 10 กรัม  
 (ค) ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 15 กรัม      (ง) ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ 20 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-4 ผลกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราการไหลต่างๆ

ตารางที่ ข-4.1 ผลของอัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตราการไหล 0.63 mL/min	ค่าที่วัดได้ ก่อนกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังกำจัด (ADMI)					ประสิทธิภาพในการกำจัด สี (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
10	2032.5120	3096.4050	1968.9960	2365.9710	633.3711	87.3345	165.1416	20.6427	91.0396	72.3206	96.44
20	2064.2700	3525.1380	2477.1240	2688.8440	753.0955	52.4007	157.2021	93.6861	101.0963	52.7922	96.41
30	2064.2700	3826.8390	2842.3410	2911.150	883.2969	65.1039	141.3231	188.9601	131.7957	62.4753	95.50
40	1921.3590	3747.4440	2794.7040	2821.1690	913.3301	63.5160	147.6747	184.1964	131.7957	61.8874	95.39
50	1794.3270	3779.2020	3175.8000	2916.4430	1017.5370	85.7466	152.4384	177.8448	138.6766	47.5664	95.16
60	1984.8750	4160.2980	3080.5260	3075.2330	1087.7211	88.9224	176.2569	185.7843	150.3212	53.3859	95.10
70	2064.2700	3588.6540	3286.9530	2979.9590	807.2302	92.0982	158.7900	184.1964	145.0282	47.5664	95.17
80	1810.2060	3985.6290	3318.7110	3038.1820	1114.5127	107.9772	168.3174	188.9601	155.0849	42.0818	94.70
90	1953.1170	3350.4690	3445.7430	2916.4430	835.6237	103.2135	187.3722	193.7238	161.4365	50.5225	94.50
100	1857.8430	3255.1950	3398.1060	2837.0480	851.0216	104.8014	200.0754	209.6028	171.4932	57.9529	94.02
110	1778.4480	3286.9530	3429.8640	2831.7550	914.9850	88.9224	198.4875	208.0149	165.1416	66.1794	94.30
120	2064.2700	3350.4690	3477.5010	2964.080	781.8426	92.0982	200.0754	211.1907	167.7881	65.7846	94.50
130	1921.3590	3239.3160	3461.6220	2874.0990	832.5504	114.3288	254.0640	203.2512	190.5480	70.7284	93.78
140	2334.2130	3318.7110	3413.9850	3022.3030	597.8045	101.6256	230.2455	203.2512	178.3741	67.8227	94.25
150	2048.3910	3239.3160	3175.8000	2821.1690	669.9985	98.4498	246.1245	220.7181	188.4308	78.9545	93.55
160	1857.8430	3398.1060	3302.8320	2852.9270	863.0837	100.0377	257.2398	217.5423	191.6066	81.7473	93.49
170	2254.8180	3286.9530	3255.1950	2932.322	586.9505	96.8619	254.0640	241.3608	197.4289	87.3249	93.52
180	1889.6010	4049.1450	3239.3160	3059.354	1090.9616	98.4498	244.5366	222.3060	188.4308	78.7146	93.96

ตารางที่ ข-4.2 ผลของอัตราการไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที

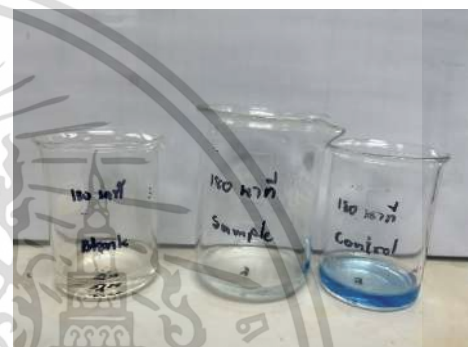
อัตรา การไหล 1.60 mL/min	ค่าที่วัดได้ ก่อนกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังกำจัด (ADMI)					ประสิทธิภาพ ในการกำจัด สี (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
10	3223.4370	2270.6970	2127.7860	2540.640	595.6212	700.2639	455.72730	384.2718	513.4210	165.7081	80.05
20	3604.5330	2921.7360	2540.6400	3022.3030	539.0291	866.9934	595.46250	517.6554	660.0371	183.4030	78.40
30	3731.5650	3318.7110	2858.2200	3302.8320	436.8898	898.7514	636.74790	551.0013	695.5002	181.1668	79.15
40	3763.3230	3302.8320	3017.0100	3361.0550	376.5477	908.2788	665.33010	428.7330	667.4473	239.7799	80.50
50	3826.8390	3318.7110	3175.8000	3440.4500	342.1660	924.1578	685.97280	600.2262	736.7856	167.8373	78.76
60	4033.2660	3413.9850	3175.8000	3541.0170	442.6226	941.6247	709.79130	595.4625	748.9595	176.3737	79.04
70	3890.3550	3175.8000	3207.5580	3424.5710	403.6932	916.2183	698.67600	579.5835	731.4926	170.6999	78.79
80	3985.6290	3477.5010	3318.7110	3593.9470	348.3743	946.3884	728.84610	625.6326	766.9557	163.7386	78.82
90	3826.8390	3271.0740	3413.9850	3503.9660	288.6020	938.4489	762.19200	631.9842	777.5417	153.8079	77.89
100	3763.3230	7939.5000	3318.7110	5007.1780	2549.1771	959.0916	1500.56550	639.9237	1033.1940	435.0798	78.78
110	3874.4760	8431.7490	3334.590	5213.6050	2800.0370	982.9101	1486.27440	643.0995	1037.4280	424.2230	79.24
120	3683.9280	8399.9910	3271.0740	5118.3310	2849.4879	992.4375	1443.40110	639.9237	1025.2540	402.7427	78.77
130	3842.7180	7891.8630	3302.8320	5012.4710	2508.1951	989.2617	1491.03810	636.7479	1039.0160	429.3129	78.70
140	3937.9920	3413.9850	3334.5900	3562.1890	327.8671	994.0254	813.00480	644.6874	817.2392	174.7075	77.20
150	3890.3550	3318.7110	3398.1060	3535.7240	309.6744	1000.3770	824.12010	651.0390	825.1787	174.6714	76.77
160	3715.6860	3048.7680	3509.2590	3424.5710	341.4292	989.2617	784.42260	657.3906	810.3583	167.4488	76.31
170	3922.1130	3398.1060	3191.6790	3503.9660	376.5477	1017.8439	827.29590	646.2753	830.4717	185.8047	76.49
180	3588.6540	3334.5900	3286.9530	3403.3990	162.19400	1016.2560	851.11440	682.7970	850.0558	166.7320	75.13

