

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไดเร็กต์เรด 81
ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์
TREATMENT OF DIRECT RED 81 WASTEWATER USING
MEGNETIC BIOCHAR COMPOSITES BY ZERO-VALENT
IRON



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TREATMENT OF DIRECT RED 81 WASTEWATER USING
MAGNETIC BIOCHAR COMPOSITES BY ZERO-VALENT
IRON



CHANATTHA YAMDECH

DARIN

SIRAWAN

LAIMEK

CHAMCHOY

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจันสรา แยมเดช รหัสนักศึกษา 62050372 นางสาวดารินทร์ ลายเมฆ รหัสนักศึกษา 62050392 นางสาวสิราวรรณ แซ่มช้อย รหัสนักศึกษา 62050459
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ซึ่งค่า pH และค่า COD ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้เท่ากับ 5 และ 422 มิลลิกรัม/ลิตร งานวิจัยนี้ศึกษาค่าพีเอชที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ (pH_{pzc}) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 อันได้แก่ ค่า pH, ปริมาณของตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของน้ำเสีย, เวลา และอุณหภูมิ งานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงไอโซเทอม, จลนศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ค่าพีเอชที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์เท่ากับ 8 การดูดซับเกิดขึ้นได้มากที่สุดเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 5 ใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 12 กรัม/ลิตร ใช้เวลาในการบำบัด 180 นาที และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมไปบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และ COD 422 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 90.47 และบำบัด COD ได้ร้อยละ 71.09 ไอโซเทอมของดูดซับเป็นไปตามสมการแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และการศึกษาพลังงานจลน์การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน มีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับมาก

เอกสารนี้ **คำสำคัญ** : สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 แม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ถ่านชีวภาพ การดูดซับ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Treatment of Direct Red 81 Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron
Students	Chanattha Yamdech Student ID 62050372 Darin Laimek Student ID 62050392 Sirawan Chamchoy Student ID 62050459
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2565
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

Abstract

This special project aimed to treat a synthesized wastewater contaminated with direct red 81 by adsorption process using a magnetic biochar containing zero valence iron. The pH and COD value of the synthesized wastewater was 5 and 422 mg/L. This research studied point of zero charge (pH_{pzc}) and factors related to adsorption of direct red 81; such as pH, amount of adsorbent, the concentration of wastewater, contact time and temperature. This study also included isotherms, kinetic, and thermodynamics of the adsorption. The point of zero charge of the magnetic biochar was 7.9. The maximum adsorption was reached when using pH 5, 12 g/L of adsorbent, 180 minutes contact time, and 50 degrees Celsius. When the optimum condition was used to treat wastewater with concentration of color and COD 300 mg/L and 422 mg/L, the wastewater treatment efficiency was 90.47 and 71.09 percent, respectively. The adsorption and kinetic followed Langmuir isotherm model and the second order reaction. Adsorption is endothermic, with large disorder between adsorbent and sorbent. Adsorption can occur spontaneously.

Keywords: Direct Red 81, Zero Valent Iron, Biochar, Adsorption

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากกลุ่มบุคคลต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นบุคคลสำคัญที่ให้คำแนะนำ คำสอน ติดตามงาน ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา รวมถึงช่วยตรวจสอบพร้อมทั้งสนับสนุนโดยตลอดเวลาที่ทำการวิจัยด้วยความใส่ใจอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ที่ให้ข้อเสนอแนะและแนวทางในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณกรรมการ ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการในการสอบของข้าพเจ้า และยังให้คำแนะนำเกี่ยวกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์และบุคลากรในคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยช่วยอำนวยความสะดวก รวมถึงให้คำแนะนำในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานในห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ สุดท้ายจึงขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จันสธา แยมเดช
ดารินทร์ ลายเมฆ
สิรารวรรณ แฉ่มซ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม	4
2.1.1 กระบวนการเตรียมผ้า	4
2.1.2 กระบวนการย้อมผ้า	5
2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ	5
2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม	6
2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	7
2.2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม	9
2.3 สีย้อม	9
2.3.1 คุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์	10
2.3.2 ประเภทของสีย้อม	10
2.3.3 สีแท้หรือสีจริง	11
2.3.4 สีปรากฏ	11
2.3.5 สีย้อมไดเร็กต์เรด	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.3.6 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมมีขนาดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 12 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 2.3.7 ความเป็นพิษของสีย้อมและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณี 14 ช้

2.4 การวัดสีในน้ำเสีย.....	15
2.5 วิธีการบำบัดสียอมในน้ำเสีย	15
2.6 ถ่านกัมมันต์.....	16
2.6.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	16
2.6.2 การผลิตถ่านกัมมันต์	17
2.7 การดูดซับ	17
2.7.1 กลไกการดูดซับ	17
2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสียอม	17
2.8 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	21
2.8.1 การกักร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	22
2.8.2 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	24
2.8.3 ไอโซเทอมการดูดซับ	25
2.8.4 การใช้ประโยชน์	26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	31
3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	31
3.1.2 สารเคมี	32
3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	32
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สียอมไดเรกต์เรด 81.....	32
3.2.2 การเตรียมน้ำชีวภาพ	32
3.2.3 การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีไบโไรโซไดร์รีดักชัน.....	32
3.2.4 การศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (MBC)	
.....	33
3.2.5 การวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดย	
วิธี pH Drift Method.....	33
3.2.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด.....	33
3.2.7 การคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ และ	
เทอร์โมไดนามิกส์	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	37
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นที่ผิวด้วย Fourier Transform Infrared มีด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น Spectroscopy (FT-IR) เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 45

4.3 การศึกษาความยาวคลื่นที่ให้ค่าดูดกลืนแสงสูงที่สุดของน้ำเสียสังเคราะห์ สี่ย้อมไดเร็กต์เรด 81	47
4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์	47
4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการดูดซับน้ำเสีย	48
4.5.1 อิทธิพลของค่า pH	48
4.5.2 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ย้อมไดเร็กต์เรด	48
4.5.3 อิทธิพลของปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก	49
4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สี่ย้อม ไดเร็กต์เรด 81	50
4.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	51
4.6.1 สมการการดูดซับของ Langmuir.....	51
4.6.2 สมการการดูดซับของ Freundlich	53
4.6.3 สมการการดูดซับของ Temkin	54
4.6.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich	55
4.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สี่ย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพ แม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	58
4.7.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order)	58
4.7.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-Second Order).....	61
4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สี่ย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพ แม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	66
4.9 การศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์สี่ย้อมไดเร็กต์เรด 81 โดยทำการทดลองวัดค่าความ เข้มข้นของซีไอดี.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	83
ภาคผนวก ง.....	86

เอกสารนี้ ภาคผนวก ก ถึง ง ให้นำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น 87
 ไม่ว่าจะภาคผนวก ก ถึง ง นี้ให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์	9
2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน	11
3.1 ตารางสภาวะที่ทำการทดลอง	34
4.1 ตารางแสดงค่าเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	46
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรดด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก	57
4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความชันและจุดตัดแกน y ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์ เรด 81	64
4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์	65
4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคเร็กซ์เรด 81	66
ข.1 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคเร็กซ์เรด 81 (w/v) เท่ากับ 300 มิลลิกรัม ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง	81
ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคเร็กซ์เรด 81 ใช้ ปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 6 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 5 ที่ อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคเร็กซ์เรด 81 เป็นดังนี้ 10, 300, 500 มิลลิกรัมต่อลิตร	81
ค.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิห้อง	83
ค.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนัก ตัวดูดซับเท่ากับ 3 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิห้อง	83
ค.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนัก ตัวดูดซับเท่ากับ 6 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิห้อง	84
ค.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนัก ตัวดูดซับเท่ากับ 9 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิห้อง	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซับเท่ากับ 12 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2
 ที่อุณหภูมิห้อง.....84

ง.1 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81
 โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 12 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์
 300 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา
 180 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเสียดังนี้ 30, 40, 45, และ 50 องศาเซลเซียส 86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตในกิจการพอกย้อม.....	6
2.2 สารเคมีและของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการพอกย้อมผ้าดิบ	8
2.3 โครงสร้างสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81	12
2.4 โครงสร้างหมู่โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะโดยไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว	12
2.5 โครงสร้างอัลคีน	13
2.6 โครงสร้างหมู่โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะและมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว	13
2.7 โครงสร้างหมู่คาร์บอนิล.....	13
2.8 โครงสร้างหมู่โครโมฟอร์ที่มีวงเบนซีน.....	14
2.9 โครงสร้างสารประกอบอะโรมาติก	14
2.10 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	16
2.11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม	19
2.12 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม	19
2.13 ผลของปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิต่อการดูดซับของโครเรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก ขี้เลื่อย	20
4.1 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	38
4.2 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก	39
4.3 ภาพถ่าย EDS ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจาก จุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2.....	40
4.4 ภาพถ่าย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุชนิด ต่างๆ บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) Ca และ (e) Na	41
4.5 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 1 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กแสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆ บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na	42
4.6 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 2 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆ บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na.....	43
4.7 Map Sum Spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่ เหล็กถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2.....	44
4.8 เส้นสเปกตรัมของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	46
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าดูดกลืนแสงของสีย้อมไตรเร็กต์ เรด 81.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก	47
4.11 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ	48
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์	49
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ	50
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับอุณหภูมิ	51
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ.....	52
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก.....	53
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์ 81	55
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์ 81	56
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน	60
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน.....	63
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่ปริมาณถ่านต่างกัน	65
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคโรเร็กซ์ 81.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
SS	Suspended Solids
COD	Chemical Oxygen Demand
ZVI	Zero-Valent Iron
BC	Biochar
MBC	Magnetic Biochar



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ เส้นใย หนัง อาหาร ยา และเครื่องสำอางเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง และสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศมาก ทำให้มีการพัฒนาทางด้านกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นโอกาสที่น้ำทิ้งจะไปปนเปื้อนเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำก็มากตามไปด้วย จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มสะสม เดือนมกราคม-มีนาคม 2565 มีจำนวนรวม 2,680 โรงงาน และโรงงานที่มีการฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อปัญหาของน้ำเสียปนเปื้อนได้เรีกต์เรด 81 จำนวน 199 โรงงาน (สถาบันพัฒนาสิ่งทอ, 2565)

การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสีย ส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีปัจจัยอื่นสำหรับพิจารณาในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัด เช่น ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ค่าใช้จ่าย เป็นต้น โดยเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแต่ละวิธีข้างต้นมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีกายภาพเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้ในโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในประเทศไทย ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation-Flocculation) เป็นวิธีสำหรับแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีในการตกตะกอน เช่น สารส้ม และปูนขาว เป็นต้น นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสี และสารอินทรีย์ แต่อาจเกิดกากตะกอนขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone Oxidation) โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงจึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสี และสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม (วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2540) แต่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่างรวมถึงสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิด ทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง การกรอง (Filtration) นิยมใช้เป็นถังกรองทรายมักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง ทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยหรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้า ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) เป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียได้ แต่ต้องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการตกตะกอน การดูดซับ (Adsorption) นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมี หรือระบบบำบัดทางชีวภาพ มักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน แต่ถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องใช้ข้อมูลเชิงลึกจากเอกสารทุกฉบับที่ควรนำมาใช้

ชาน และแทนนินถูกนำมาพัฒนาเม็ดปิดโคโตชาน-แทนนิน เพื่อใช้กำจัดสีในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการบำบัดทางกายภาพด้วยดูดซับถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสามารถกำจัดสีจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

ปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากใช้ถ่านที่ทำจากวัสดุที่หาง่าย ราคาถูกหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น กากอ้อย แกลบ และแกนข้าวโพด เป็นต้น มาเป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย ในประเทศไทยมีภูมิอากาศเหมาะสมในการปลูกข้าวโพดสามารถปลูกได้ในหลายพื้นที่ ปริมาณการปลูกข้าวโพด เฉลี่ยระดับประเทศ ตั้งแต่ปี 2560-2564 เท่ากับ 506,849.4 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) ซึ่งแกนข้าวโพดเป็นสิ่งเหลือทิ้งจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาทำเป็นถ่าน เพื่อใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย และการใช้ถ่านชีวภาพดูดซับมลพิษในน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพที่น่าพอใจ แต่ปัญหาคือการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสียหลังจากดูดซับแล้วทำได้ยากจึงมีนักวิจัยหลายคนสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก Fe^{2+} และ Fe^{3+} แล้วนำไปดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งทำให้ผลการดูดซับที่ดีและแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายขึ้นโดยใช้แม่เหล็กดูดออก โดยถ่านชีวภาพในสภาวะแม่เหล็กสามารถช่วยให้การดูดซับดียิ่งขึ้น สังเคราะห์ได้ง่าย และไม่ส่งผลให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม (ชมพูนุท และคณะ, 2561) แต่ยังพบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่สังเคราะห์จาก Fe^{2+} และ Fe^{3+} มีความไม่เสถียรเหล็กหลุดออกจากถ่านและปนเปื้อนในน้ำเสียได้ง่าย ในเวลาต่อมา มีผู้วิจัยสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก Fe^0 และระบุว่าเหล็กจะมีความเสถียรมากขึ้นและไม่หลุดออกมาง่าย แต่งานวิจัยยังมีอยู่ในวงจำกัด

โครงการพิเศษนี้จึงมุ่งที่จะสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไตรคลอโรเอทรีน 81 ในงานวิจัยจะศึกษาถึงไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา และอุณหพลศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กและทดสอบคุณสมบัติ
- 2) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไตรคลอโรเอทรีน 81 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ
- 4) เพื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ
- 5) เพื่อศึกษาอัตราเร็วและอันดับของปฏิกิริยาในการดูดซับ
- 6) เพื่อศึกษาอุณหพลศาสตร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็น 1) สังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ให้โดยวิเคราะห์คุณสมบัติดังนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใด ๆ Carbon, Hydrogen, Oxygen, Nitrogen, Carbon/Nitrogen, วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและ

พื้นผิว, องค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชัน, ค่า Point of Zero Charge, วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ และวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

2) สังเคราะห์น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไดเรกต์เรด 81 คือ 10, 300, 500 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการวัดค่าความเข้มข้น และ COD

- ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10, 300, 500 มิลลิกรัม/ลิตร
- ค่าพีเอช คือ 2, 3, 4, 5, 7, 9
- ปริมาณของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก คือ 0, 3, 6, 9, 12 กรัม/ลิตร
- ระยะเวลาในการดูดซับ คือ 0, 15, 30, 60, 90, 150, 180 นาที
- อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 45°C, 50°C

โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นหลังบำบัดแล้วทุกครั้ง

เมื่อได้สภาวะการบำบัดที่ดีที่สุดแล้วจึงวัดค่า COD ในน้ำเสียหลังบำบัด

นำผลการทดลองไปคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา และอุณหพลศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่มีความเข้มข้นของสีสูงจากอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ
- 2) เป็นแนวทางการลดต้นทุนในการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนสีข้อม
- 3) ช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งจากเกษตรกร เพื่อนำมาเป็นประโยชน์ต่อการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม (ชนิษฐา, 2550)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม กรด ต่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่างๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจึงมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ปนเปื้อนออกมา นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรง จาก การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้าเป็นขั้นตอนแรกในการผลิตผ้าย้อมหรือผ้าพิมพ์ที่มีคุณภาพนับว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอถักมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้อยู่ในสภาพที่สามารถจะนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี

1) การเผาขน (Singeing) มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดขนที่ผิวผ้าโดยเฉพาะผ้าเส้นใยสั้นที่มักจะมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาจากผิวผืนผ้าเป็นจำนวนมาก โดยการนำผ้าผ่านบริเวณเปลวไฟด้วยความเร็วสูงเป็นต้น การเผาขนจะทำให้ผิวผ้าเรียบซึ่งจะง่ายในการพิมพ์ผ้าเพื่อป้องกันการย้อมต่าง และเพื่อป้องกันการเกิดเป็นขุยหรือเป็นเม็ดบนผิวผ้าเมื่อมีการใช้งานหรือซักล้าง

2) การลอกแป้ง (Desizing) การลอกแป้งเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับผ้าทอ เนื่องจากในการทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายยีนก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทอและทนทานต่อการเสียดสีในระหว่างการทอมากขึ้น แต่ก่อนที่จะทำการย้อมหรือพิมพ์ผ้าต้องผ่านขั้นตอนการลอกแป้งออกส่วนในผ้าถักจะไม่นิยมใช้การลงแป้ง การลอกแป้งนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลอกด้วยเอนไซม์ซึ่งเป็นสารทางชีวภาพ โดยการปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารประกอบเปอร์ซัลเฟต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือการใช้น้ำร้อนกับสารซักฟอก

3) การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring) การขจัดสิ่งสกปรก หมายถึง การกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกจะทำกับวัสดุสิ่งทอทุกประเภททั้งเส้นใย เส้นด้าย ผ้าถัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ้าทอ เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติหรือสิ่งติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น

4) การฟอกขาว (Bleaching) กระบวนการนี้เป็นการกำจัดสีตามธรรมชาติของวัตถุดิบ ซึ่งอาจจะมีผลต่อกระบวนการย้อมและพิมพ์ออก โดยปกติแล้วการฟอกขาวจะทำกับเส้นใยธรรมชาติ แต่ถ้าวัสดุนั้นจะทำการย้อมสีในเฉดเข้ม การฟอกขาวอาจจะไม่ต้องทำหรือทำการฟอกอ่อนๆ ก็ได้ สารฟอกขาวทั่วไปที่ใช้กับเส้นใยเซลลูโลสคือตัวออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมเพอร์ออกไซด์ ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของผ้า