ตาราง ข-4.3 ผลของอัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที

อัตรา การไหล  2.63 mL/min	ค่าที่วัดได้ ก่อนกำจัด (ADMI)					ค่าที่วัดได้ หลังกำจัด (ADMI)					ประสิทธิภาพ ในการกำจัด สี (%)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
10	3001.1310	2953.4940	2699.4300	2884.6850	162.1940	643.0995	786.0105	960.6795	796.5965	159.0544	72.12
20	3271.0740	3334.5900	3112.2840	3239.3160	114.5051	825.7088	976.5585	1135.3485	979.2052	154.8368	69.66
30	3445.7430	3398.1060	3350.4690	3398.1060	47.6370	1000.3770	1127.4090	1167.1065	1098.2975	87.0935	69.66
40	3318.7110	3541.0170	3255.1950	3371.6410	150.0824	952.7400	1095.6510	1095.6510	1048.0140	82.5097	67.65
50	3461.6220	3429.8640	3144.0420	3345.1760	174.9094	1008.3165	1198.8645	1079.7720	1095.6510	96.2613	67.65
60	3413.9850	3429.8640	3159.9210	3334.5900	151.4760	1048.0140	1206.8040	1063.8930	1106.2370	87.4547	68.89
70	3525.1380	3509.2590	3271.0740	3435.1570	142.3216	1127.4090	1238.5620	1103.9505	1156.6405	71.9091	68.89
80	3461.6220	3239.3160	3318.7110	3339.8830	112.6551	1087.7115	1111.5300	1135.3485	1111.5300	23.8185	67.19
90	3461.6220	3398.1060	3223.4370	3361.0550	123.3393	1063.8930	1087.7115	1071.8325	1074.4790	12.1277	67.19
100	3382.2270	3398.1060	3366.3480	3382.2270	15.8790	1079.7720	1190.9250	1127.4090	1132.7020	55.7652	66.81
110	3429.8640	3413.9850	3223.4370	3355.7620	114.8715	1095.6510	1230.6225	1095.6510	1140.6415	77.9258	66.81
120	3461.6220	3556.8960	3302.8320	3440.4500	128.3484	1167.1065	1175.0460	1111.5300	1151.2275	34.6074	66.32
130	3509.2590	3461.6220	3318.7110	3429.8640	99.1643	1127.4090	1143.2880	1079.7720	1116.8230	33.0547	66.32
140	3477.5010	3493.3800	3255.1950	3408.6920	133.1691	1127.4090	1071.8325	1079.7720	1093.0045	30.0584	66.68
150	3477.5010	3382.2270	3286.9530	3382.227	95.2740	1127.4090	1135.3485	1119.4695	1127.4090	7.9395	66.68
160	3604.5330	3477.5010	3334.5900	3472.2080	135.0493	1119.4695	1127.4090	1143.2880	1130.0555	12.1278	68.00
170	3572.7750	3493.3800	3318.7110	3461.6220	129.9752	1151.2275	1135.3485	1159.1670	1148.5810	12.1278	68.00
180	3525.1380	3477.5010	3318.7110	3440.4500	108.0861	1198.8645	1111.5300	1153.8740	1154.7561	43.6739	66.51



(ก)



(ข)

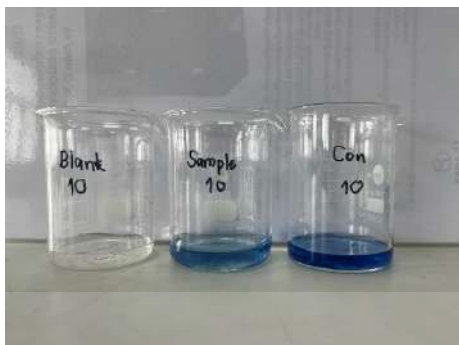


(ค)

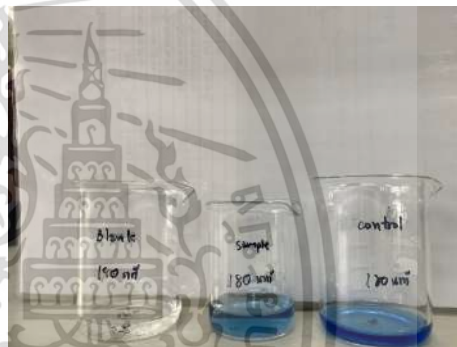
รูปที่ ข-4.1 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสียดต่อประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

(ก) อัตราการไหล 0.63 ซม<sup>3</sup>/1 (ข) อัตราการไหล 0.63 ซม<sup>3</sup>/2 (ค) อัตราการไหล 0.63 ซม<sup>3</sup>/3

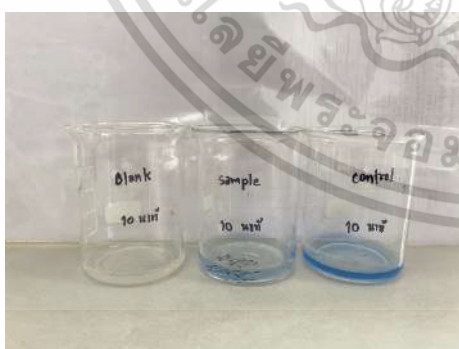
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)



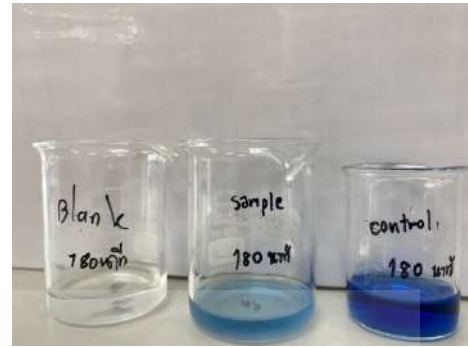
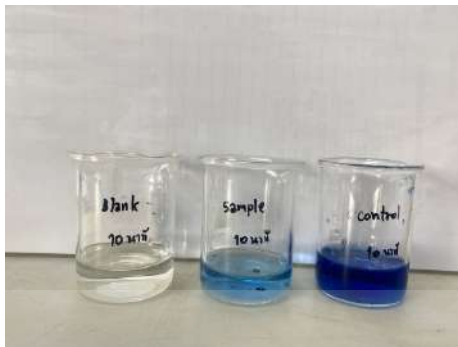
(จ)



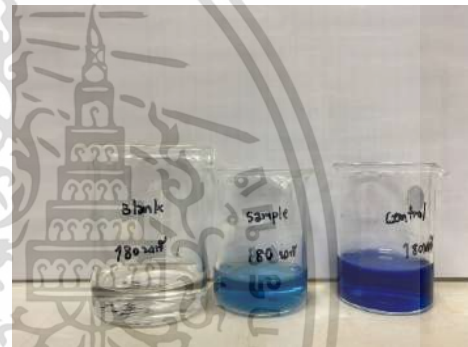
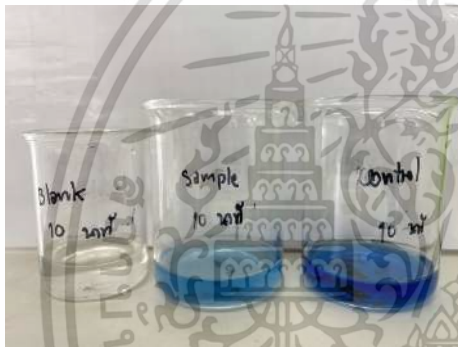
(ฉ)

รูปที่ ข-4.2 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

เอกสารนี้เป็นเอ(ง) อัตราการไหล 1.60 ลิต/วินาที (จ) อัตราการไหล 1.60 ลิต/วินาที 2 (ฉ) อัตราการไหล 1.60 ลิต/วินาที 3 การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ ข-4.3 ผลของการปรับอัตราการไหลน้ำเสียต่อประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู

(ข) อัตราการไหล 2.63 ลิต/ชม. 1 (ค) อัตราการไหล 2.63 ลิต/ชม. 2 (ง) อัตราการไหล 2.63 ลิต/ชม. 3  
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิศวกรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การทดสอบทางสถิติ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้กำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการแบบแบทช์

ภาคผนวก ค-1 การศึกษาความเป็นกรด-ด่างที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์  
ตั้งสมมติฐานการทดลอง

$H_0$ . ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

$H_1$ . ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-Value : 0.000

การตัดสินใจ : เนื่องจากค่า P- Value มีค่าน้อยกว่า จึงให้สมมติฐานที่  $H_0$  ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู ไม่เป็นจริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ ค-1.1 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	2	1507.58	753.791	76.54	0.000
Error	6	59.09	9.848		
Total	8	1566.67			

ตารางที่ ค-1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

pH	N	Mean	StDEV	95% CI
3	3	64.32	3.59	(59.88, 68.75)
7	3	33.44	2.22	(29.00, 37.87)
ไม่ปรับ pH (11)	3	42.66	3.42	(38.23, 47.09)

จากการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู P-value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้ต้องทดสอบหาค่าเฉลี่ย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1.3 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

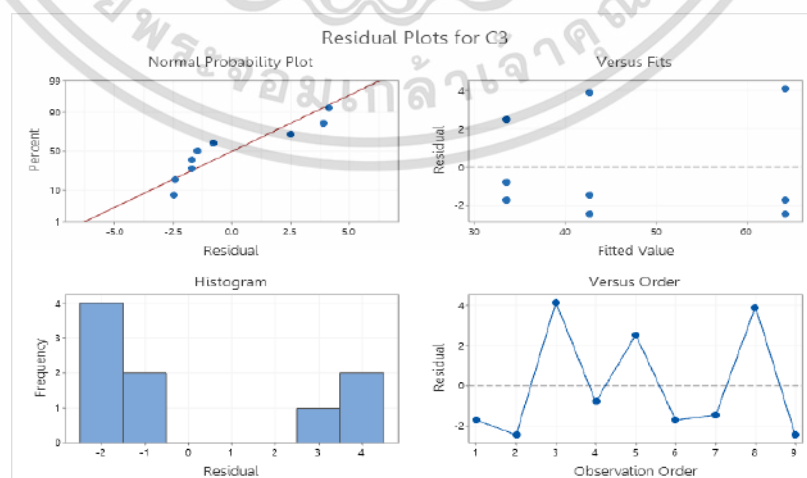
pH	N	Mean	Grouping
3	3	64.32	A
7	3	33.44	C
ไม่ปรับ pH (11)	3	42.66	B

ตารางที่ ค-1.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
pH	2	419565	209783	4.15	0.074
Error	6	303580	50597		
Total	8	723145			

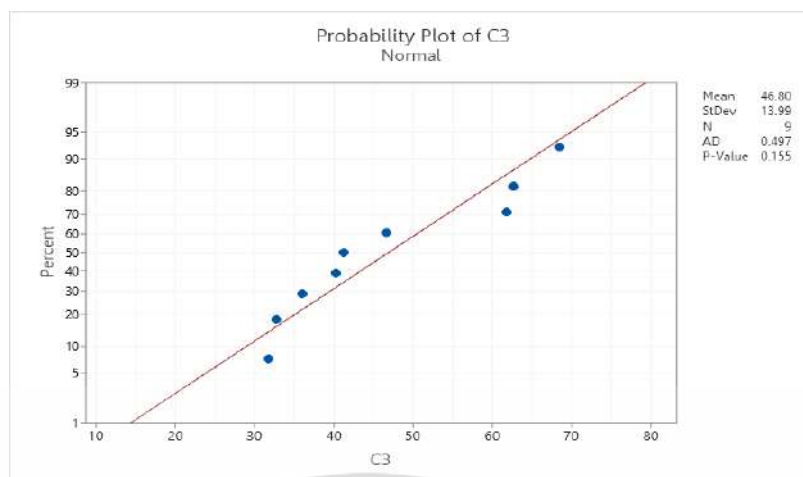
ตารางที่ ค-1.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI

pH	N	Mean	Grouping
7	3	3732	A
3	3	3350	A
ไม่ปรับ pH (11)	3	3223	A



รูปที่ ค-1.1 กราฟแสดงผล ANOVA ความเป็นกรด-ด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-1.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของความเป็นกรด-ด่าง