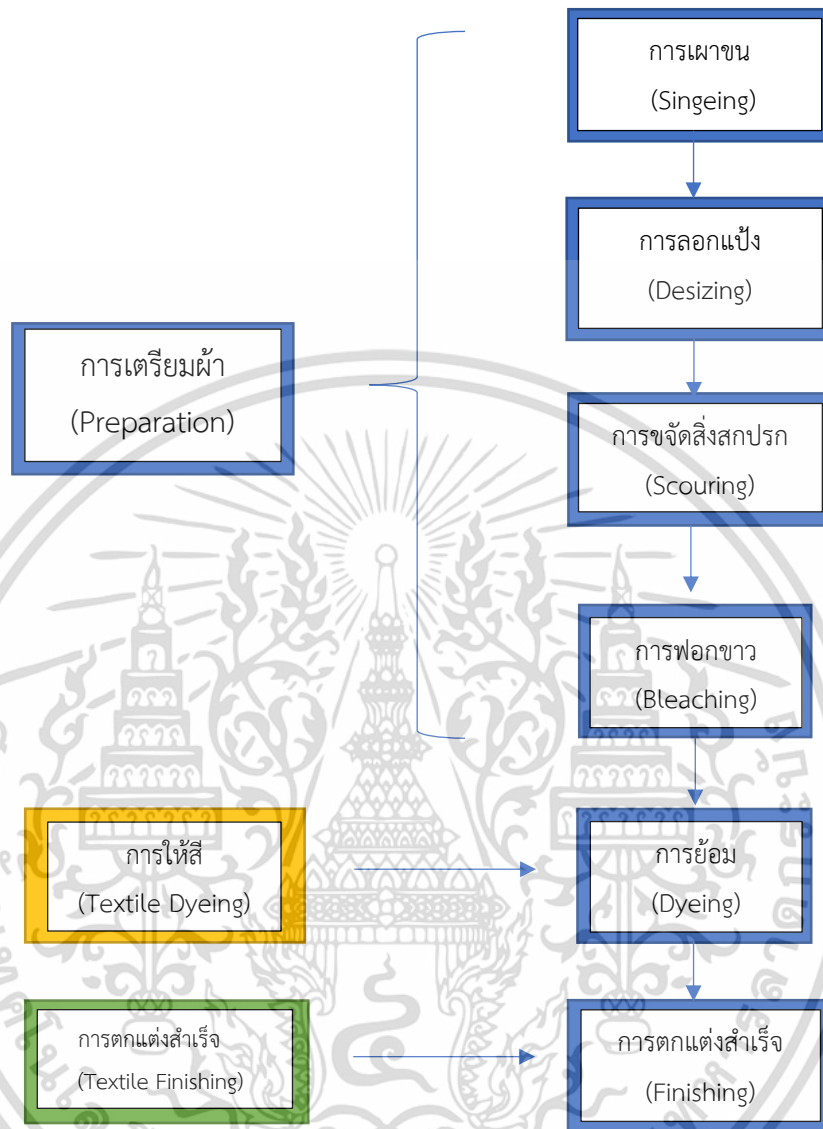
5) การชุบมัน (Mercerization) การชุบมันจะทำกับผ้าฝ้ายเป็นส่วนใหญ่เป็นการทำให้ผ้าฝ้ายมีความสามารถในการดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดีขึ้น ยังมีความเงามันรวมถึงมีความแข็งแรงมากขึ้น ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด เพิ่มความสม่ำเสมอในการย้อมและการดูดซึมน้ำ ผ้าจะถูกทำปฏิกิริยาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เย็นโดยมีแรงดึง จากนั้นจึงทำการล้างกระบวนการนี้จะทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีค่าบีโอดีและปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำ แต่มีความเป็นด่างสูงซึ่งอาจจะเกิดปัญหาต่อผู้ทำงานหากได้สัมผัสกับด่างที่มีความเข้มข้นสูง

2.1.2 กระบวนการย้อมผ้า (Dying)

เป็นวิธีการหนึ่งในการตกแต่งผืนผ้าให้มีความสวยงามสะอาดตา การย้อมสีผ้าให้ได้ดีจะต้องเลือกสีย้อมให้เหมาะกับชนิดของเส้นใย โดยทั่วไปสีย้อมจะอยู่ในรูปของสารละลายที่สามารถดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยด้วยแรงหรือพันธะทางเคมี เทคนิคการย้อมที่ถูกต้องทำให้ได้ผ้าย้อมที่มีสีสวยงามตามความต้องการ การละลายขั้นตอนใดโดยคิดว่าไม่จำเป็นจะทำให้ผ้าย้อมไม่ได้คุณภาพหรืออาจจะทำให้เส้นใยเสื่อมคุณภาพได้ การย้อมสีทำได้หลายระยะทั้งก่อนหรือหลังการปั่น

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนในการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับสิ่งทอ เช่น ความเงามัน และความนุ่มของสิ่งทอ



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในกิจการฟอกย้อม

(สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อมกรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข, 2554)

2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

น้ำเสียที่ปล่อยมาจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วย สารแขวนลอย (Suspended Solids) และสารอินทรีย์จากกระบวนการย้อมในปริมาณสูง ได้แก่ แป้ง สีย้อม กรดอะซิติก และเส้นใย เส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการผลิต อีกทั้งยังมีสารอนินทรีย์ประเภทโลหะหนักจากสีย้อมปนเปื้อนในน้ำทิ้ง เช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอล (Co) สังกะสี (Zn) เป็นต้น

โดยน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีลักษณะสำคัญคือ การมีสีของน้ำทิ้ง และมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างสูงโดยคุณสมบัติและปริมาณของน้ำเสียจะแตกต่างกันตามปริมาณน้ำและสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนของการฟอกย้อมดังนี้

2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิตแต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังกระบวนการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมซึ่งส่วนหนึ่งมีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นขึ้นสิ่งสกปรกเจือปนที่ค่อนข้างสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม ซึ่งน้ำในส่วนนี้จะปริมาณมากแต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

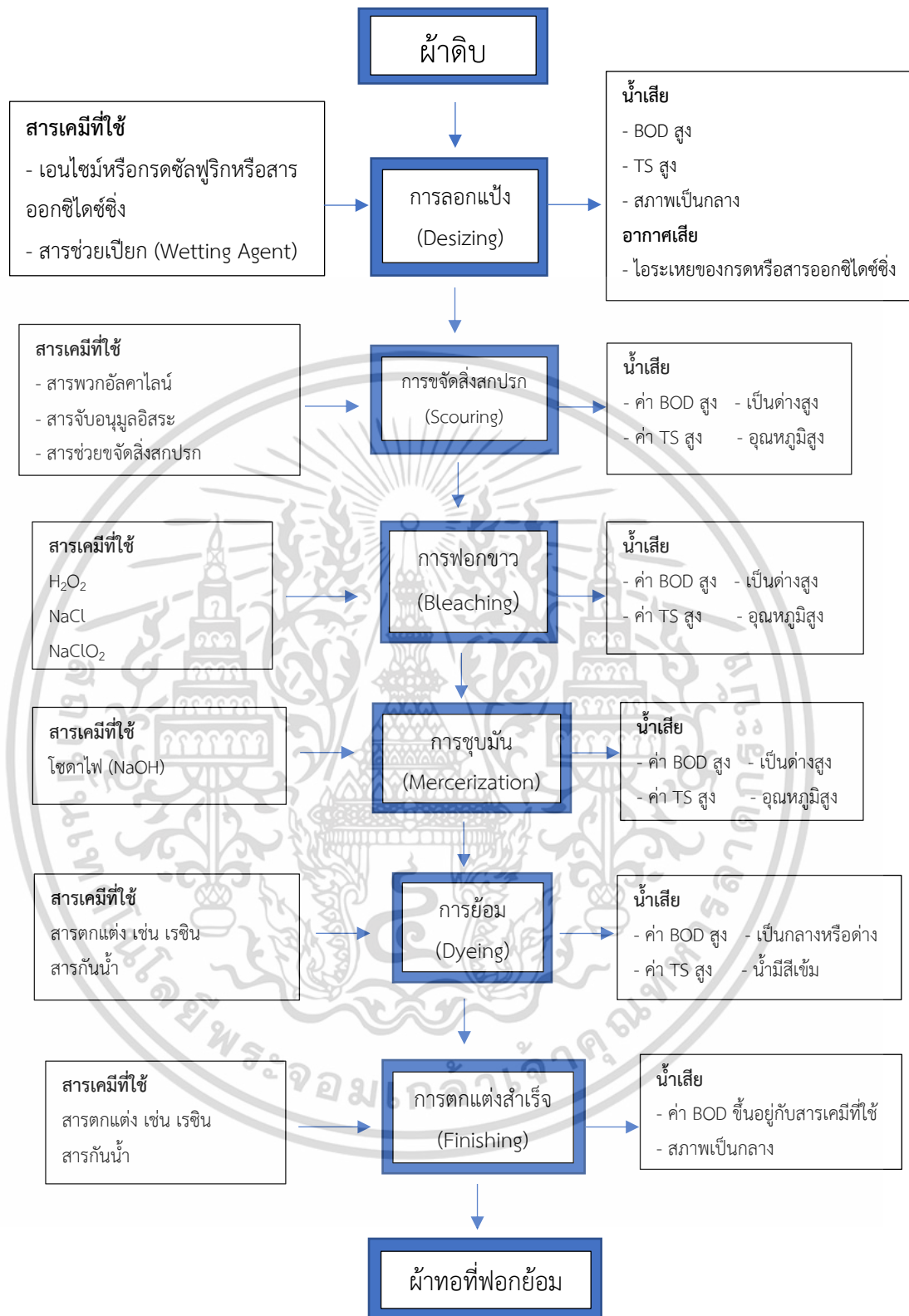
2) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมมักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ

3) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นในกระบวนการฟอกย้อมบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม บางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

5) น้ำที่ใช้จากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงานหรือน้ำฝน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สารเคมีและของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2. ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานคร และ ปริมาณผล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดโดยมีค่าที่ตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณ สี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวน ข้อมูล
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี หน่วย Pt Co	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าฝ้าย	9.0	110	370	150	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	40	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าอื่น	9.1	230	713	65	400	30

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

หมายเหตุ: ค่าลักษณะน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับหรือน้อยกว่า 50

2.3 สีย้อม (Dyes) (รัชนิย์, 2544)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินเมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาี้ลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ และบางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราวซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำจะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สภาวะเช่นนี้ได้เมื่อโมเลกุลสีย้อมมีหมู่อะตอม ซึ่งถูกจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยได้เองกับเส้นใยแก้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีติดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) แรงแวนเดอวาลส์ (Van Der Waals force) แรงไอออนิก (Ionic Force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

1) พันธะไฮโดรเจน ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นๆ ได้เป็นวาเลนซ์ที่สอง เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ เส้นใยและสีเกือบทุกชนิดมีกลุ่มไฮดรอกซี

2) แรงแวนเดอวาลส์ แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นแรงที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดกันเองได้ โดยเฉพาะระหว่างตัวสีกับเส้นใย จะเกิดแรงนี้ยึดให้ติดกันได้ เมื่อโมเลกุลของทั้งสองมีเอกลักษณ์พิเศษ คือ มีโมเลกุลยาวและแบน ดังเช่น โมเลกุลของเซลลูโลส สีแวต สีไดเรกต์หรือระหว่างเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตกับสียูเรเทน

3) พันธะไอออนิก เกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุสองชนิดที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมธาตุที่เป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นประจุลบ การยึดรวมตัวกันของเส้นใยและสีแบบนี้เกิดขึ้นโดยไฟฟ้าส่วนใหญ่สีซึ่งละลายน้ำจะมีไอออนของสีเป็นลบการดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอวาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าใช้ตัวสีที่มีไอออนเป็นบวกก็ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใย

4) พันธะโควาเลนต์ เป็นพันธะทางเคมีซึ่งอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงกว่าแรงที่กล่าวมาทั้งสิ้น

2.3.1 คุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์ สีย้อมสังเคราะห์ที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

2.3.1.1 มีความเข้มของสี (Intense Color) เมื่อใช้ในปริมาณน้อยก็ให้สีเข้มได้

2.3.1.2 มีการละลายตัวในลักษณะสารละลายน้ำ (Aqueous Solution) ในเกือบทุกกรณีซึ่งอาจจะอยู่อย่างถาวรหรือเฉพาะระหว่างที่มีการย้อม

2.3.1.3 มีความสามารถในการดูดซึมและติดอยู่ในเส้นใย (Substantivity) หรือรวมกับเส้นใยโดยปฏิกิริยาทางเคมี (Reactivity)

2.3.1.4 มีความคงทน (Fastness) คือ สามารถทนต่อการกระทำต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตและการใช้ตามปกติ (มณฑา, 2541)

2.3.2 ประเภทของสีย้อม

สามารถแบ่งสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือสีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyestuffs) และสีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyestuffs) มี 5 ประเภท คือ

1) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye)

2) สียูเรเทน (Disperse Dye)

3) สีแอซิด (Acid Dye)

4) สีแวต (Vat Dye)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ผู้จัดทำได้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สีย้อมตรง (Direct Dye)

ซึ่งสีแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการย้อมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสีชนิดนั้นๆ รวมถึงการย้อมลงบนผ้าหรือเส้นใยที่แตกต่างกัน

ประเภทสีย้อม	สมบัติกายภาพทางเคมี	พันธะหรือกลไกการติดสี
สีย้อมเอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
สีย้อมเมทัลลคอม เพอริกซ์เอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำน้อย สีติดดี	พันธะไอออนิก
สีย้อมไดเร็กต์	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
สีย้อมรีแอคทีฟ	ประจุบวก ละลายน้ำได้	พันธะโควาเลนต์
สีย้อมดิสเพิร์ส	ไม่ละลายน้ำ กระจายอยู่ในน้ำ เป็นอนุภาคคอลลอยด์ สีติดแน่นดี	คอลลอยด์ของสีย้อม ดูดซับเส้นใย

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ที่มา : อภิชาติ, 2539; เทพฤทธิ, 2544; สกล, 2546

2.3.3 สีแท้หรือสีจริง (True Color) (สุกัญญา, 2558)

สีที่เกิดจากสารต่างๆ ในน้ำและละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยาก ประเภทกรดฮิวมิก และฟัลวิค (Humic Acid and Fulvic Acid) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตและผลผลิตจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตซึ่งมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรอง ดังนั้นการกำจัดสีแท้จึงทำได้ยาก

2.3.4 สีปรากฏ (Apparent Color)

สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา เช่น แพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ตะกอนของดินและทราย สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง หรือการตกตะกอน (วนิดา, 2555) ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ

ซึ่งสีแท้ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และอบไม้ยางพารา ส่วนสีปรากฏเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำจาก 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียเองเนื่องจากการปนเปื้อนมาแต่แรกในน้ำเสีย เช่น สีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

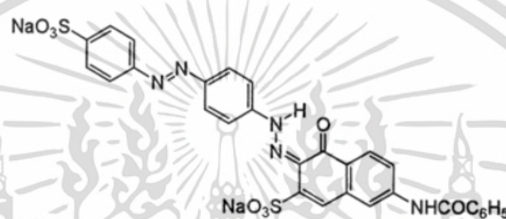
ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้า ฟอกย้อม เยื่อกระดาษ ซึ่งสีที่เกิดขึ้นเป็นสีปรากฏจากสารเคมีในกระบวนการผลิตรวมทั้งลิกนินและแทนนิน โดยอาจแบ่งประเภทตามการแตกตัวให้ประจุเส้นใยที่ใช้ย้อม หมู่ช่วยละลาย รวมทั้งโครงสร้างทางเคมีของสี นอกจากนี้สีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียหลังจากการเก็บกักหรือหลังจากผ่านการบำบัด เช่น ในระบบบำบัดแบบบ่อฝิ่ง (Oxidation Pond) ที่อาศัยสาหร่ายให้ออกซิเจน แต่สาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียว เป็นต้น

2.3.5 สีย้อมไดเร็กต์เรด 81

สูตรโมเลกุล: $C_{29}H_{19}N_5Na_2O_8S_2$

น้ำหนักโมเลกุล: 675.6

หมายเลข CAS: 2610-11-9/12237-71-7



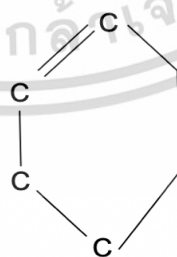
รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อมไดเร็กต์เรด 81

ที่มา: <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-red-81.html>

2.3.6 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้, 2557)

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์โครงสร้างทางเคมีมี 2 กลุ่ม คือ หมูโครโมฟอร์ จะสามารถดูดกลืนได้ทั้งในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่มองเห็นได้ โครโมฟอร์ส่วนมากจะมีพันธะไม่อิ่มตัว เช่น $C=O, C=C, -N=N-, -NO_2$ เป็นต้น สามารถแบ่งได้ 3 แบบคือ

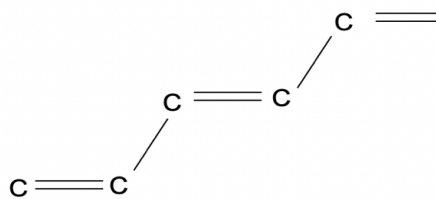
- 1) โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะโดยไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว เช่น อัลคีน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างหมูโครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะโดยไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว

ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอัลซีน

ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>

2) โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะและมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว เช่น หมูคาร์บอนิล



รูปที่ 2.6 โครงสร้างหมูโครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะและมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว

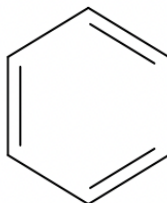
ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>

รูปที่ 2.7 โครงสร้างหมูคาร์บอนิล

ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) โครโมฟอร์ที่มีวงเบนซิน เช่น สารประกอบอะโรมาติก



รูปที่ 2.8 โครงสร้างหมู่โครโมฟอร์ที่มีวงเบนซิน

ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>



รูปที่ 2.9 โครงสร้างสารประกอบอะโรมาติก

ที่มา: <https://1th.me/qjvdW>

2.3.7 ความเป็นพิษของสีย้อม (จรีพร, 2562)

สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษโดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น มาลาไคท์กรีน (Malachite Green: MG) เป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่างๆ เช่น ผ้าไหมผ้าขนสัตว์ฝ้ายและกระดาษเป็นผงสีเขียวละลายน้ำได้ดีเมื่อละลายน้ำแล้วได้สารสีออกน้ำเงินมาลาไคท์กรีนที่ละลายในน้ำจะถูกดูดซึมเข้าสู่ปลาได้อย่างรวดเร็วและสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของปลาและเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาไคท์กรีน (Leuco Malachite Green: LMG) ที่ไม่มีสีอัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำตรวจพบมากที่บริเวณไซมันในช่องท้อง และตรวจพบน้อยในน้ำเลือดเนื่องจากสามารถแพร่กระจายไปได้อย่างกว้างขวางทั่วทุกเนื้อเยื่อของปลาทำให้เกิดการสะสมและติดแน่นในเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดีและถูกกำจัดออกจากเนื้อเยื่อได้ช้าทำให้เกิดผลข้างเคียงต่างๆ มากมาย พิษของมาลาไคท์กรีนต่อสัตว์น้ำส่งผลให้เกิดการเหนียวน้ำในการเกิดเนื้ออกและสามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ตับในสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความผิดปกติทางพันธุกรรมในสัตว์น้ำโดยการ

เพิ่มความยาวของสาย DNA การพัฒนาของตัวอ่อนหลังฟักออกจากไข่มีความผิดปกติไปจากเดิมถึง 3-5 เท่าเป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับของแคลเซียมและโปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็วเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่ายพืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและทะเล พืชของมาลาโคฟิตินต่อมนุษย์ส่งผลต่อระบบการหายใจของเซลล์ซึ่งเป็นแหล่งสร้างพลังงานสังเคราะห์ทางเคมีทำให้เกิดอาการวิงเวียนศีรษะคลื่นไส้อาเจียน หากร่างกายสะสมสารเหล่านี้เข้าไปมากๆ อาจมีอาการเป็นอัมพาตที่แขนขาส่งผลต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง ดังนั้นจึงถือเป็นสารต้องห้ามไม่ให้มีตกค้างในสัตว์น้ำซึ่งประเทศต่างๆ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้ได้ออกกฎระเบียบกำหนดไม่ให้มีสารเหล่านี้ในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภค สีย้อมมีหมู่ฟังก์ชันหลายประเภทโครงสร้างซับซ้อนจึงทำให้มีความคงตัวในแหล่งน้ำสูงถูกกำจัดด้วยขบวนการตามธรรมชาติได้ยาก (Bhattacharyya และ Sharma, 2004) การทิ้งน้ำที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ และทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่รุนแรงตามมาเนื่องจากความเป็นพิษโดยตรงของสีย้อม และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

2.4 การวัดสีในน้ำเสีย (ปรางศิริ, 2551)

1) วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum Cobalt Standard) วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐานจะเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานสีเหลืองคล้ำน้ำตามแหล่งธรรมชาติทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard Color Comparison Tube) หรือที่เรียกว่าหลอดเนสเลอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสีมานานแล้ว ข้อดีคือราคาถูก แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีการเตรียมสารมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งาน

2) วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption Maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าสีของน้ำตัวอย่างในรูปการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยมีหลักการที่ว่าสีเข้มจะดูดกลืนแสงมากหรืออัตราการทะลุผ่านของแสงน้อย สำหรับการอ่านค่าความเข้มข้นของสีอ่านได้จากกราฟมาตรฐานที่ทำขึ้นมา

2.5 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

1) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation-Flocculation) เป็นวิธีสำหรับแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสียโดยใช้สารเคมีในการตกตะกอน เช่น สารส้ม และปูนขาว เป็นต้น นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสีและสารอินทรีย์

2) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone Oxidation) โอโซน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสีและสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การดูดซับ (Adsorption) นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมีหรือระบบบำบัดทางชีวภาพ มักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน

4) ระบบการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) วิธีนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การกำจัดบีโอดีที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียโดยอาศัยจุลินทรีย์มาย่อยสลายเปลี่ยนแปลงสภาพของสารอินทรีย์ต่างๆ

2.6 ถ่านกัมมันต์ (ฉวีวรรณ, 2562)

ถ่านกัมมันต์หรือคาร์บอนกัมมันต์ มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษคือ Activated Carbon หรือ Activated Charcoal คือถ่านที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือวิธีทางกายภาพก่อน เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจำนวนมาก โดยขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับเมื่อมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำให้การดูดซับของโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.10 เป็นแบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโมเลกุลขนาดต่างๆ



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ที่มา: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf

2.6.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ผงถ่านกัมมันต์ (Powdered Activated Carbon) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรค สารเคมี ยางรถยนต์ โครงสร้าง อาคาร เหมืองแร่ บำบัดน้ำเสีย และการกรองน้ำ เม็ดถ่านกัมมันต์ (Granular Activated Carbon) ใช้ในการกรองอากาศเสีย อุตสาหกรรมสารเคมีและเวชภัณฑ์ยานยนต์ ใช้ในการถ่ายเทพลังงานความร้อน การกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ และถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded Activated Carbon) ใช้ในการกำจัดสารเคมีที่มีพิษตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถใช้วัสดุใดๆ ก็ได้ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เปลือกไม้ ไม้ไผ่ ถ่านหิน กะลามะพร้าว ฯลฯ ซึ่ง กระบวนการผลิต มี 2 วิธี คือ

1) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Reactivation) เป็นการนำถ่านที่ผ่านการเผาไหม้ในสภาพอ็อกซิเจนหรือจำกัดอากาศเพื่อที่จะทำให้มีออกซิเจนน้อยมากระตุ้นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิกระตุ้น ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมากเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในทางอ้อมทั้งยังไม่สามารถควบคุมสมบัติของถ่านกัมมันต์ให้คงที่ได้ รวมถึงพื้นที่ผิวและรูพรุนเกิดในปริมาณน้อย

2) การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation) เป็นการเปลี่ยนวัสดุดิบโดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide)

2.7 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดักจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้เกาะจับและติดบนผิว เป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ ซึ่งโมเลกุลคือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายเข้ามาเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวมีตัวถูกดูดซับมาเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงขนาด เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

2.7.1 กลไกการดูดซับ (กุสุมา, 2562)

2.7.1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เข้าถึงผิวด้านนอกของสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวด้านนอกของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวน้ำสารดูดซับ

2.7.1.2 การแพร่ภายใน (Internal or Pore Diffusion)

เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่เข้าสู่ภายในรูเล็ก ๆ จำนวนมากมายภายในเนื้อสารดูดซับรูเล็กๆ ดังกล่าวจะก่อให้เกิดพื้นที่ผิวปริมาณมากมายในสารดูดซับ

2.7.1.3 ปฏิกริยาที่พื้นผิว (Surface Reaction)

ปฏิกริยาที่พื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียด้วยวัสดุดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

2.7.2.1 สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

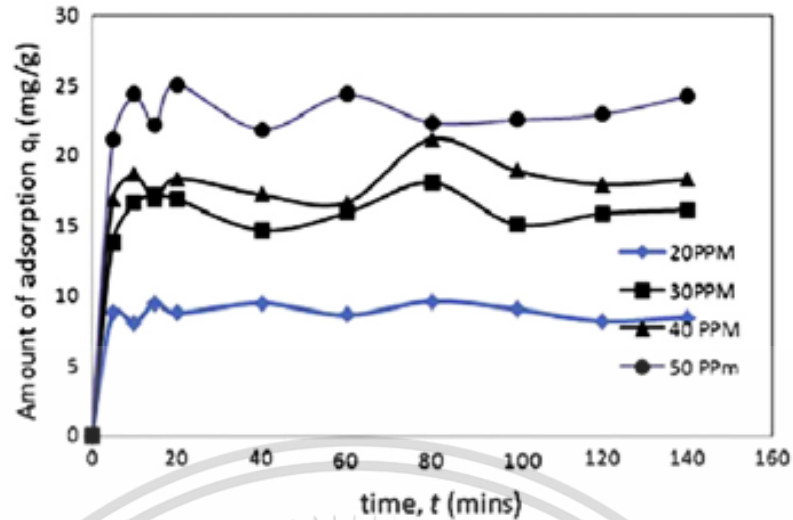
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสี ไม่ว่าจะเป็นสีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อมเมื่อละลายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับทางเคมี สีย้อมที่มีประจุลบในโมเลกุลจะถูกดูดซับได้ดีที่ pH ต่ำ เพราะผิวของตัวดูดซับจะมีไอออนบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ปริมาณมากเกาะที่ผิว ซึ่งสภาพประจุไอออนบนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับความเป็นกรดต่างของสารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004; Attia, 2006; Kumar และคณะ, 2010; Sun และคณะ, 2010) ที่ pH ต่างกันจะมีปริมาณประจุบวกและประจุลบในสารละลายแตกต่างกันด้วย โดยพิจารณาจาก pH_{zpc} (Point of Zero Charge) หรือ pH ที่ทำให้ประจุบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า pH ของสารละลายต่ำกว่า pH_{zpc} ประจุรวมบนตัวดูดซับจะเป็นบวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ที่สภาวะนี้ตัวดูดซับจะสามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุลบได้ดี แต่ถ้า pH สูงกว่า pH_{zpc} ประจุรวมบนผิวตัวดูดซับจะเป็นลบเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกได้ดีกว่า ตัวอย่างเช่น คองโกเรด เมื่อละลายน้ำได้ประจุลบ มี pH_{zpc} เท่ากับ 10.0 จะถูกดูดซับได้ดีที่ pH 7.8-8.3 ในทางตรงกันข้าม สีเบสิก เมื่อละลายน้ำได้ประจุบวก การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ pH สูงกว่า pH_{zpc} (Grabowska และ Gryglewicz, 2007) ดังนั้นการปรับสภาพ pH ของสารละลายให้เหมาะสมกับโครงสร้างของสีย้อมจึงเป็นการช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย

2.7.2.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเพราะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย (Concentration Gradient) (Yanan และคณะ, 2011) กระบวนการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับมี 3 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ (Film Diffusion) ซึ่งเกิดได้เร็ว เป็นสาเหตุที่ทำให้ร้อยละของการดูดซับในช่วงต้นของเกือบทุกการดูดซับมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการถ่ายเทมวลขั้นที่สองซึ่งเป็นการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (Particle Diffusion) และขั้นที่สามเป็นการดูดซับโมเลกุลสารบนผิวภายในรูพรุน (Adsorption) สองขั้นตอนหลังเกิดได้ช้ากว่า (Mittal และคณะ, 2008; Fu และคณะ, 2012) ทำให้ร้อยละของการดูดซับในช่วงหลังเริ่มลดลงจนคงที่ (รูปที่ 2.11) อย่างไรก็ตามแม้จะมีกระบวนการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุนแต่ขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารที่จะแพร่เข้าสู่รูพรุนได้นั้นคือ สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนก็จะไม่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ แม้ว่าตัวดูดซับจะมีรูพรุนมากก็ตาม นอกจากนี้ความแรงไอออนของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายซึ่งมีผลลดแรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับผิวของตัวดูดซับจะทำให้การดูดซับลดลง (Lorenc และ Gryglewicz, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

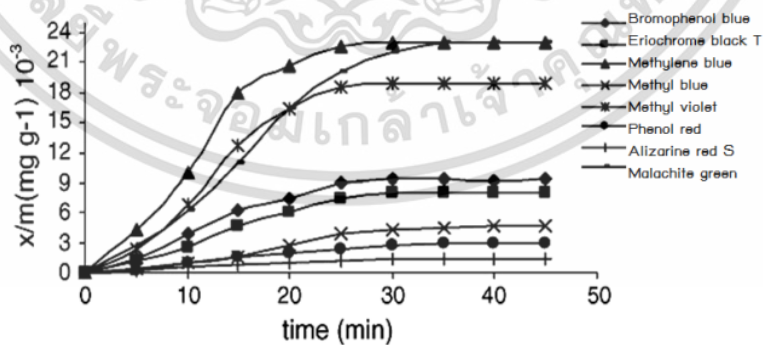


รูปที่ 2.11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม

ที่มา: (Chowdhury, 2010)

2.7.2.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกการดูดซับเกิดเร็วมาก เนื่องจาก Concentration Gradient ในสารละลายและที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมากทำให้ดูดซับสีย้อมได้มาก หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุลเพราะที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีย้อมไว้เต็มที่แล้วการศึกษาการดูดซับสีย้อมหลายประเภท ได้แก่ โบโรโมฟีนอลบลู อะลิซารินเรดเอส เมทิลบลู เมทิลีนบลู เอริโอโครมแบลคที มาลาโคท์กรีน ฟีนอลเรด และเมทิลไวโอเลต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าการดูดซับเกิดได้ดีมากช่วง 30 นาทีแรก (รูปที่ 2.12) และแม้จะให้ดูดซับต่อเนื่องไปจนถึง 60 นาที แต่การดูดซับก็เพิ่มขึ้นน้อยมาก (Iqbal และ Ashiq, 2007)



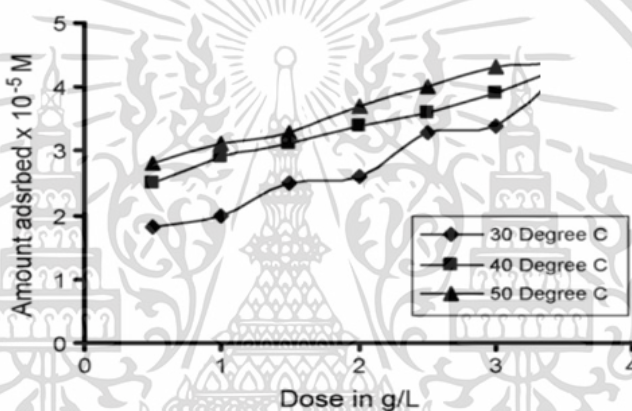
รูปที่ 2.12 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม

ที่มา: (Iqbal และ Ashiq, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.4 ปริมาณการดูดซับ

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลาย จากการศึกษา (Jain และ Sikarwar, 2008) ซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยดูดซับคองโกเรต พบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่อสารละลาย 0.5–3.5 กรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับเพิ่มจาก 30.0 เป็น 70.1 แต่อัตราการดูดซับจะเริ่มคงที่ที่อัตราส่วน 2.5 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 2.13) ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าอนุภาคใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า นอกจากนี้การดูดซับจะลดลงเมื่อมีสีย้อมตัวอื่นปนอยู่ในสารละลาย เนื่องจากการแข่งขันกันดูดซับ บริเวณที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับและสีย้อมบางประเภทก็เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเอง เช่น การดูดซับเรมาซอลรีแอกทีฟแบล็คจะลดลงร้อยละ 42 ถ้าในสารละลายมีเรมาซอลรีแอกทีฟเอลโลว์ปนอยู่ (Al-Degs และคณะ, 2007)



รูปที่ 2.13 ผลของปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิต่อการดูดซับคองโกเรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อย

ที่มา: (Jain และ Sikarwar, 2008)

2.7.2.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อกระบวนการดูดซับในกระบวนการดูดความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น แต่ในกระบวนการคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากการละลายของสีย้อมเกิดขึ้นได้ดี ทำให้แรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับตัวดูดซับลดลง จะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงผลอุณหภูมิต่อการดูดซับคองโกเรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อย การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียสเป็น 50 องศาเซลเซียส ปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้เกิดกระบวนการคายดูดซับ (Desorption) โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (Reversible Process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron)

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties) เหล็ก (Iron) โดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์หรือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ไม่นับให้เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น ได้แก่

1) เหล็กอ่อน (Wrought Iron) คือเหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddel Furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่มีเนื้อเหล็กถึง 99.99% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กจะตีขึ้นรูปได้ง่ายมาก จึงเป็นที่นิยมของช่างตีเหล็ก

2) เหล็กกล้า (Steel) คือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสมโดยมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2% นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส

3) เหล็กหล่อ (Cast Iron) คือเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2% ขึ้นไป ใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบชิ้นส่วน

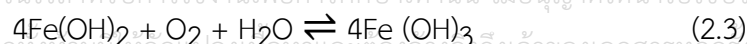
4) เหล็กดิบ (Pig Iron) คือเหล็กที่นำมาจากกระบวนการขุดสินแร่ดิบโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งอื่นเจือปนอยู่โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility Constant) ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็ว และเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว ตามสมการที่ 2.3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงสิ่งนี้ และต้องยังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic Region) ไอออนอื่นๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษหิน ดิน ทราวยปะปนอยู่ด้วยเสมอ (วุฒิชัย, 2545; วรรณวิภา, 2547; ศุภธวดี, 2548; อุทัย, 2548) ส่วน $FeOOH$ จะมีลักษณะเป็นตะกอนผลึกสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางผลึก

2.8.1 การกัดกร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

โลหะสถานะออกซิเดชันศูนย์ มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically Stable Form) เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมาก เมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือ จะสามารถเกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอน (Electron: e^-) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic Region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (Metal Cation) และอิเล็กตรอนจะถูกนำไปอีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic Region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า

เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สภาวะเดิมของมัน เช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของแร่เหล็ก เป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่มีสภาวะที่เหมาะสม สาเหตุการกัดกร่อนโลหะ ได้แก่ น้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด ไม่ว่าจะมียูออกซิเจนละลายหรือไม่ก็ตาม น้ำมีออกซิเจนละลายและค่าพีเอชสูงกว่า 7 โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า โลหะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือเนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอ ผิวโลหะมีรอยร้าวหรือชำรุดเฉพาะแห่งและโลหะที่ได้รับความกดดัน เช่น โลหะที่ถูกทำให้ยืด เป็นต้น (วุฒิชัย, 2545)

การกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นการผุกร่อนหรือการสลายตัวตามกลไกของธรรมชาติ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) คือปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและตัวทำปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันลดลงจะ เรียกว่า เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และปริมาณอิเล็กตรอนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์จะมีจำนวนเท่ากัน ในสมการที่ดุลแล้วเลขออกซิเดชันที่เพิ่มจะเท่ากับเลขออกซิเดชันที่ลดสารตัวใดจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard Reduction Potential) ใช้สัญลักษณ์ E^0_{red} หรือ E^0 ซึ่งคือความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาในแต่ละครึ่งเซลล์ โดยครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายบวก และครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายลบ (ศุภทวดี, 2548) ดังนั้นปฏิกิริยารีดอกซ์ต้องประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันคือมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron Transfer) ระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) และมีสิ่งแวดล้อมต่างๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ปฏิกิริยาการกัดกร่อนประกอบด้วยครึ่งปฏิกิริยา (Half Reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชัน โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของเหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วบวก (Anode) โลหะเหล็กจะสลายตัวกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) และให้อิเล็กตรอน ส่วนปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) คือกลไกของการรับอิเล็กตรอนทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) และสามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นกับตัวรับอิเล็กตรอนทำให้การกัดกร่อนของเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.4 (Zhang และคณะ, 2010; Xi และคณะ, 2011)



จากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของเหล็กเท่ากับ -0.44 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยา ออกซิเดชัน-รีดักชันนั้น Fe^0 จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และ Fe^{2+} จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะมีสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) และตัวถูกรีดิวซ์ (Reduced) ตามลำดับ เนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ของโลหะ ทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอกหากมีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดสารปนเปื้อนสามารถเกิดได้ 3 รูปแบบ (วุฒิชัย, 2545) ดังนี้

- 1) การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเหล็กคือ เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของเหล็ก
- 2) การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกลางอื่น ได้แก่ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กและจะละลายอยู่ในน้ำทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์แต่ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า
- 3) การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจน (H_2) จากการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาที่จะทำให้ไฮโดรเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้ต้องอยู่ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นผิวของเหล็กเกิดการผุกร่อนหรือมีโลหะอื่นอยู่ในกระบวนการซึ่งจะทำให้ไฮโดรเจนเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+)

ตัวอย่างกลไกการเกิดการกัดกร่อนสามารถอธิบายโดยใช้เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Cell) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้
ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.7 ตามลำดับ



2.8.2 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เป็นสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate คือสารดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ (วุฒิชัย, 2545) ได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนผิว แต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้นและเกิดเป็นชั้นทับกันหลายๆ ชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิวอย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพโดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้นั้นคือ โมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุลและโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ก็รวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิต โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้ามโดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า

เช่น ไอออนที่มีประจุหนึ่งหรือโมเลกุลที่มีขนาดยิ่งเล็กลงก็ยิ่งมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวนอกการถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ (อุทัย, 2548) ได้แก่การกวนผสม (Mixing) ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area of Adsorbent) โดยที่ขนาดจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ เป็นผลให้ความจุของการดูดซับต่างกัน หมายความว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ชนิดของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate) คุณสมบัติของสารแต่ละชนิดที่ต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย โครงสร้างโมเลกุล และขนาดของสารหรือโมเลกุลจะเป็นผลให้สารแต่ละชนิดดูดซับได้ไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวดูดซับเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้ ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายมีผลต่อการแตกตัวของสารการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ โดยมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ดังนั้นพีเอชจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ อุณหภูมิ (Temperature) ของระบบมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง และสุดท้ายระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ (Contact Time) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาคือเมื่อเวลาในการสัมผัส ระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตาม แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งซึ่งความสามารถในการดูดซับคงที่คือระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

2.8.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) เป็นจุดสมดุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเป็นลักษณะเฉพาะของระบบซึ่งเกี่ยวกับปัจจัยของการดูดซับไม่ว่าจะเป็นสารดูดซับ สารถูกดูดซับตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และการศึกษาดังกล่าวจะใช้เส้นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ เรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งอาศัยสมการคณิตศาสตร์ในการอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น (อุทัย, 2548) ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) โดยอาศัยสมการเพื่อพิจารณาหาสมการที่เหมาะสมสำหรับปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption Capacity: q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13 (Zhang, 2010)

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \quad (2.8)$$

โดย q คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

$C_i - C_e$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและที่สมดุล (mg/L)

ตามลำดับ

V คือ ปริมาณของสารละลาย (L)

W คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

กระบวนการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์อาศัยสมการไอโซเทอมคือ เมื่อคำนวณปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับได้ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับจะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้กันได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) (วรรณวิภา, 2547; Arancibia และคณะ, 2014) ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm) (Liu และคณะ, 2009; อุทัย, 2548) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough Surface)

2.8.4 การใช้ประโยชน์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron: ZVI) เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับบำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อมเพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรงและมีศักย์รีดักชัน (Reduction Potential) สูงรวมถึงไม่เป็นพิษและมีราคาถูก ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วย ZVI สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ZVI ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วถ้ามีค่าพีเอชเป็นกลางได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์ของ ZVI ในอดีตที่ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ ZVI ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบฮาโลจีเนตอะลิฟาติก (Halogenated

Aliphatic Compounds) เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride: CT) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) เป็นต้น สารประกอบฮาโลจีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon Compounds) เช่น สารกำจัด ศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) ไนเตรท (Nitrate) โลหะ (Metals) เช่น UO_2^{2+} MoO_4^{2-} TcO_4^- และ CrO_4^{2-} เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูป (Transformation) คือ การเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษน้อยลง เช่น เปลี่ยนจากคาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นมีเทน (Methane) เป็นต้น แต่ถึงอย่างไร กลไกของการเกิดปฏิกิริยาก็ยังคงมีความไม่แน่นอน ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้เสนอเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วย ZVI ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หรือปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous Reaction) โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) เข้าทำปฏิกิริยากับ ZVI ที่ผิวหน้าอย่างสมบูรณ์ การอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นการเกิดกลไกทางไฟฟ้าเคมี นั่นคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่ ZVI จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยมีสารปนเปื้อนหรือสารตัวอื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน นอกจากนี้การลดการปนเปื้อนของน้ำยังอาศัยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการแยกสารที่ต้องการกำจัดออกจากสารละลายของเหลวโดยการให้สารละลายผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะเกิดกลไกการทางเคมีขึ้น นำ ZVI มาใช้บำบัดสารปนเปื้อนเริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดย Reynolds ซึ่งได้ทำวิจัยเพื่อหาวัสดุที่จะนำมาใช้บำบัดสารปนเปื้อน 10 ชนิด โดยมี ZVI เป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้ ZVI ในการบำบัดสารประกอบฮาโลจีเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon Compounds) พบว่า ZVI สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งได้รับความสนใจและมีกระบวนการบำบัดที่ค่อนข้างชัดเจนจะสามารถจำแนกตามชนิดของสารปนเปื้อนได้ดังนี้

1) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)

1.1) สารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ด (Halogenated Organic Compounds) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสารพวกฮาโลเจน (Halogens) รวมอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติละลายน้ำได้มากและย่อยสลายได้น้อย แต่สามารถถูกดูดซับด้วยดินและระเหยได้ทำให้เมื่อสารเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่พื้นดินจึงเกิดปัญหาการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ง่าย ZVI ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการแยกสารฮาโลเจน (Dehalogenation) สมมุติฐานของการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ด ด้วย ZVI เป็นที่ยอมรับกันดีว่าปฏิกิริยาการแยกสารฮาโลเจนจะเกิดขึ้นควบคู่กับการกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็ก โดยที่เหล็กมีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard Reduction Potential: E_{red}^0) จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและสารประกอบอินทรีย์ฮาโลจีเนเต็ดเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2.9 (Helland และคณะ, 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยอาศัยกลไกการลดจำนวนของไอออนคลอไรด์ (Cl⁻) ลงตัวอย่าง เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride: CCl₄) ถูกลด Cl⁻ กลายเป็น คลอโรฟอร์ม (CHCl₃) CH₂Cl₂ CH₃Cl และมีเทน (CH₄) ในที่สุด (Helland และคณะ, 1995) ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยเหล็กที่เกี่ยวข้องกับตัวทำละลายคลอรีเนเต็ดอินทรีย์ (Chlorinated Organic Solvents) ให้อาศัยความสัมพันธ์ของ Pseudo First-Order Kinetics ซึ่งการลดลงของเตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) และไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene: TCE) ด้วย ZVI เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน (Chen และคณะ, 2001; Clark และคณะ, 2003) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการกำจัด 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethane) โดยดูการเปลี่ยนไปเป็น 1,1-Dichloroethane และ Chloroethane ตามลำดับ (Lookman และคณะ, 2004)

1.2) สารประกอบสีย้อม (Dye Compounds) สีย้อมส่วนใหญ่จะปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Textile Wastewater) เช่น Orange I Acid Orange II Acid Blue 113 Allura Red เป็นต้น กระบวนการลดสี (Decolorize) ด้วย ZVI ได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกลไกที่เกิดคือการทำลายพันธะการเกิดสี (Azo Bond) หรือพันธะ N=N การทำลายพันธะนี้ถือเป็นการกำจัดสี อนุภาคของ ZVI จะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) ส่วนโมเลกุลของสีจะถูกรีดิวซ์ (Reduced) (Nam และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 2010) แต่มีบางงานวิจัยที่กล่าวว่า การลดลงของสีเกิดจากกระบวนการ ดูดซับบนพื้นผิวของเหล็ก (Cao และคณะ, 1999)

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียขึ้นด้วยวัสดุดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ดังนี้ ขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อมเมื่อละลายน้ำ โดยประจุลบในโมเลกุลจะดูดซับได้ดีที่ pH ต่ำ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายก็จะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับก็จะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในช่วงแรกนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วมาก เนื่องจาก Concentration Gradient ในสารละลายและพื้นที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมาก จึงทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้มาก แต่หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เนื่องจากที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่น้อยลงจากการดูดซับสีย้อมก่อนหน้านี้ไว้มาก การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลายจึงทำให้เกิดพื้นที่ที่ว่างมากขึ้น และอุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการดูดซับความร้อน และการเพิ่มอุณหภูมิก็ทำให้เกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้นแต่ในกระบวนการคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิก็จะทำให้การดูดซับลดลง (วรนิภา, 2559)

การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด และเปลือกข้าวโพดมาผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2:1, 1:1, และ 1:2 ที่อัตราส่วนผสมวัสดุเหลือทิ้งร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก อีกทั้งแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสมซึ่งต่อเปลือกข้าวโพด 20:80, 50:50 และ 80:20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมคืออัตราส่วนผสมวัสดุเหลือทิ้ง 20:80 ตัวประสานเชื้อเพลิง 1:2 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดย

น้ำหนักวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้ค่าความร้อนของแห้งเชื้อเพลิง 12.77 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ ความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิง 940 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล ร้อยละ 16.31 โดยมีเงินลงทุนเริ่มต้นของระบบ 203,000 บาท ค่าใช้จ่ายรายปี เท่ากับ 361,061 บาท ต่อปีให้ผลตอบแทนสุทธิ 58,984 บาทต่อปี และคืนทุนภายใน 3.44 ปี จะเห็นได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจาก ข้าวโพดมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิตติกร และคณะ, 2558)

การศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา การเตรียมถ่านกัมมันต์ทำโดยใช้ลูกยางนา 3 ส่วน ได้แก่ ปีก เปลือกนอกและเปลือกในโดยการกระตุ้น ทางเคมีด้วย $ZnCl_2$ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารเคมี 1:2 โดยน้ำหนักเผาด้วยอุณหภูมิ $500^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากส่วนของปีกมีพื้นที่ผิวสูงที่สุด $843\text{ m}^2/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.24 nm ซึ่งเป็นวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วน ใหญ่ การศึกษาการดูดซับใช้การดูดซับแบบกะโดยศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีน บลูและเวลาในการดูดซับ พบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นสามารถดูดซับได้มากขึ้นจนกระทั่ง เข้าสู่สมดุลที่เวลา 3 ชั่วโมงและผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับแสดงให้เห็นว่าสมการของแลง เมียร์สามารถอธิบายข้อมูลการดูดซับจากการทดลองได้ดี (มีค่า $R^2 = 0.981$) โดยมีปริมาณการดูดซับ สูงสุด 269.3 mg/g ดังนั้น ลูกยางนาจึงเป็นวัตถุดิบที่ดีในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มี ความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ (ยุวรัตน์ และคณะ, 2563)

การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดเมโทรนิดาโซล (Metronidazole, MNZ) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันที่มีถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Magnetic Biochar) เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้นเมโทรนิดาโซล เริ่มต้นค่าพีเอชและระยะเวลาการบำบัด ผลการทดลองพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมต่อลิตรความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรค่าพีเอชเท่ากับ 6 สามารถ บำบัดเมโทรนิดาโซลได้ร้อยละ 96 ที่ระยะเวลาบำบัด 120 นาทีซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโอ โซนเนชันเพียงอย่างเดียวที่สภาวะเดียวกันพบว่า สามารถบำบัดเมโทรนิดาโซลได้เพียงร้อยละ 75 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งการสลายตัวของโอโซนให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl Radical) ซึ่งมีศักยภาพในการออกซิไดซ์ได้ดีกว่าโอโซนการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวภาพ แม่เหล็กกลับมาใช้ซ้ำพบว่าสามารถนำมาใช้ได้อย่างน้อย 5 ครั้งโดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง จากร้อยละ 96 เป็นร้อยละ 87 และปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าเท่ากับ 83 ไมโครกรัมต่อ ลิตรการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาพบว่า การบำบัดเมโทรนิดาโซลด้วยกระบวนการโอ โซนเนชันและกระบวนการโอโซนเนชันที่มีถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยา อันดับหนึ่งเทียมโดยมีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับ 0.0116 และที่อัตราเร็วของ 0.0267 ต่อเวลาที่ตามลำดับ (ศศิธร, 2564) การศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกไข่ผสมเปลือก หอยแครงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภค โดยการกระตุ้นทางเคมีงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มี ผลต่อสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ความพรุนสูง

จากเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครงซึ่งได้แก่ อุณหภูมิจ และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเปลือกไข่ผสมเปลือกหอยแครง ทั้งนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีเมทิลเรดที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ เวลาในการดูดซับ ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายและชนิดของถ่านกัมมันต์ (วิรัชรอง, 2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น Bluestar B ยี่ห้อ Lab Tech ประเทศไทย
- 2) เครื่องวัดหาปริมาณธาตุโดยใช้เทคนิครังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ Bruker AXS ประเทศเยอรมนี
- 3) เครื่องวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker AXS ประเทศเยอรมนี
- 4) เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O (Electron Analyzer with Thermal Conductivity Detector) รุ่น Flash Smart ยี่ห้อ FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 5) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer ประเทศญี่ปุ่น
- 6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น Quanta 250 ยี่ห้อ FEI ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 7) เครื่องเขย่าสารละลาย (Compact Shaking Incubator) รุ่น JSSI-100C ยี่ห้อ JSR สาธารณรัฐเกาหลี
- 8) เครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Centrifuge) รุ่น TD4-2 ยี่ห้อ Medspin Centrifuge ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 9) เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH Meter) รุ่น EFP20 ยี่ห้อ FiveEasy Plus ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 10) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 11) เครื่องกรองลดความดัน (Filter Pressure) รุ่น Aspirator A-3S ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
- 12) ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Oven) รุ่น UM 400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
- 13) ตู้ดูดควัน (Hood) ยี่ห้อ Bosstech รุ่น FH120/2005SE-PP ประเทศเยอรมนี
- 14) เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
- 15) ตะแกรงร่อน (Sieved) 20 mesh มาตรฐาน ASTM 11 ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
- 17) กระดาษกรอง (Filter Paper) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
- 18) กรวยกรองบุชเนอร์ (Buncher Funnel)
- 19) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 20) ขวดน้ำกลั่น (Wash Bottle)
- 21) เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 สารเคมี

- 1) สีย้อมไดเรกต์เรด 81 ($C_{29}H_{19}N_5Na_2O_8S_2$) Dye Content 50% บริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Iron (II) Sulphate 7-Hydrate) AR Grade บริษัท Kemaus ประเทศออสเตรเลีย
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
- 4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba สาธารณรัฐฝรั่งเศส
- 5) โซเดียมโบโมไฮไดรด์ ($NaBH_4$) AR Grade บริษัท S D Fine-Chem Limited ประเทศอินเดีย
- 6) เอทานอล (C_2H_5OH) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศไทย
- 7) กรดไนตริก (HNO_3) AR Grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
- 8) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) AR Grade บริษัท Carlo Erba สาธารณรัฐอิตาลี
- 9) สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) AR Grade บริษัท QReC ประเทศนิวซีแลนด์
- 10) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) AR Grade บริษัท POCH สาธารณรัฐโปแลนด์
- 11) น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized Water)
- 12) ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- 13) เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($FeH_8N_2O_8S_2$) AR Grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเรกต์เรด 81 (Direct Red 81)

ซึ้งสีย้อมไดเรกต์เรด 81 (Direct Red 81) มา 2 กรัม ละลายสีย้อมด้วยน้ำกลั่นและเจือจางในขวดวัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเจือจางให้มีความเข้มข้นตามต้องการ

3.2.2 การเตรียมถ่านชีวภาพ (BC)

1) ล้างแกนข้าวโพดด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาด และนำไปตากแดดให้แห้ง

2) นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เือกสารนี้เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่อุณหภูมิห้อง ล้างเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) บดถ่านให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh อบต่อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.2.3 การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีโบโรไฮไดรไรต์ริงค์ซัน (Ma และคณะ, 2020; Ahmad และคณะ, 2019)

- 1) เตรียม 1 M FeSO_4 ในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 2) เติมถ่านชีวภาพปริมาณ 50 กรัมลงในบีกเกอร์ข้อที่ 1 และกวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- 3) หลังจากนั้นไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงพร้อมการปั่นกวน
- 4) เติม 2 M NaBH_4 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยการเติมทีละหยด ภายใต้สภาวะมีไนโตรเจนพร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 5) หยุดการเติมก๊าซไนโตรเจน ทิ้งไว้ข้ามคืนโดยปิดพาราฟิล์มไว้
- 6) นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอนและล้างด้วยเอทานอลเพื่อกำจัดซัลเฟต แล้วนำไปอบในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 7) ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง ข้อที่ 1)-6)