ภาคผนวก ค-2 การศึกษาระยะเวลาที่สัมผัสที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ ตั้งสมมติฐานการทดลอง

$H_0$ . ระยะเวลากการสัมผัสของแร่ไพโรลูไซต์ไม่มีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

$H_1$ . ระยะเวลากการสัมผัสของแร่ไพโรลูไซต์มีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-Value : 0.002

การตัดสินใจ : เนื่องจากค่า P- Value มีค่าน้อยกว่า จึงให้สมมติฐานที่  $H_0$  ระยะเวลากการสัมผัสของแร่ไพโรลูไซต์ไม่มีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู ไม่เป็นจริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ ค-2.1 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
เวลา	2	500.64	250.32	21.70	0.002
Error	6	69.21	11.53		
Total	8	569.84			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เวลา	N	Mean	StDev	95% CI
10	3	62.93	3.46	(58.14, 67.73)
15	3	79.73	3.08	(74.93, 84.53)
20	3	77.56	3.63	(72.76, 82.35)

จากการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้ต้องทดสอบหาค่าเฉลี่ย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ค-2.3 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เวลา	N	Mean	Grouping
15	3	79.73	A
20	3	77.56	A
10	3	62.93	B

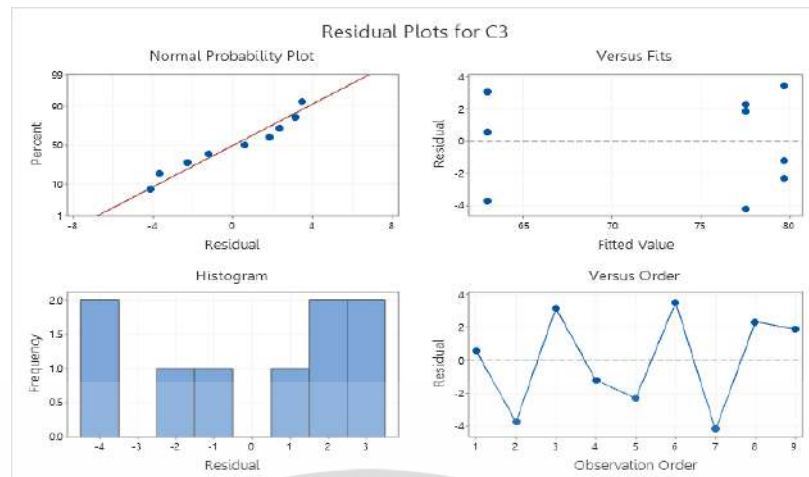
ตารางที่ ค-2.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
เวลา	2	7116	3558	0.13	0.884
Error	6	169776	28296		
Total	8	176892			

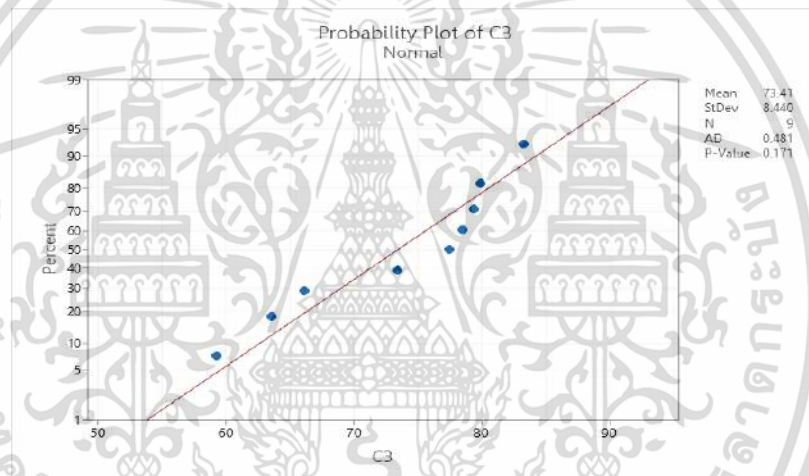
ตารางที่ ค-2.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI

เวลา	N	Mean	Grouping
10	3	2620	A
20	3	2583.0	A
15	3	2551.2	A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-2.1 กราฟแสดงผล ANOVA ระยะเวลาการสัมผัส



รูปที่ ค-2.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของระยะเวลาสัมผัส

ภาคผนวก ค-3 การศึกษาปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์  
ตั้งสมมติฐานการทดลอง

$H_0$ . ปริมาณของแร่ไฟโรลูไซต์ไม่มีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

$H_1$ . ปริมาณของแร่ไฟโรลูไซต์มีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู

ระดับนัยสำคัญ : 0.05

P-Value : 0.004

การตัดสินใจ : เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า จึงให้สมมติฐานที่  $H_0$  ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ไม่มีผล  
ต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู ไม่เป็นจริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ความเชื่อมั่น 95

เปอร์เซ็นต์)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3.1 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ปริมาณแร่	3	330.10	110.03	10.27	0.004
Error	8	85.70	10.71		
Total	11	415.80			

ตารางที่ ค-3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณแร่ ไฟโรลูไซต์	N	Mean	StDev	95% CI
5	3	62.56	3.72	(58.20, 66.92)
10	3	71.839	0.646	(67.482, 76.197)
15	3	72.33	4.97	(67.98, 76.69)
20	3	77.03	1.97	(72.67, 81.38)

จากการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟบลู P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำให้ต้องทดสอบหาค่าเฉลี่ย Turkey Pairwise Comparisons ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ค-3.3 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

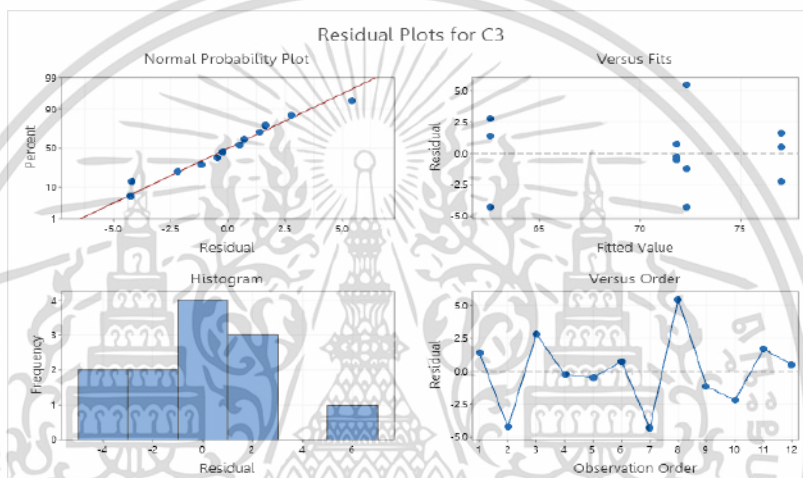
ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์	N	Mean	Grouping
20	3	77.03	A
15	3	72.33	A
10	3	71.839	A
5	3	62.56	B

ตารางที่ ค-3.4 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI

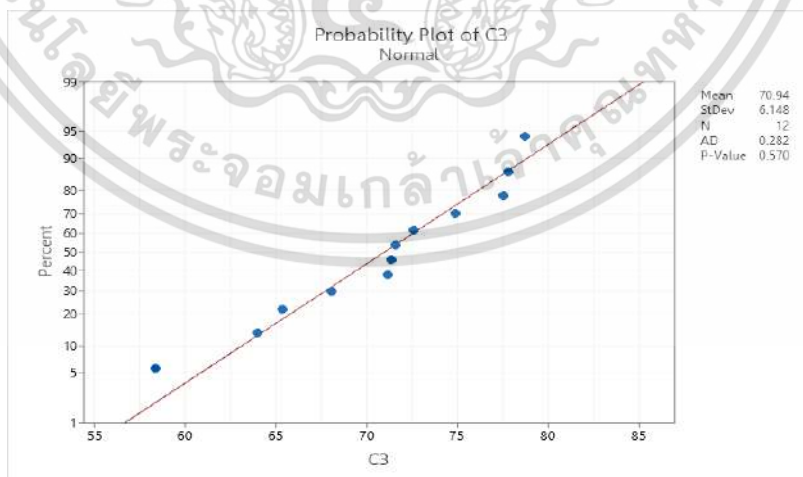
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ปริมาณแร่	3	56564	18855	1.48	0.291
Error	8	101698	12712		
Total	11	158262			

ตารางที่ ค-3.5 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI

ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์	N	Mean	Grouping
5	3	2884.7	A
20	3	2821	A
10	3	2762.9	A
15	3	2699.43	A



รูปที่ ค-3.1 กราฟแสดงผล ANOVA ปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์



รูปที่ ค-3.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของปริมาณแร่ไฟโรลูไซต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์

**ภาคผนวก ค-4** ผลศึกษาอัตราการไหลที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์

สมมติฐานการทดลอง

$H_0$ : อัตราการไหลไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

$H_1$ : อัตราการไหลมีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความมั่นใจ 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

P-Value 0.000

เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ  $H_0$  คือ อัตราการไหลมีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

#### การศึกษาระยะเวลาที่สัมผัสที่ใช้กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์

สมมติฐานการทดลอง

$H_0$ : ระยะเวลาที่สัมผัสไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

$H_1$ : ระยะเวลาที่สัมผัสมีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับความมั่นใจ 95 เปอร์เซ็นต์ (ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05)

P-Value 0.161

เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปฏิเสธ  $H_1$  คือ ระยะเวลาที่สัมผัสไม่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลู ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีการตรึงในคอลัมน์ อย่างมีนัยสำคัญ

**ตารางที่ ค-4.1** ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์ของอัตราการไหลและเวลา ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อัตราการไหล	2	20201.20	10100.60	1506.39	0.000
เวลา	17	157.20	9.20	1.38	0.161
อัตราการไหล* เวลา	34	80.60	2.40	0.35	1.000
Error	108	724.40	6.70		
Total	161	21163.2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ อีกที่ห้ามคัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4.2 ตาราง ANOVA (One-Way) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อัตราการใช้ไฟ	2	2020.20	10100.60	1669.53	0.000
Error	159	961.90	6.00		
Total	161	21163.20			

ตารางที่ ค-4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

อัตราการใช้ไฟ	N	Mean	StDev	95% CI
0.63	54	94.6340	1.3670	(93.9730, 95.2950)
1.60	54	78.176	2.9850	(77.5150, 78.8370)
2.63	54	67.4850	2.7150	(66.8240, 68.1460)

เนื่องจากการทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของอิทธิพลอัตราการใช้ไฟแบบการตรึงในคอลัมน์ P-Value มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องทำการทดสอบค่าเฉลี่ยโดย Tukey Pairwise Comparisons ที่ได้รับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ค-4.4 ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ที่ผ่านการกำจัดด้วยวิธีการคอลัมน์

อัตราการใช้ไฟ	N	Mean	Grouping
0.63	54	94.6344	A
1.60	54	78.1759	B
2.63	54	67.4846	C

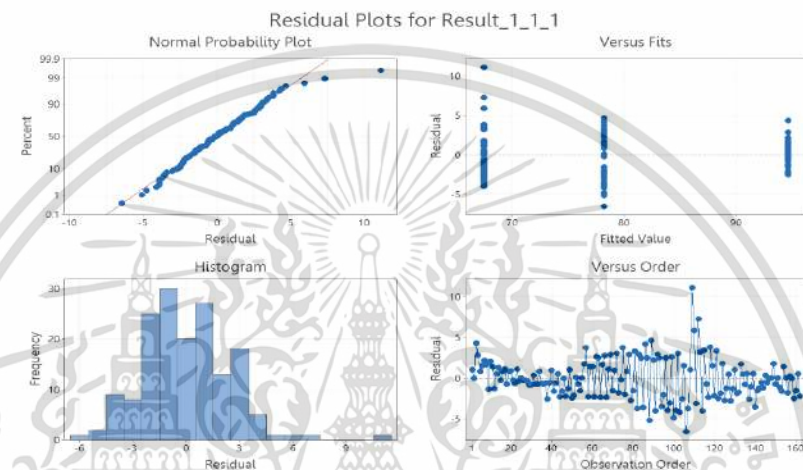
ตารางที่ ค-4.5 ตารางผลการวิเคราะห์ ANOVA (One-Way) ด้วยโปรแกรม Minitab ของชุดควบคุมโดยใช้ค่า ADMI