3.2.4 การศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (MBC)

- 1) วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดย Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนพื้นที่ผิวโดย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) Perkin Elmer Model Spectrum GX
- 3) วิเคราะห์ค่า Point of Zero Charge โดยวิธี pH Drift Method
- 4) วิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดย X-ray Diffractometer (XRD)
- 5) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ โดย X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- 6) วิเคราะห์ CHNS/O โดย Electron Analyzer with Thermal Conductivity Detector

3.2.5 การวิเคราะห์ค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดยวิธี pH Drift Method (ปรับปรุงจากวิธีของ Khanal และคณะ, 2020)

- 1) เตรียม 0.01 M NaCl 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 10 ใบ
- 2) ชั่งถ่าน 0.30 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
- 3) ปรับ pH สารละลายให้เป็น 2-12 โดยเติม 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH เรียกว่า pH เริ่มต้น
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH ด้วยเครื่อง pH จะได้ค่า pH สุดท้าย
- 5) นำค่า pH ที่บันทึกไว้ ไปใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้น และ pH สุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

- 1) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 2) ชั่งถ่านชีวภาพแม่เหล็กในปริมาณที่ต้องการศึกษา
- 3) ปรับ pH ของสารละลาย ด้วย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ให้ได้ค่าตามที่กำหนด
- 4) เขย่าด้วยความถี่ 120 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่กำหนด
- 5) นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
- 6) สภาวะที่ทำการทดลองเป็นดังตาราง

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ทำการทดลอง

ชุดการทดลอง	สภาวะที่ทำการทดลอง	หมายเหตุ
การทดลองชุดที่ 1 pH ของสารละลายเริ่มต้น 2, 3, 4, 5, 7, 9	ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 10 มิลลิกรัม/ ลิตร ปริมาณ MBC 6 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 180 นาที	วัดความเข้มข้นของสี
การทดลองชุดที่ 2 ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10, 300, 500 มิลลิกรัม/ ลิตร	pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 ปริมาณ MBC 6 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 180 นาที	วัดความเข้มข้นของสี ข้อมูลใช้ศึกษาไอโซเทอม
การทดลองชุดที่ 3 ปริมาณ MBC 0, 3, 6, 9, 12 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 0, 15, 30, 60, 90, 150, 180 นาที	pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 300 มิลลิกรัม ต่อลิตร	วัดความเข้มข้นของสี ข้อมูลใช้ศึกษา แบบจำลองการดูดซับ Pseudo-First Order, Pseudo-Second Order
การทดลองชุดที่ 4 อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 45°C, 50°C	ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 300 มิลลิกรัม/ ลิตร pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1	วัดความเข้มข้นของสี ให้วัดค่า COD

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการ
 อนุญาตใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้
 ใดๆ ทั้งสิ้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ใดๆ ทั้งสิ้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ใดๆ ทั้งสิ้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

	ปริมาณ MBC ที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 3 เวลาในการบำบัด 180 นาที	ข้อมูลใช้ศึกษาอุณหพลศาสตร์
--	---	----------------------------

3.2.7 การคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกส์ ไอโซเทอมการดูดซับ

Isotherm	Linear Equation
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L \cdot q_m}$ $R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}$
Freundlich	$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$
Tempkin	$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e$
Dubinin-Radushkevich	$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} \left[RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \right]^2$ $E = \frac{1}{\sqrt{2K_{DR}}}$
อัตราเร็วในการดูดซับ	
The Pseudo-First Order	$\log q_e - q_t = \log q_e - k_1 \frac{t}{2.303}$
The Pseudo-Second Order	$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$
เทอร์โมไดนามิกส์	
$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 = -RT \ln K_c$	
$K_c = \frac{q_e}{C_e}$	
$\ln K_c = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT}$	

q_t = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)

q_e = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_t = ความเข้มข้นของสีในสารละลาย ณ เวลา t (mg/L)

C_0 = ความเข้มข้นของสีในสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสีในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

V = ปริมาตรสารละลาย (L)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- W = มวลของตัวดูดซับ (g)
 q_m = ปริมาณสีที่ดูดซับสูงสุดต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ (mg/g)
 K_L = ค่าคงที่แลงเมียร์ (L/mg)
 R_L = ปัจจัยการแยกแบบไร้มิติหรือพารามิเตอร์สมดุล
 K_f = ปัจจัยการแยกแบบไร้มิติหรือพารามิเตอร์สมดุล (L/g)
 $1/n$ = ค่าที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นการดูดซับ
 A = ค่าคงที่ไอโซเทอร์ม Temkin (L/g) ที่สอดคล้องกับพลังงานการจับสูงสุด
 b_0 = ค่าคงที่ Temkin ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 q_D = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 K_{DR} = ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระเฉลี่ยของการดูดซับต่อโมลของตัวดูดซับ (mol^2/kJ^2)
 E = พลังงานดูดซับเฉลี่ย (kJ/mol) ของตัวดูดซับ
 k_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (1/min).
 k_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับการดูดซับอันดับสองเทียม (g/mg.min)
 K_{id} = ค่าคงที่อัตราการแพร่ในอนุภาค ($\text{mg/g min}^{1/2}$)
 K_c = ค่าคงที่สมดุลสะท้อนความสามารถในการดูดซับเพื่อให้ตัวดูดซับและขยายการเคลื่อนไหวของตัวดูดซับภายในสารละลาย

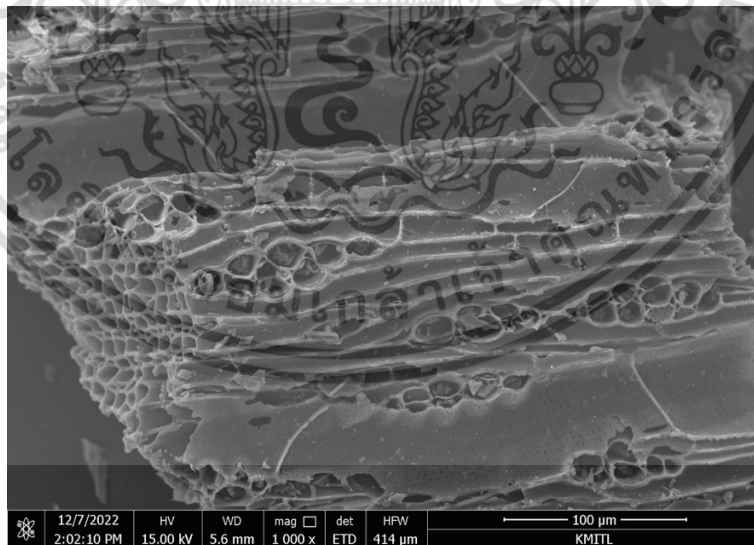
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มีขั้นตอนในการศึกษาคือ ศึกษาถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิว วิเคราะห์องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชัน การศึกษาความยาวคลื่นให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 การศึกษาการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พีเอช ปริมาณของถ่านชีวภาพ เวลาในการบำบัด ความเข้มข้นของน้ำเสีย และอุณหภูมิในการบำบัด โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 และนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา และเทอร์โมไดนามิกส์ ผลการทดลองการศึกษาเป็นดังนี้

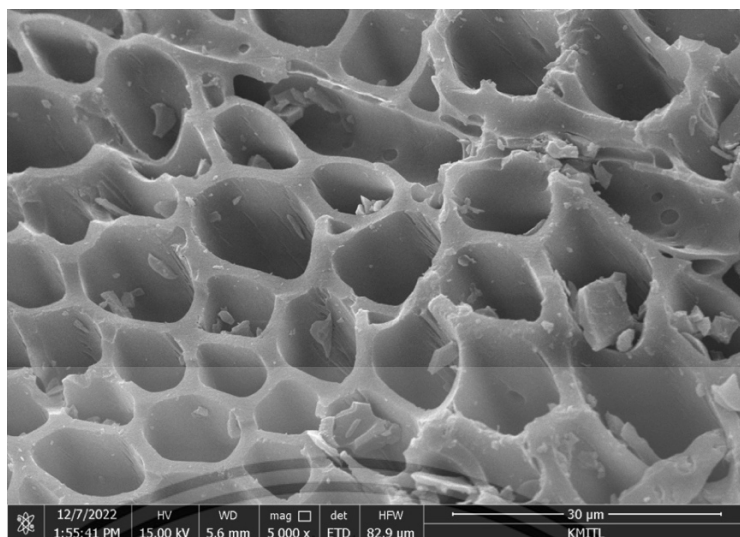
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

นำถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการถ่ายภาพพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ, ถ่านชีวภาพแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



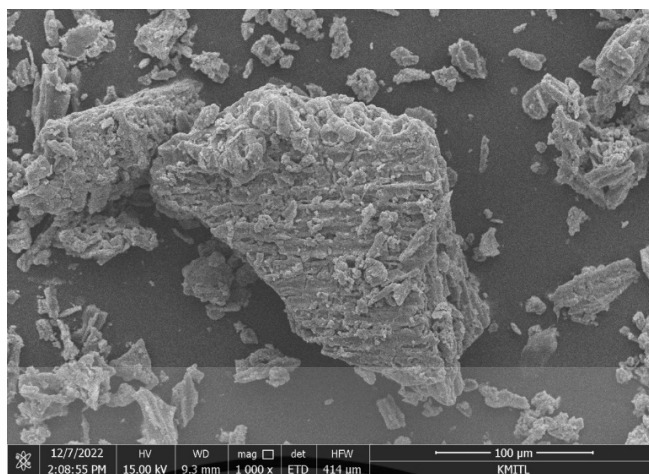
(b)



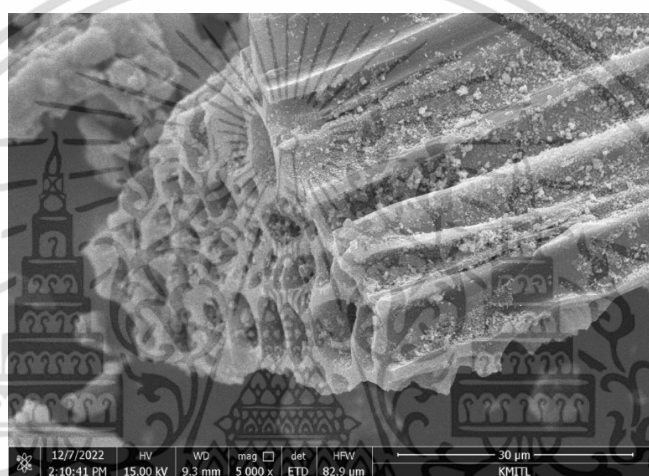
(c)

- รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
- (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 1000 เท่า
- (b) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 5000 เท่า
- (c) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 10000 เท่า

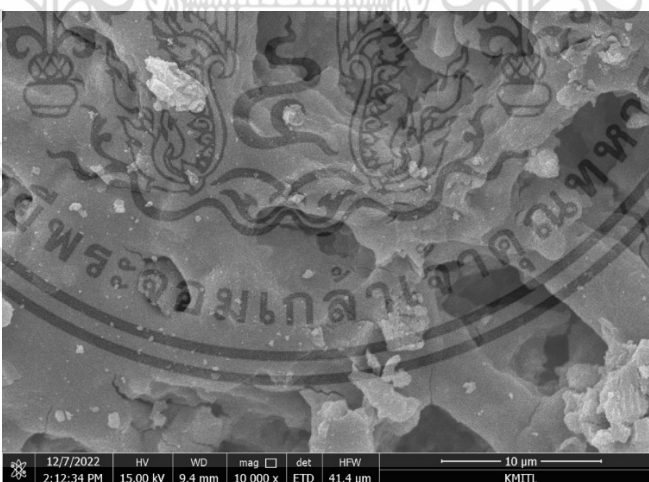
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

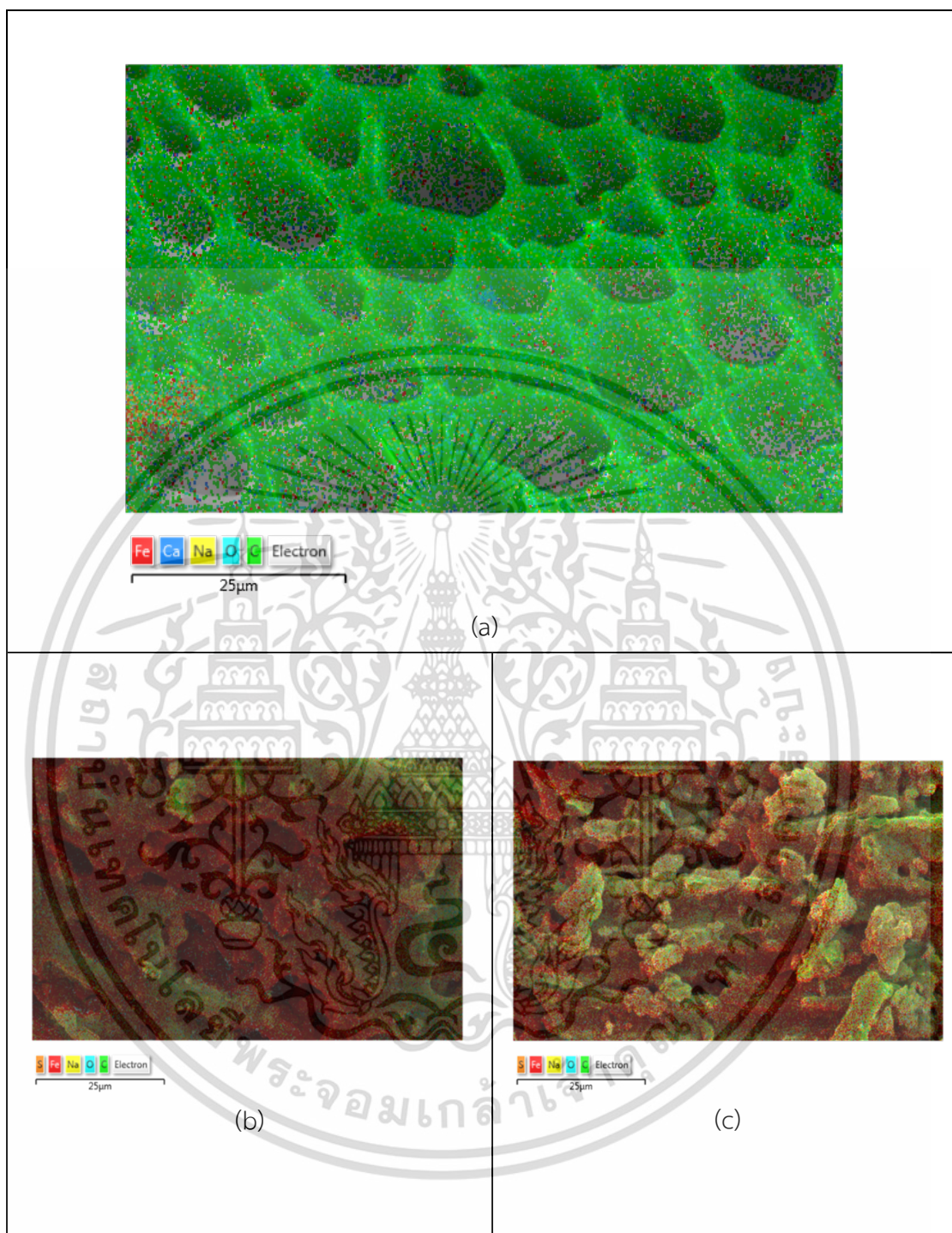
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก

(a) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก กำลังขยาย 1000 เท่า

(b) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก กำลังขยาย 5000 เท่า

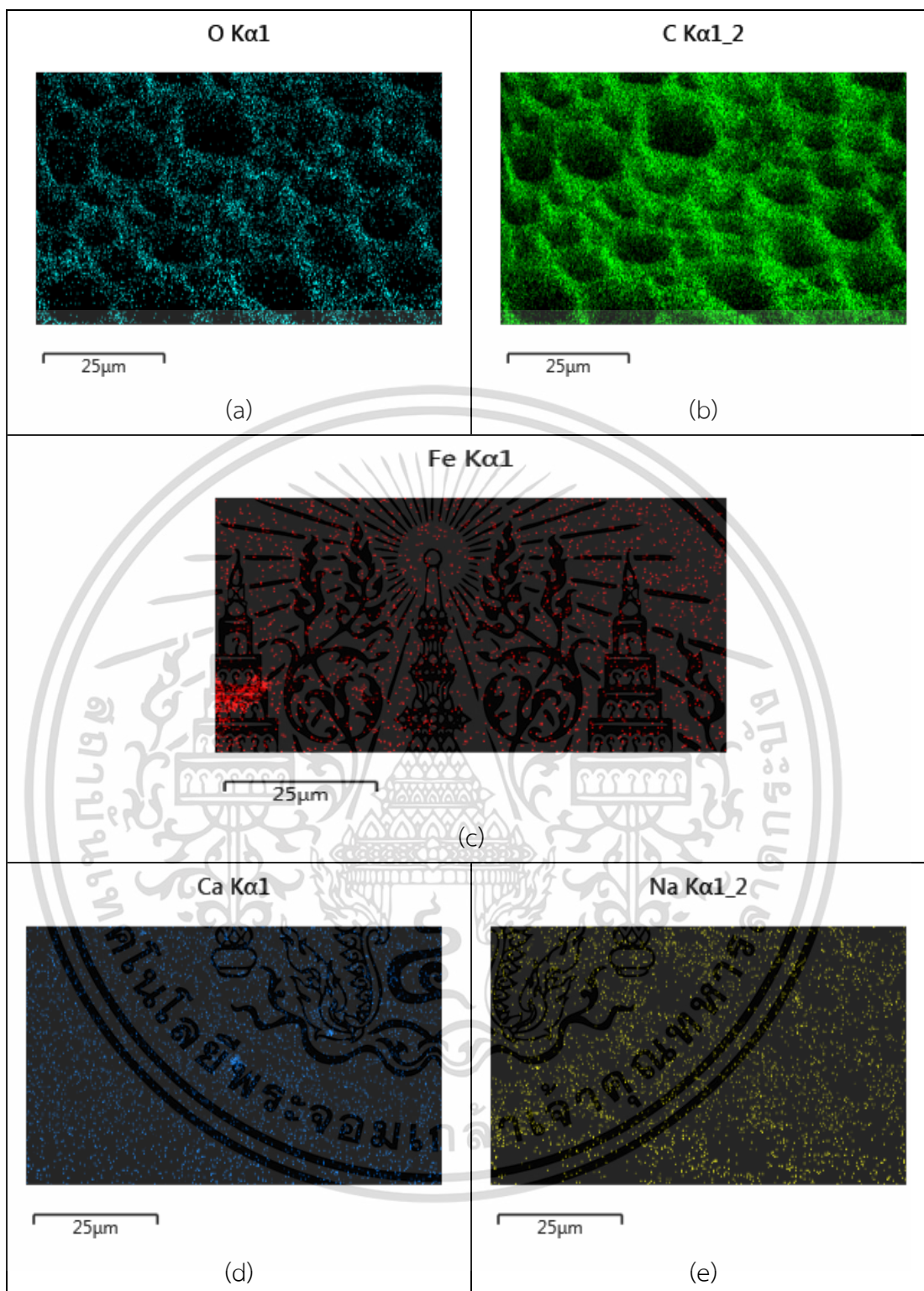
เอกสารนี้ (c) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก กำลังขยาย 10000 เท่า ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