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
อัตราการใช้ไฟ	2	20356142	10178071	13.27	0.000
Error	159	121964024	767069		
Total	161	142320166			

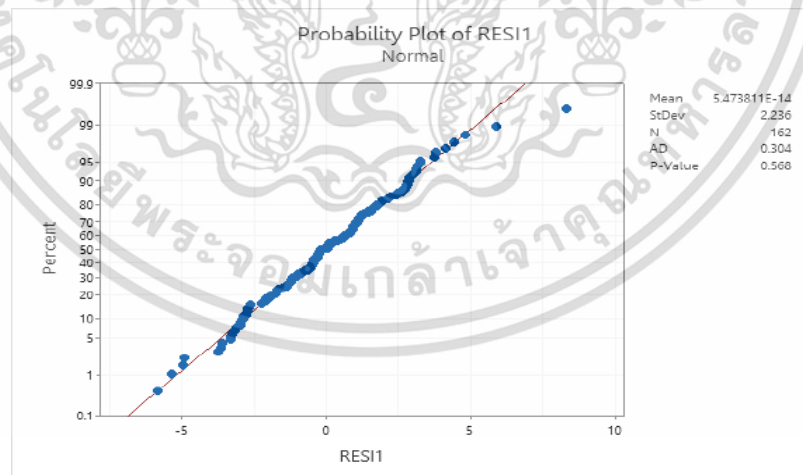
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4.6 ตารางค่าเฉลี่ยที่แตกต่างของอัตราการไหลที่แตกต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญของชุดควบคุม โดยใช้ค่า ADMI

อัตราการไหล	N	Mean	Grouping
1.60	54	3751	A
2.63	54	3360.2	A
0.63	54	2883.8	B



รูปที่ ค-4.1 กราฟแสดงผล ANOVA อัตราการไหล



รูปที่ ค-4.2 กราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### คำนวณผลของจลศาสตร์

จากการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ 10.0001 กรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH 3, pH 7 และ ไม่ปรับ pH เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ แล้วนำผลการทดลองมาหาประสิทธิภาพการกำจัดสี (%) สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

ตารางที่ ง-1 ผลของความเป็นกรด-ด่างของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์

ค่าความเป็นกรด-ต่าง	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อนการกำจัด	ค่าเฉลี่ยหลังการกำจัด
pH 3	1	3271.0740	1222.2683	3350.4690	1090.7868
	2	3207.5580	1222.6830		
	3	3572.7750	1127.4090		
pH 7	1	3795.0810	2556.5190	3731.5650	2487.7100
	2	3445.7430	2207.1810		
	3	3953.8710	2699.4300		
ไม่ปรับ pH	1	3429.8640	2016.6330	3223.4370	1847.2570
	2	3239.3160	1730.8110		
	3	3001.1310	1794.3270		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH 3 โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์ 10.0001 กรัม ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10, 15 และ 20 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ แล้วนำผลการทดลองมาหาประสิทธิภาพการกำจัดสี (%) และเขียนกราฟจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสองได้ตามสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

$$\text{จลนพลศาสตร์การดูดซับ} Q_t = \frac{C_0 - C_e}{M} \times V$$

ตารางที่ ง-2 ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไฟโรลูไซต์

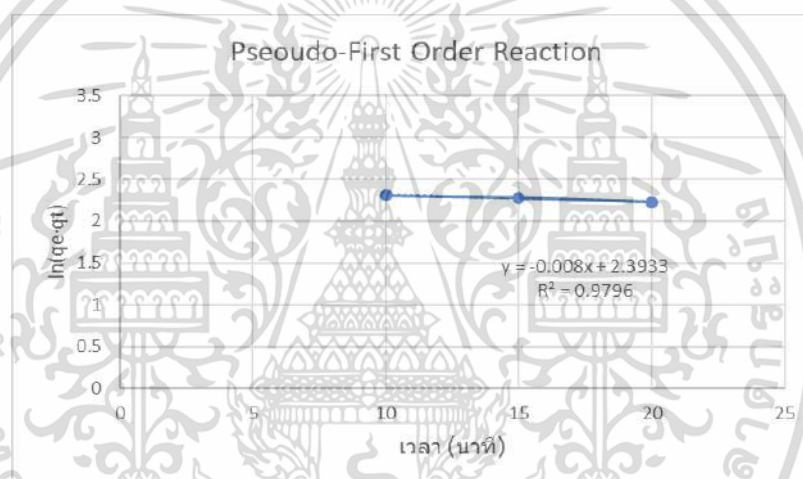
เวลา (นาที)	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อน การกำจัด	ค่าเฉลี่ยหลัง การกำจัด
10	1	2350.0920	857.4660	2620.0350	973.9120
	2	2842.3410	1159.1670		
	3	2667.6720	905.1030		
15	1	2588.2770	555.7650	2551.2260	518.7140
	2	2604.1560	587.5230		
	3	2461.2450	412.8540		
20	1	2445.3660	651.0390	2582.9840	576.9370
	2	2604.1560	524.0070		
	3	2699.4300	555.7650		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์

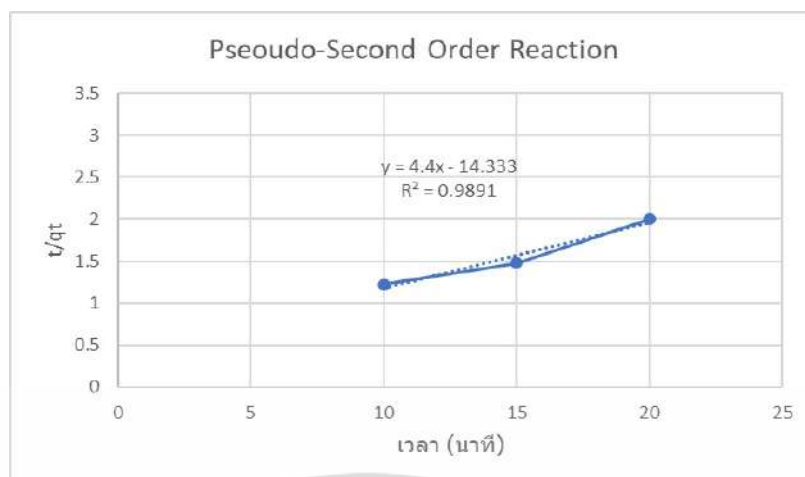
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น เริ่มต้น ,Co (ADMI)	ความเข้มข้น ที่เหลือ ,Ce (ADMI)	M (g)	V (mL)	qt	t/qt	ln(qe-qt)
10	2620.0350	973.9120	10.0001	50.0000	8.23	1.22	2.31
15	2551.2260	518.7140	10.0001	50.0000	10.16	1.48	2.28
20	2582.9840	576.9370	10.0001	50.0000	10.03	2.00	2.23

\*หมายเหตุ qe ใช้ที่ความเข้มข้นของ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ของ pH 3 มีค่าเท่ากับ 11.30



รูปที่ ง-1 Pseudo-First Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟลู ณ เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-2 Pseudo-Second Order Reaction สีย้อมรีแอกทีฟบลู ณ เวลาต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง และอันดับสองจะพบว่าการดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ของ Pseudo-First Order Reaction รูปที่ ง-1 มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $R^2 = 0.9796$ ) และ Pseudo-Second Order Reaction รูปที่ ง-2 มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ( $R^2 = 0.9891$ ) จึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟบลูโดยใช้แร่ไพโรลูไซต์เป็นแบบ Pseudo-Second Order Reaction มากกว่า Pseudo-First Order Reaction เนื่องจากมีค่า ( $R^2 = 0.9891$ ) เข้าใกล้ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ 5, 10, 15 และ 20 กรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร pH 3 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ แล้วนำผลการทดลองมาหาประสิทธิภาพการกำจัดสี (%) สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

ตารางที่ ง-4 ผลของปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ที่กำจัดสีย้อมรีแอกทีฟลูในน้ำเสียสังเคราะห์

ปริมาณแร่ไพโรลูไซต์ (กรัม)	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อนการกำจัด	ค่าเฉลี่ยหลังการกำจัด
5	1	2953.4940	1063.8930	2884.6850	1079.7720
	2	2858.2200	1190.9250		
	3	2842.3410	984.4980		
10	1	2683.5510	762.1920	2762.9460	778.0710
	2	2826.4620	809.8290		
	3	2778.8250	762.1920		
15	1	2683.5510	857.4660	2699.4300	746.3130
	2	2715.3090	603.4020		
	3	2699.4300	778.0710		
20	1	2588.2770	651.0390	2821.1690	645.7460
	2	2905.8570	619.2810		
	3	2969.3730	666.9180		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการแบบคอลัมน์ โดยใช้แรไฟโรลูไซต์ 20.0002 กรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์คือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร pH 3 เวลา 10 ถึง 180 นาที อัตราการไหล 0.63, 1.60 และ 2.63 มิลลิตรต่อนาที จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่ แล้วนำผลการทดลองมาหาประสิทธิภาพการกำจัดสี (%) สามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

ตารางที่ ง-5 ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แรไฟโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 0.63 มิลลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อน การ กำจัด	ค่าเฉลี่ยหลัง การ กำจัด
10	1	2032.5120	87.3345	2365.9710	91.0396
	2	3096.4050	165.1416		
	3	1968.9960	20.6427		
20	1	2064.2700	52.4007	2688.8440	101.0963
	2	3525.1380	157.2021		
	3	2477.1240	93.6861		
30	1	2064.2700	65.1039	2911.1500	131.7957
	2	3826.8390	141.3231		
	3	2842.3410	188.9601		
40	1	1921.3590	63.5160	2821.1690	131.7959
	2	3747.4440	147.6747		
	3	2794.7040	184.1964		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ อัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที

50	1	1794.3270	85.7466	2916.4430	138.6766
	2	3779.2020	152.4384		
	3	3175.8000	177.8448		
60	1	1984.8750	88.9224	3075.2330	150.3212
	2	4160.2980	176.2569		
	3	3080.5260	185.7843		
70	1	2064.2700	92.0982	2979.9590	145.0282
	2	3588.6540	158.7900		
	3	3286.9530	184.1964		
80	1	1810.2060	107.9772	3038.1820	155.0849
	2	3985.6290	168.3174		
	3	3318.7110	188.9601		
90	1	1953.1170	103.2135	2916.4430	161.4365
	2	3350.4690	187.3722		
	3	3445.7430	193.7238		
100	1	1857.8430	104.8014	2837.0480	171.4932
	2	3255.1950	200.0754		
	3	3398.1060	209.6028		
110	1	1778.4480	88.9224	2831.7550	165.1416
	2	3286.9530	198.4875		
	3	3429.8640	208.0149		
120	1	2064.2700	92.0982	2964.0800	167.7881
	2	3350.4690	200.0754		
	3	3477.5010	211.1907		
130	1	1921.3590	114.3288	2874.0990	190.5480
	2	3239.3160	254.0640		
	3	3461.6220	203.2512		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ อัตราการไหล 0.63 มิลลิลิตรต่อนาที

140	1	2334.2130	101.6256	3022.3030	178.3741
	2	3318.7110	230.2455		
	3	3413.9850	203.2512		
150	1	2048.3910	98.4498	2821.1690	188.4308
	2	3239.3160	246.1245		
	3	3175.8000	220.7181		
160	1	1857.8430	100.0377	2852.9270	191.6066
	2	3398.1060	257.2398		
	3	3302.8320	217.5423		
170	1	2254.8180	96.8619	2932.3220	197.4289
	2	3286.9530	254.0640		
	3	3255.1950	241.3608		
180	1	1889.6010	98.4498	3059.3540	188.4308
	2	4049.1450	244.5366		
	3	3239.3160	222.3060		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-6 ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่อัตรา  
การไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อน การ กำจัด	ค่าเฉลี่ยหลัง การ กำจัด
10	1	3223.4370	700.2639	2540.6400	513.4210
	2	2270.6970	455.7273		
	3	2127.7860	384.2718		
20	1	3604.5330	866.9934	3022.3030	660.0371
	2	2921.7360	595.4625		
	3	2540.6400	517.6554		
30	1	3731.5650	898.7514	3302.8320	695.5002
	2	3318.7110	636.7479		
	3	2858.2200	551.0013		
40	1	3763.3230	908.2788	3361.0550	667.4473
	2	3302.8320	665.3301		
	3	3017.0100	573.2319		
50	1	3826.8390	924.1578	3440.4500	736.7856
	2	3318.7110	685.9728		
	3	3175.8000	600.2262		
60	1	4033.2660	941.6247	3541.0170	748.9595
	2	3413.9850	709.7913		
	3	3175.8000	595.4625		
70	1	3890.3550	916.2183	3424.5710	731.4926
	2	3175.8000	698.6760		
	3	3207.5580	579.5835		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-6 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ อัตราการไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที

80	1	3985.6290	946.3884	3593.9470	766.9557
	2	3477.5010	728.8461		
	3	3318.7110	625.6326		
90	1	3826.8390	938.4489	3503.9660	777.5417
	2	3271.0740	762.1920		
	3	3413.9850	631.9842		
100	1	3763.3230	959.0916	5007.1780	1033.1936
	2	7939.5000	1500.5655		
	3	3318.7110	639.9237		
110	1	3874.4760	982.9101	5213.6050	1037.4280
	2	8431.7490	1486.2744		
	3	3334.5900	643.0995		
120	1	3683.9280	992.4375	5118.3310	1025.2541
	2	8399.9910	1443.4011		
	3	3271.0740	639.9237		
130	1	3842.7180	989.2617	5012.4710	1039.0159
	2	7891.8630	1491.0381		
	3	3302.8320	636.7479		
140	1	3937.9920	994.0254	3562.1890	817.2392
	2	3413.9850	813.0048		
	3	3334.5900	644.6874		
150	1	3890.3550	1000.3770	3535.7240	825.1787
	2	3318.7110	824.1201		
	3	3398.1060	651.0390		
160	1	3715.6860	989.2617	3424.5710	810.3583
	2	3048.7680	784.4226		
	3	3509.2590	657.3906		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-6 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 1.60 มิลลิลิตรต่อนาที

170	1	3922.1130	1017.8439	3503.9660	830.4717
	2	3398.1060	827.2959		
	3	3191.6790	646.2753		
180	1	3588.6540	1016.2560	3403.3990	850.0558
	2	3334.5900	851.1144		
	3	3286.9530	682.7970		

ตารางที่ ง-7 ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่อัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ก่อนการกำจัด (ADMI)	หลังการกำจัด (ADMI)	ค่าเฉลี่ยก่อน การ กำจัด	ค่าเฉลี่ยหลัง การ กำจัด
10	1	3001.1310	643.0995	2884.6850	796.5965
	2	2953.4940	786.0105		
	3	2699.4300	960.6795		
20	1	3271.0740	825.7080	3239.3160	979.2050
	2	3334.5900	976.5585		
	3	3112.2840	1135.3485		
30	1	3445.7430	1000.3770	3398.1060	1098.2975
	2	3398.1060	1127.4090		
	3	3350.4690	1167.1065		
40	1	3318.7110	952.7400	3371.6410	1048.0140
	2	3541.0170	1095.6510		
	3	3255.1950	1095.6510		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-7 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ อัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที

50	1	3461.6220	1008.3165	3345.1760	1095.6510
	2	3429.8640	1198.8645		
	3	3144.0420	1079.7720		
60	1	3413.9850	1048.0140	3334.5009	1106.2370
	2	3429.8640	1206.8040		
	3	3159.9210	1063.8930		
70	1	3525.1380	1127.4090	3435.1570	1156.5205
	2	3509.2590	1238.5620		
	3	3271.0740	1103.5905		
80	1	3461.6220	1087.7115	3339.8830	1111.5003
	2	3239.3160	1111.5300		
	3	3318.7110	1135.3485		
90	1	3461.6220	1063.8930	3361.0550	1074.4790
	2	3398.1060	1087.7115		
	3	3223.4370	1071.8325		
100	1	3382.2270	1079.7720	3382.2270	1132.7020
	2	3398.1060	1190.9250		
	3	3366.3480	1127.4090		
110	1	3429.8640	1095.6510	3355.7620	1140.6415
	2	3413.9850	1230.6225		
	3	3223.4370	1095.6510		
120	1	3461.6220	1167.1065	3440.4500	1151.2275
	2	3556.8960	1175.0460		
	3	3302.8320	1111.5300		
130	1	3509.2590	1127.4090	3429.8640	1116.8230
	2	3461.6220	1143.2880		
	3	3318.7110	1079.7720		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-7 (ต่อ) ผลของเวลาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์ ที่ อัตราการไหล 2.63 มิลลิลิตรต่อนาที

140	1	3477.5010	1127.4090	3408.6920	1093.0045
	2	3493.3800	1071.8325		
	3	3255.1950	1079.7720		
150	1	3477.5010	1127.4090	3382.2270	1127.4090
	2	3382.2270	1135.3485		
	3	3286.9530	1119.4695		
160	1	3604.5330	1119.4695	3472.2080	1130.0555
	2	3477.5010	1127.4090		
	3	3334.5900	1143.2880		
170	1	3572.7750	1151.2275	3461.6220	1148.5810
	2	3493.3800	1135.3485		
	3	3318.7110	1159.1670		
180	1	3525.1380	1198.8645	3440.4500	1153.8740
	2	3477.5010	1111.5300		
	3	3318.7110	1151.2275		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 3 เดือน เมษายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า	นางสาว จิตติญา	บัวจุม	รหัสประจำตัว 62050373
	นาย ภณชัย	พรโสภณชัย	รหัสประจำตัว 62050422
	นางสาว สุธิสา	ภาคเกษิ	รหัสประจำตัว 62050462
	นางสาว อัญชลี	ทองน้อย	รหัสประจำตัว 62050466

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย ประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้แร่ไพโรลูไซต์แบบตรึงในคอลัมน์

ชื่อภาษาอังกฤษ Removal Efficacy of Reactive Blue in Synthetic Wastewater using Pyrolusite in Fixed Bed Column

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวินิจฉัย 6.09 % หรือโปรแกรม Turnitin.....%

ลงชื่อ.....จิตติญา..... ลงชื่อ.....ภณชัย..... ลงชื่อ.....สุธิสา..... ลงชื่อ.....อัญชลี.....

( จิตติญา บัวจุม )

( ภณชัย พรโสภณชัย )

( สุธิสา ภาคเกษิ )

( อัญชลี ทองน้อย )

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่จนต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงชื่อ.....

อาจารย์ที่ปรึกษา