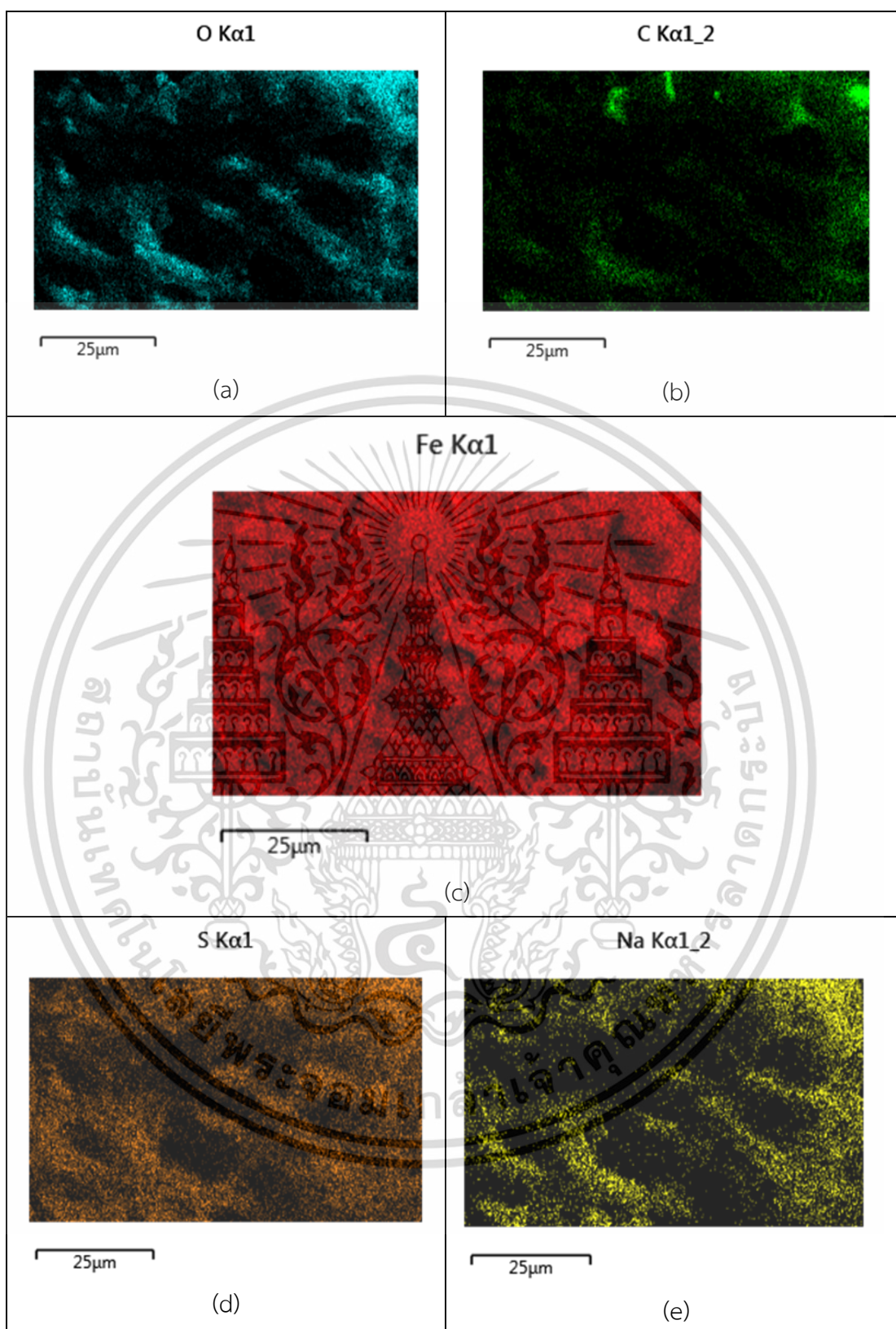
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย EDS ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



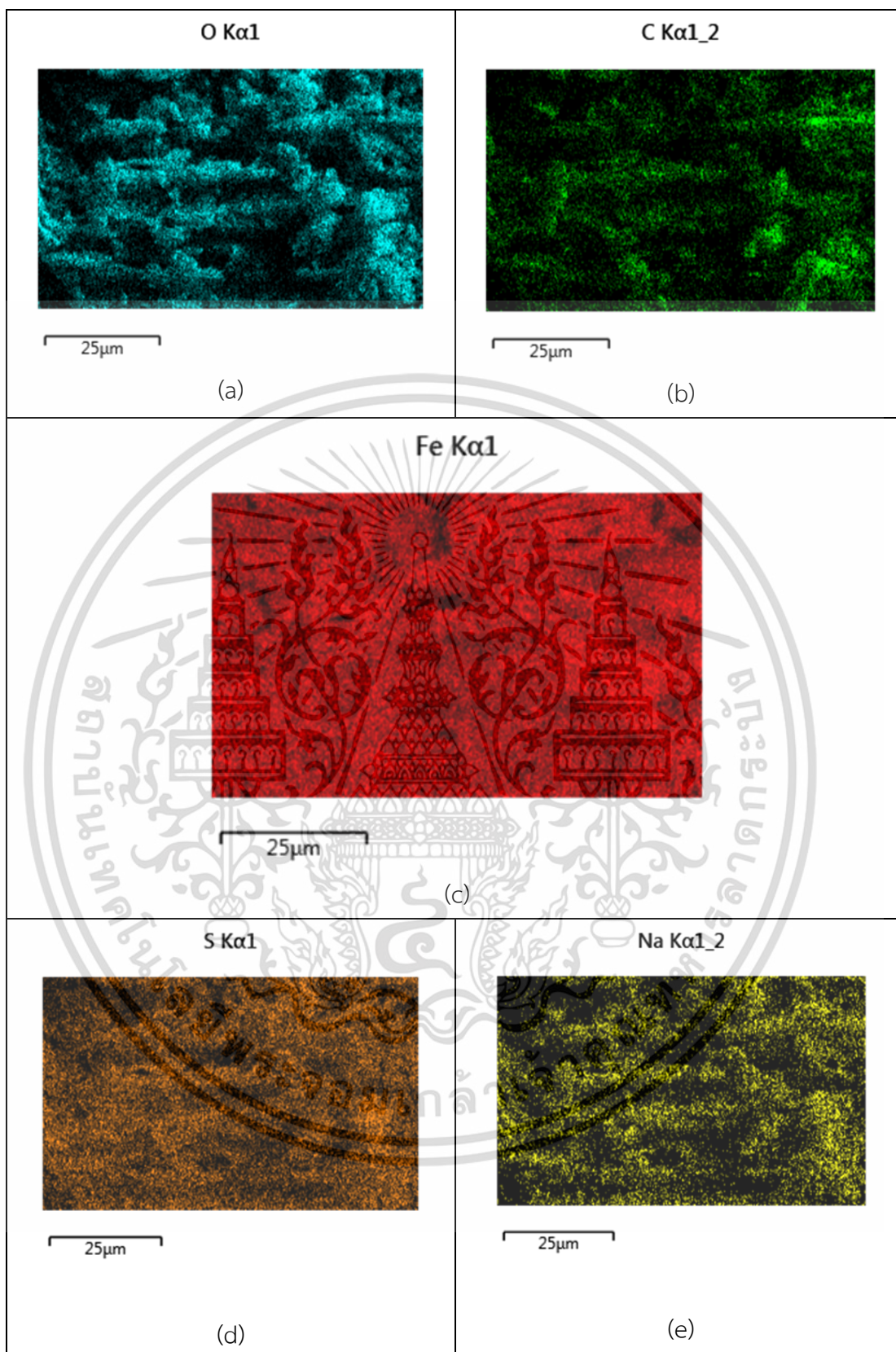
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆบนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) Ca และ (e) Na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 1 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆ บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

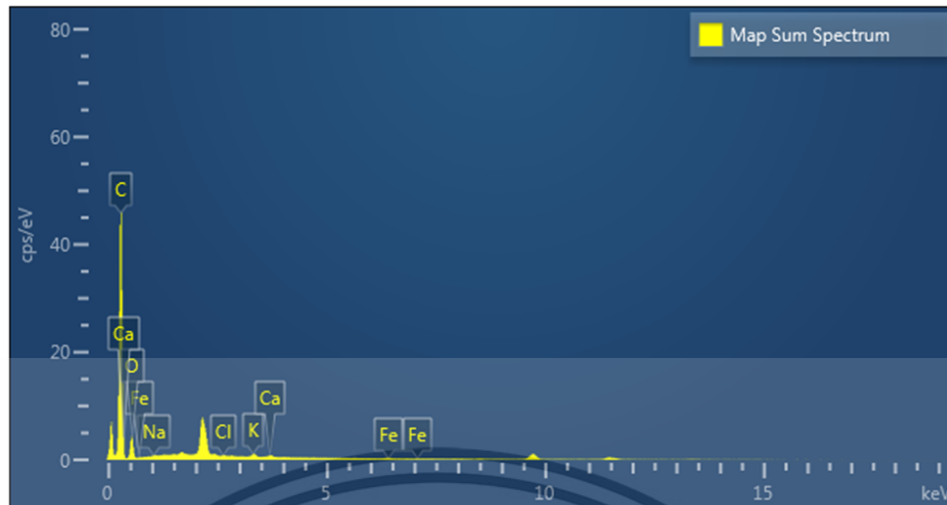


รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 2 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆ

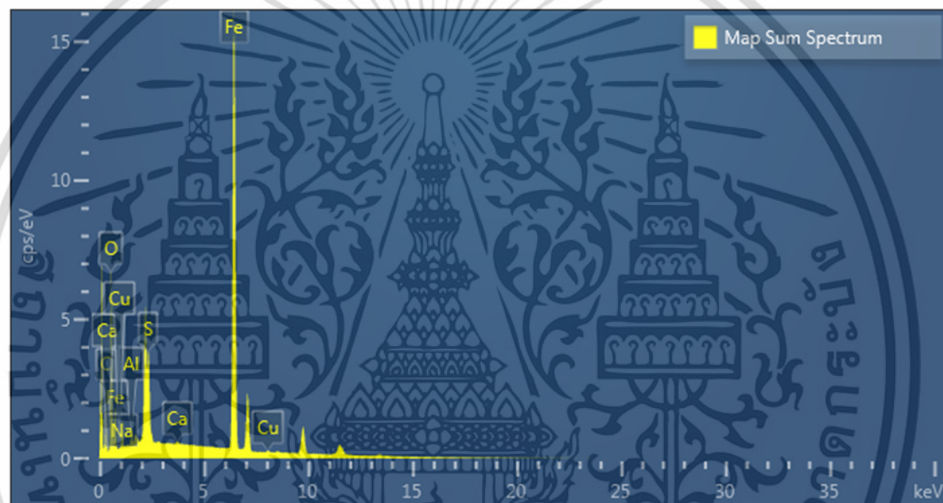
บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

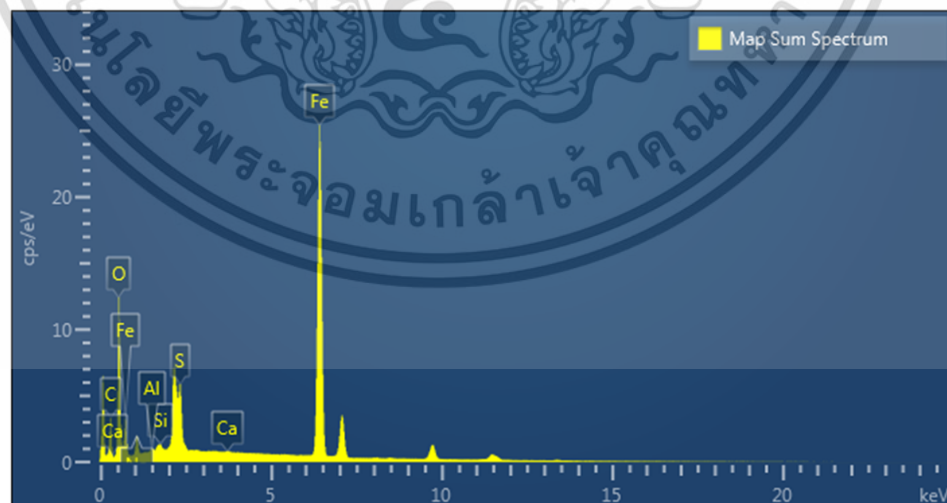
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



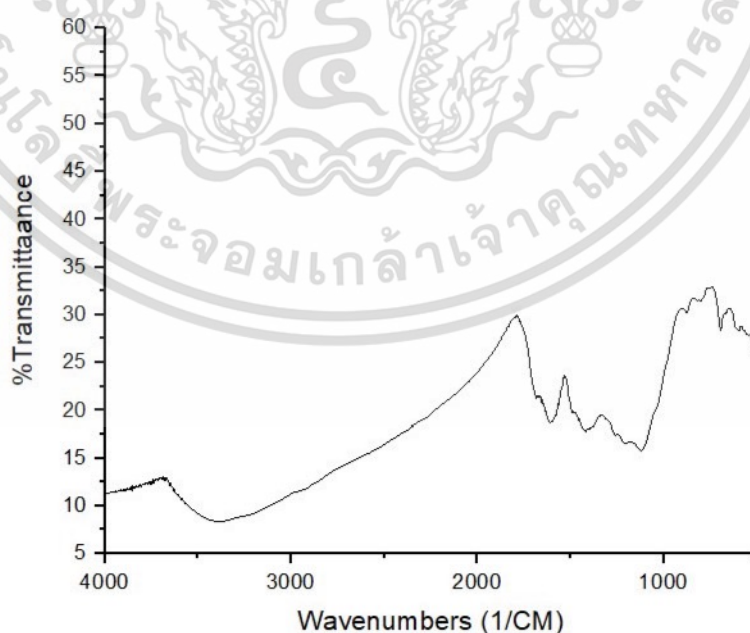
(c)

รูปที่ 4.7 Map Sum Spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่อาคารตั้งอยู่ที่นั่น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แม่เหล็กถ้ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ้ายจากจุดที่ 2
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะเห็นรูพรุนชัดเจนและมีลักษณะพื้นผิวขรุขระเพียงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.2 เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพแม่เหล็ก จะพบรูพรุนมีขนาดเล็กลงและพื้นผิวขรุขระมากขึ้น เมื่อถ่ายภาพด้วย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (รูปที่ 4.3a, 4.4 และ 4.7a) จะเห็นสีของธาตุคาร์บอนชัดเจน และธาตุเหล็กพบน้อยมาก มีค่า Map Sum Spectrum พบเปอร์เซ็นต์ปริมาณของธาตุที่มากที่สุด คือ คาร์บอนเท่ากับ 79.31% ปริมาณธาตุที่พบรองลงมา คือ ธาตุออกซิเจน เท่ากับ 19.77% และมีปริมาณธาตุเหล็กเพียง 0.19 % แต่เมื่อปรับปรุงคุณภาพแล้วจะเห็นว่าภาพถ่าย EDS ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กจุดที่ 1 กับจุดที่ 2 (รูปที่ 4.5 และ 4.6) จะเห็นสีของธาตุเหล็กชัดเจนมากกว่าสีของธาตุคาร์บอน ส่วนค่า Map Sum Spectrum ถ่านชีวภาพแม่เหล็กในจุดที่ 1 และจุดที่ 2 (รูปที่ 4.7b และ 4.7c) จะพบเปอร์เซ็นต์ปริมาณของธาตุเหล็กมากที่สุด เท่ากับ 46.73% และ 47.71% ตามลำดับ ปริมาณธาตุที่พบรองลงมา คือ ธาตุคาร์บอน เท่ากับ 23.75% และ 20.44 % ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ามีหลักฐานของแม่เหล็กวาเลนซ์ ศูนย์กระจายอยู่ทั่วและมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น

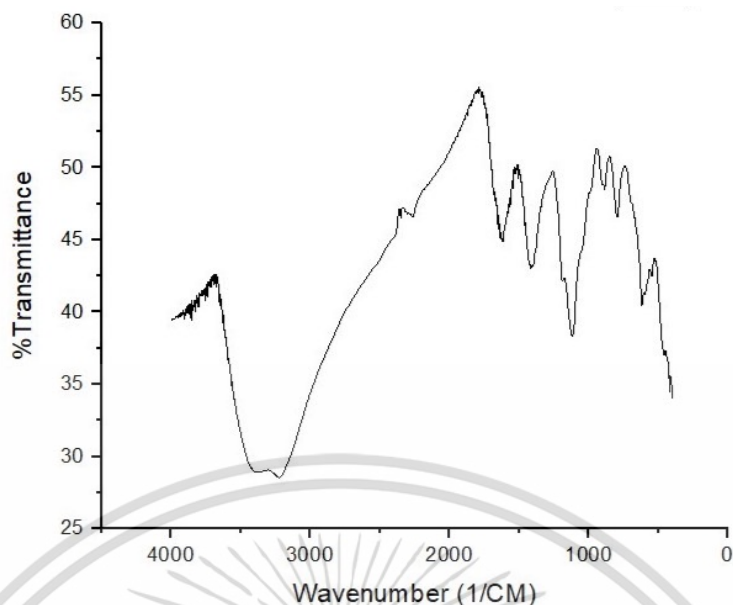
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

นำถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบสารโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 4.8



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.8 FT-IR spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

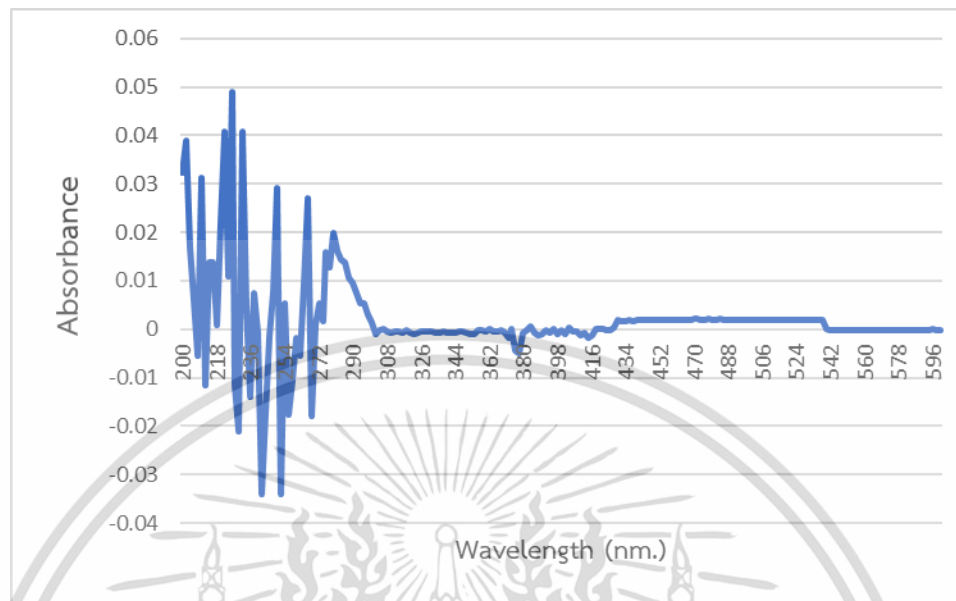
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Wavenumbers		หมู่ฟังก์ชัน
ก่อนสังเคราะห์	หลังสังเคราะห์	
3358.06	3406.28	O – H
1616.34	1614.41	C = O
1406.10	1402.24	C – H
1141.85	1126.42	C – O
-	619.14	Fe – O

จากสเปกตรัมของถ่านชีวภาพ พบว่ามีพีคปรากฏที่เลขคลื่น 3358.06, 1616.34, 1406.10, และ 1141.85 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของ O-H, C=O, C-H, C-O ตามลำดับซึ่งเกิดจากการที่ในโครงสร้างของถ่านมีเซลลูโลสอยู่และลิกนิน พบพีคที่เลขคลื่น 619.14 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการสั่นในช่วงของ Fe-O (Ying Liu และคณะ, 2560) ซึ่งไม่พบ Fe-O Stretching ในถ่านชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

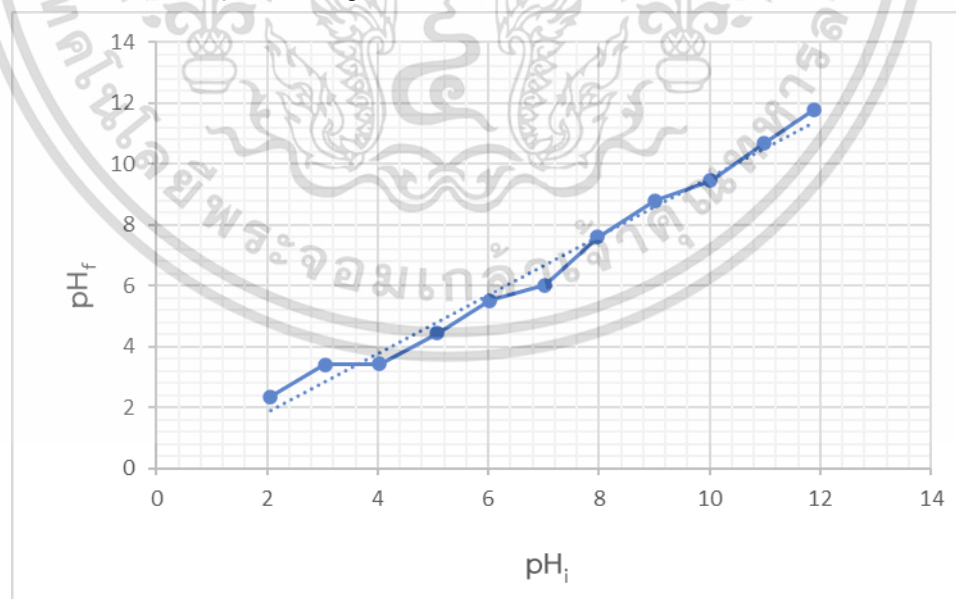
4.3 การศึกษาความยาวคลื่นที่ให้ค่าดูดกลืนแสงสูงที่สุดของน้ำเสียสังเคราะห์ สีย้อมไดเรกต์เรด 81



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าดูดกลืนแสงของ สีย้อมไดเรกต์เรด 81

จากการศึกษาความยาวคลื่นที่ให้ค่าดูดกลืนแสงสูงที่สุดของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเรกต์เรด 81 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 225 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.9

4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{PZC})



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{PZC}) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก

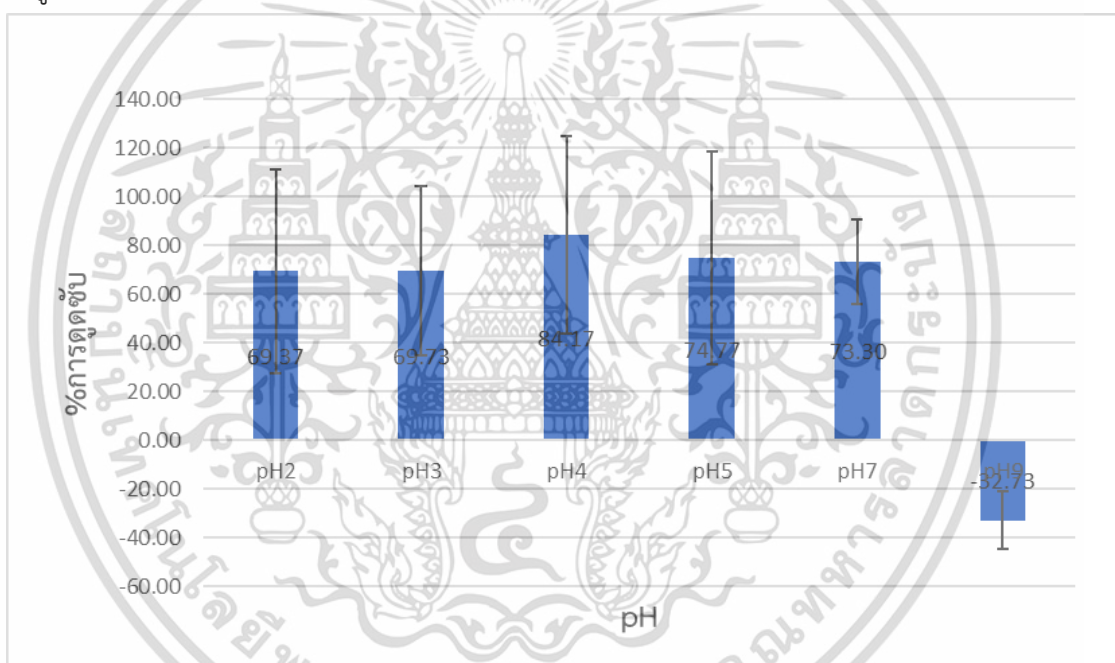
กราฟแสดงค่าสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) พบว่าประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กจะเป็นศูนย์เมื่อมีค่า pH เท่ากับ 8

เมื่อตัวดูดซับนี้อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นลบและในทางตรงข้าม ถ้าหากในสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นบวก

4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ผลต่อการดูดซับน้ำเสีย

4.5.1 อิทธิพลของค่า pH

การศึกษาผลของ pH ของสารละลายเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 6 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นตั้งแต่ pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7, และ 9 โดยใช้เวลาบำบัด 180 นาที หลังการทดลองวัดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัดและคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.11



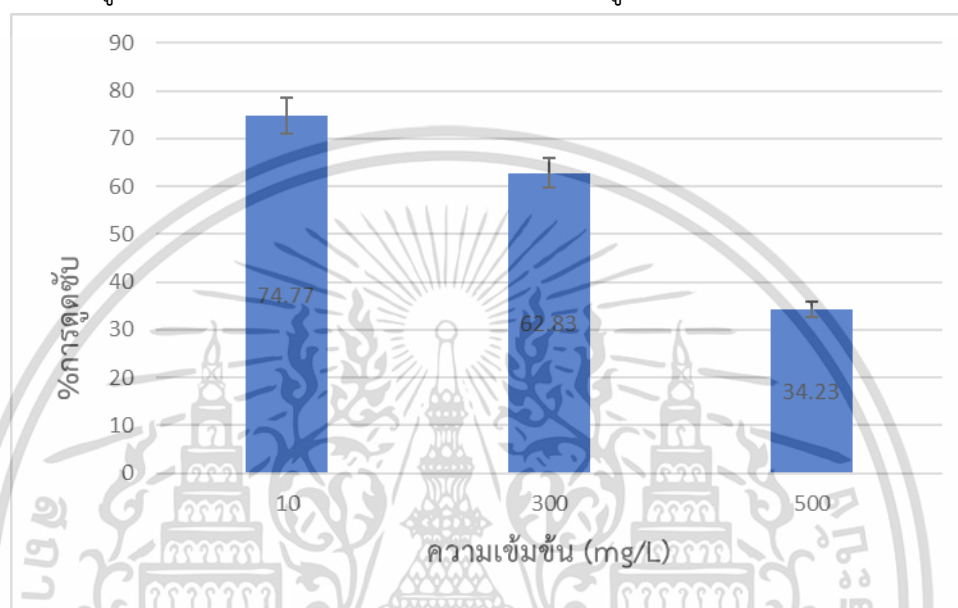
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์จาก pH 2 ถึง 7 ประสิทธิภาพการบำบัดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยยะสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อปรับ pH น้ำเสียให้มากกว่าค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างชัดเจนจนวัดประสิทธิภาพไม่ได้ชัดเจน ผู้วิจัยจึงเลือก pH 5 ในการศึกษาต่อไปเนื่องจากเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ต้องมีการปรับค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 6 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 5 เวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิห้องเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 เป็นดังนี้ 10, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ดังรูปที่ 4.12

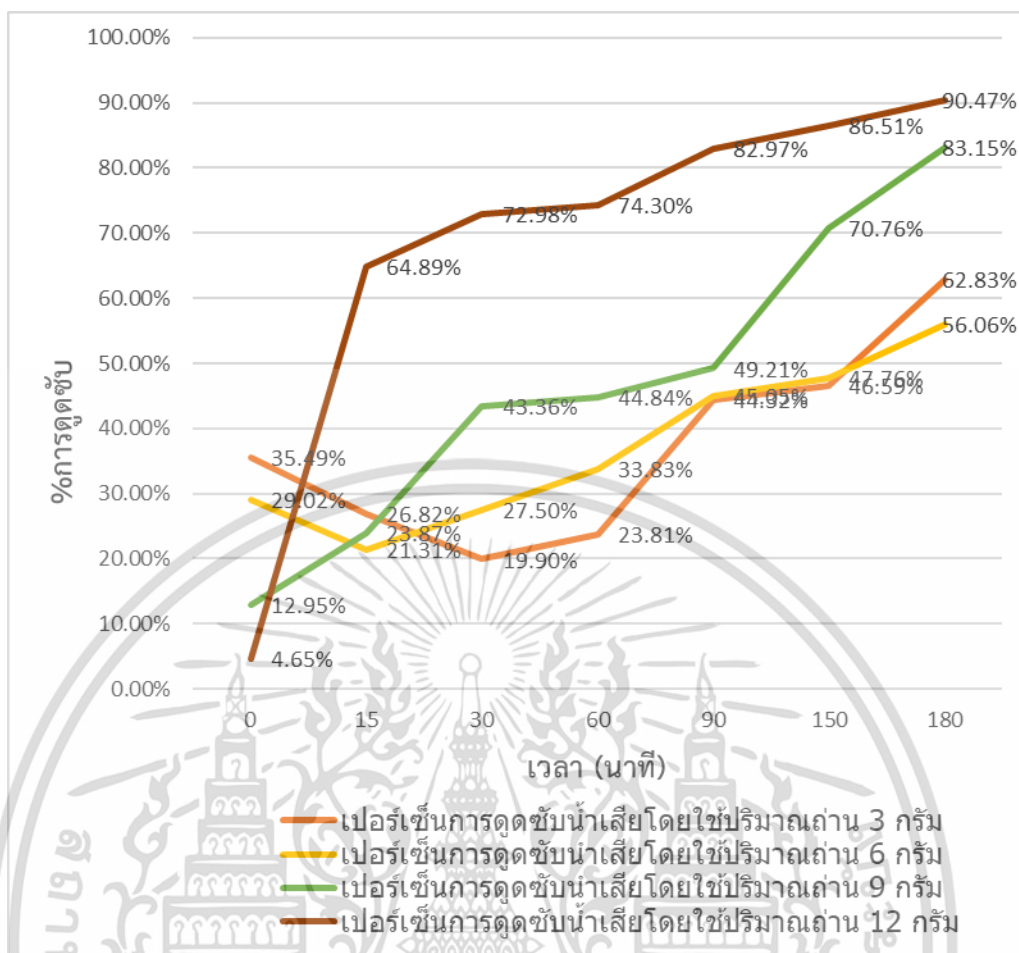


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียจะทำให้ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวในการดูดซับไม่เพียงพอ

4.5.3 อิทธิพลของปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก

การศึกษาผลของปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของสารละลายเท่ากับ 5 ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กดังนี้ 0, 3, 6, 9, และ 12 กรัมต่อลิตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ

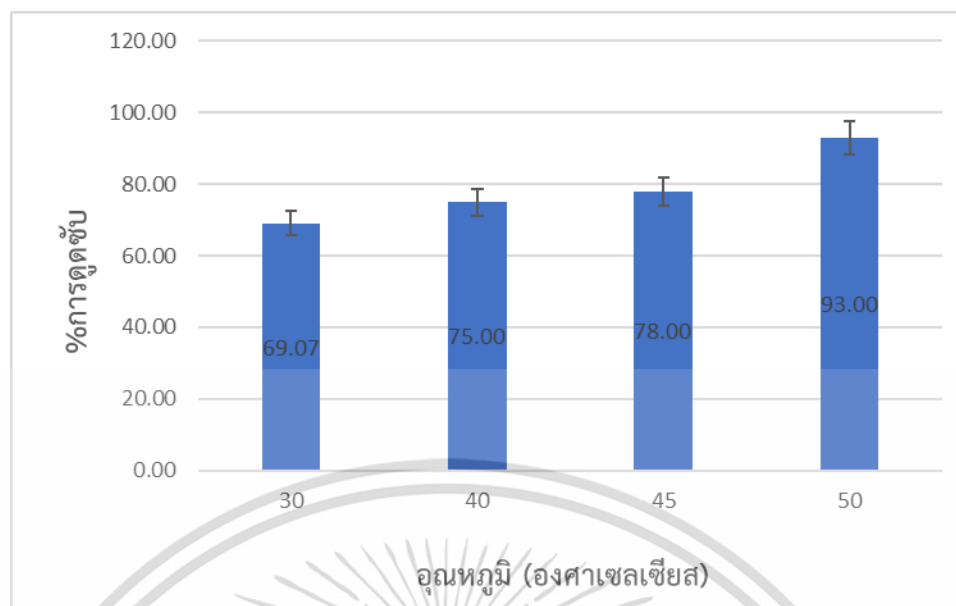
รูปที่ 4.13 จะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับในการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 81 ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 81 เท่ากับ 12 กรัมต่อลิตร ในระยะเวลาการบำบัดที่ 180 นาที เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ เท่ากับ 90.47 ซึ่งนำมาใช้ในการทดลองถัดไป ทั้งนี้หากเพิ่มเวลามากกว่า 180 นาทีอาจดูดซับได้เพิ่มขึ้นอีกแต่การใช้เวลานานเกินไปจะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่ไม่คุ้มค่า ผู้วิจัยจึงหยุดการทดลองที่ 180 นาที

4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 81

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 81 โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 12 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา 180 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเสียดังนี้ 30, 40, 45, และ 50 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับอุณหภูมิ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สภาวะ 30, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น การดูดซับเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากโมเลกุลของตัวดูดซับเคลื่อนที่เร็วขึ้น ชนกันมากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

4.6 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 ที่มีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการดูดซับใช้ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0, 3, 6, 9, และ 12 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของน้ำเสียเท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich ผลการคำนวณแสดงดังนี้

4.6.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m}$$

โดย C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

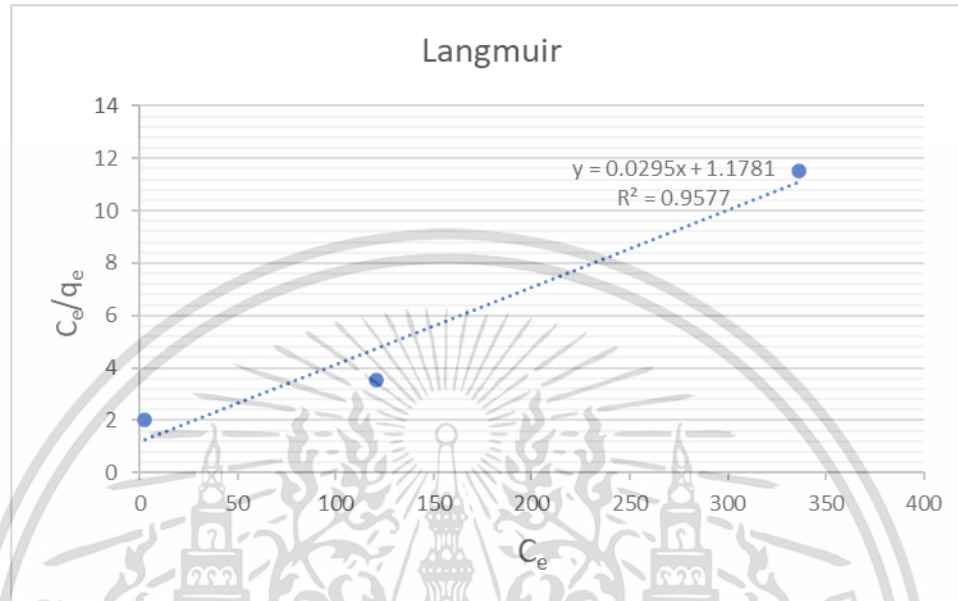
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

q_m = ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของ Langmuir (L/mg)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดังรูปที่

4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.0295 และจุดตัดแกน $y = 1.11781$ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_m) ค่าคงที่สมการ Langmuir (K_L) และค่า R_L ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+K_L C_0} \\ 0.0295 &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+(0.0250 \frac{L}{mg})(300 \frac{mg}{L})} \\ q_m &= 33.8983 & R_L &= 0.1176 \\ \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{1}{K_L q_m} \\ 1.1781 &= \frac{1}{K_L (33.8983)} \\ K_L &= 0.0250 \text{ L/mg} \end{aligned}$$

ค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับจะไม่ใช่แบบ Langmuir (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (favorable), และเมื่อ $R_L = 0$ การดูดซับจะเกิดการผันกลับไม่ได้ (Irreversible) จากการคำนวณพบว่าค่า R_L ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมไคโรซีนเรด 81 มีค่าเท่ากับ 0.1176 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า 0 และน้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นการดูดซับแบบ Langmuir (Favorable) และค่า (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9577 ซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้ 1 ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เอกสารนี้ที่สีย้อมไคโรซีนเรด 81 จะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ Langmuir และค่า q_m ในการดูดซับเท่ากับ 33.8983 mg/g ซึ่งต่ำกว่าค่า q_m ที่กำหนดไว้ที่ 29.8507 mg/g ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 สมการการดูดซับของ Freundlich

สมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) พื้นผิวตัวดูดซับขรุขระ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งกลไกทางกายภาพและทางเคมี การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น พื้นผิวและพลังงานในการดูดซับจะมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียที่สภาวะสมดุล

สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

โดย K_f = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (L/g)

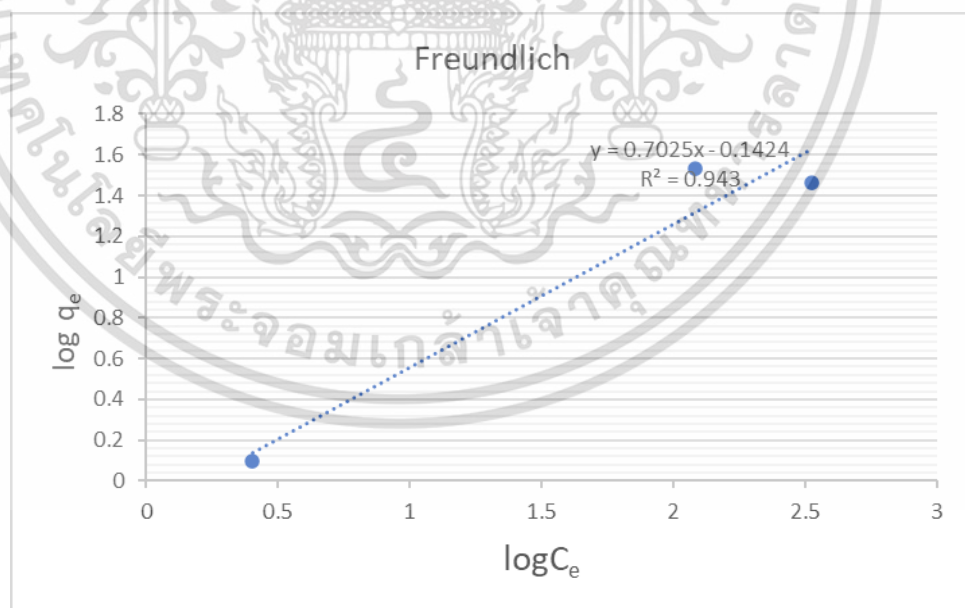
$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่

4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.7025 และจุดตัดแกน $y = -0.1424$ สามารถนำไปหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_f ได้ดังนี้

ความชัน	=	$\frac{1}{n}$		จุดตัดแกน y	=	$\log K_f$
0.7025	=	$\frac{1}{n}$		-0.1424	=	$\log K_f$
n	=	1.4235		K_f	=	$10^{-0.1424} \text{ L/g}$
					=	0.7204 L/g

ค่าที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (K_f) ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็กเท่ากับ 0.7204 L/g ความชัน $1/n = 1$ ไอโซเทอมการดูดซับเป็นเส้นตรง ค่า $1/n > 1$ คือบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่ใช้ในการดูดซับและ $1/n < 1$ คือบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่ใช้ในการดูดซับ ดังนั้นจากผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ($1/n$) ของการดูดซับถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็น 0.7025 แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับที่จำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

4.6.3 สมการการดูดซับของ Temkin

สมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ในการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ มีสมมติฐานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (Adsorbent-Adsorbate Interactions)

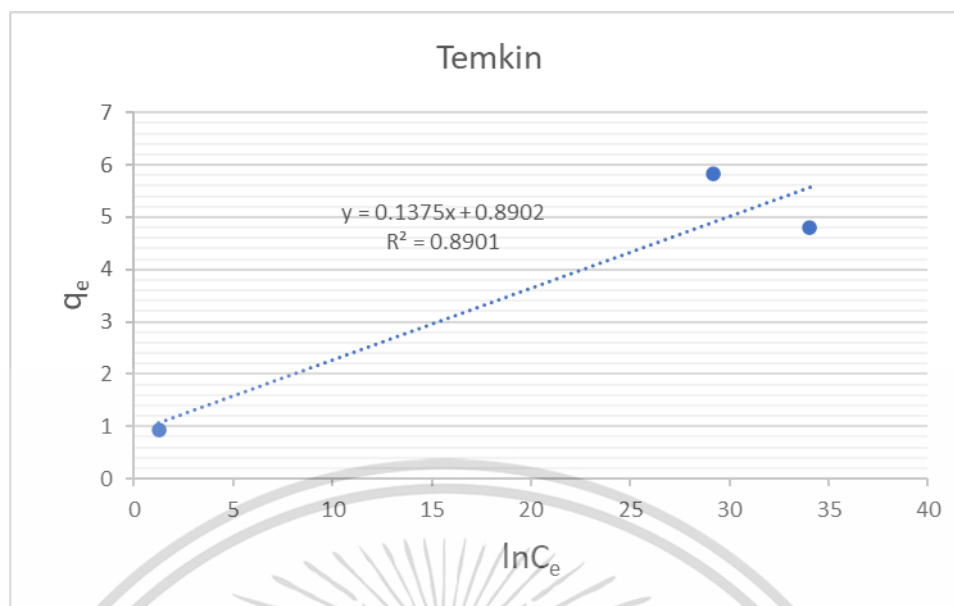
สมการการดูดซับของ Temkin

$$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e$$

- โดย b_0 = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)
 A = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (Maximum Binding Energy)
 q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Temkin และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 81 จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.1375 และจุดตัดแกน $y = 0.8902$ ค่าความสามารถหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_f ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ 0.1375 &= \frac{RT}{b_0} & 0.8902 &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ b_0 &= 18.321 \text{ KJ/mol} & \ln A &= \frac{(0.8902)(18.321)}{(8.314)(303)} \\ & & \ln A &= 0.0065 \\ & & A &= 1.00652 \end{aligned}$$

สมการ Temkin สามารถนำมาอธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับได้ โดยที่หาก $b_0 > 80$ KJ/mol แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาเคมี จากการคำนวณพบว่าค่า b_0 ของการดูดซับของถ่านชีวภาพเท่ากับ 18.321 KJ/mol ดังนั้นการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 81 โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กจึงเป็นการดูดซับทางกายภาพ

4.6.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือกายภาพที่เกิดบนผิวตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

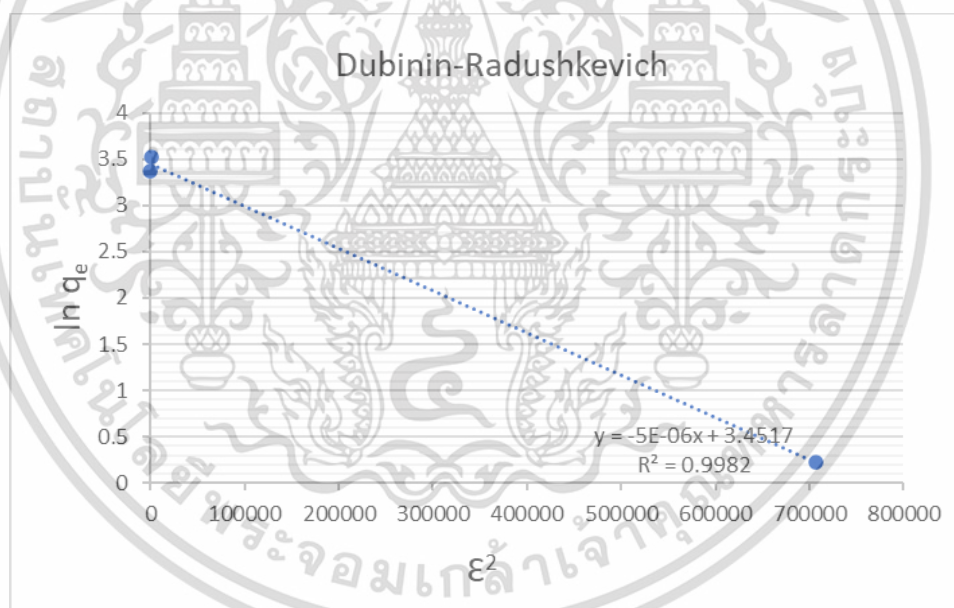
สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} [RT \ln(1 + (C_e))]^2$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย q_D = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
 K_{DR} = ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระเฉลี่ยของการดูดซับต่อโมลของตัวดูดซับ (mol^2/kJ^2)
 q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 E = $[RT \ln(1 + 1(C_e))]$
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 81

จากกราฟจะได้ความชัน = $K_{DR} = 5 \times 10^{-6}$ หาค่า $E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$ และจุดตัดแกน $y = \ln q_D = 3.4517$ mg/g

$$E = 1/(2K_{DR})^{1/2} \quad \text{จุดตัดแกน } Y = \ln q_D$$

$$E = 1/(2 \times 5 \times 10^{-6})^{1/2} \quad \ln q_e = 3.4517$$

$$E = 0.316 \text{ KJ/mol} \quad q_e = 31.5540$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณพลังงานอิสระจากไอโซเทอมการดูดซับของ D-R เมื่อได้ค่า E ระหว่าง 8-16 KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ $E < 8$ KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อ $E > 16$ KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับ Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81 มีค่าเท่ากับ 0.7778 ค่า E ของการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81 มีค่า 0.316 KJ/mol ซึ่งน้อยกว่า 8 KJ/mol จึงชี้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพและค่า q_D ของการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81 เท่ากับ 31.5540 mg/g สอดคล้องกับสมการ Langmuir

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

Langmuir Isotherm		Dubinin-Radushkevich Isotherm	
q_m (mg/g)	33.8983	K_{DR}	5×10^{-6}
K_L (L/mg)	0.0250	q_D (mg/g)	31.5540
R_L	0.1176	E (kJ/mol)	0.316
R^2	0.9577	R^2	0.9982
Freundlich Isotherm		Temkin Isotherm	
K_f	0.7204	b_0 (kJ/mol)	18.321
$1/n$	0.7025	A	1.00652
R^2	0.943	R^2	0.8901

จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) จากตารางพบว่า สมการแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ Dubinin-Radushkevich มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9577 และ 0.9982 แสดงว่าการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นการดูดซับแบบ Langmuir และ Dubinin-Radushkevich ซึ่งเป็นแบบจำลองการดูดซับว่าแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันจะไม่มีแรงกระทำระหว่างกันหรือไม่มีปฏิกริยาต่อกัน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเกิดการย้ายตำแหน่งของการดูดซับ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะมีจำนวนแน่นอน การดูดซับจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่แน่นอน การดูดซับจะเกิดเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่สามารถดูดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีสีย้อมไดเรกต์เรด 81 สูงสุดอยู่ที่ 33.8983 mg/g และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

4.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเรกต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

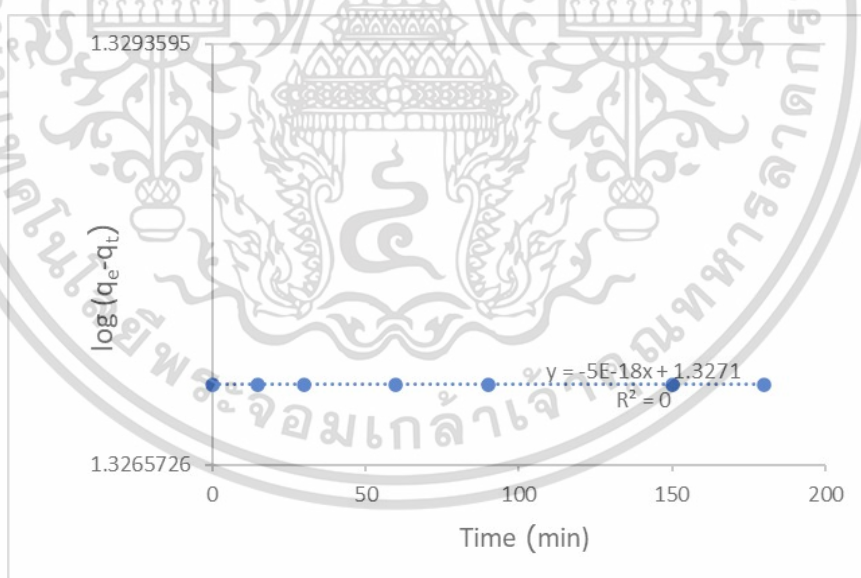
4.7.1 แบบจำลองดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Model)

สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

$$\log q_e - q_t = \log q_e - \left(\frac{K_1}{2.303}\right)t$$

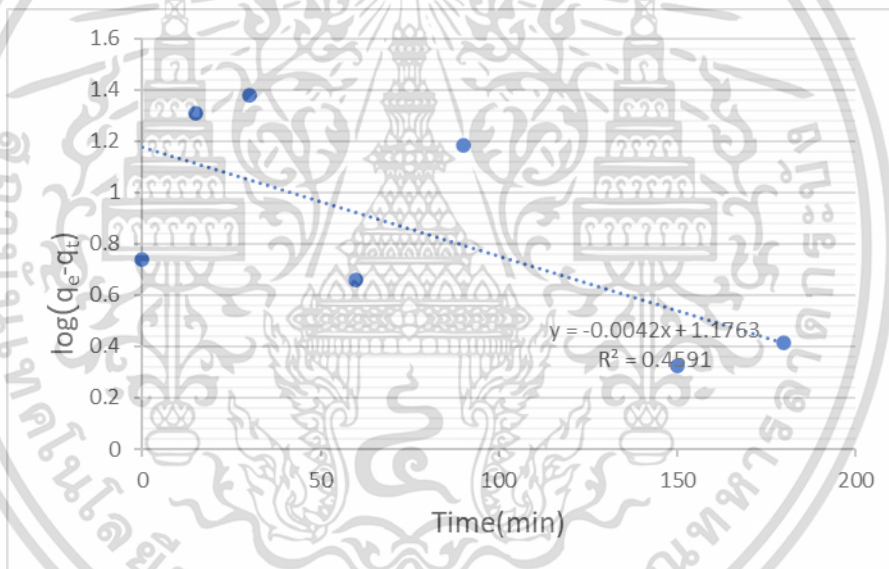
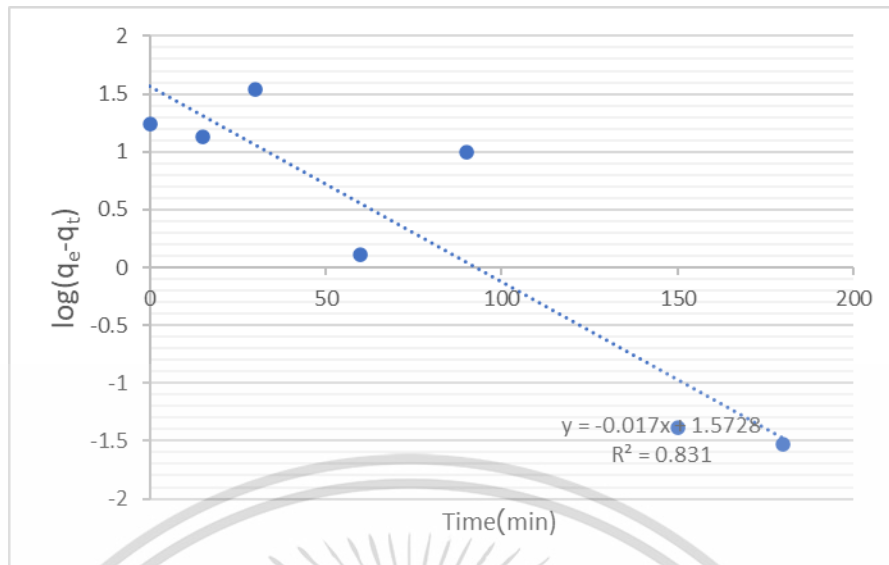
- โดย K_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/min)
 q_t = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)
 q_e = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 t = เวลาที่ใช้ (min)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $k_1/2.303$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log q_e$

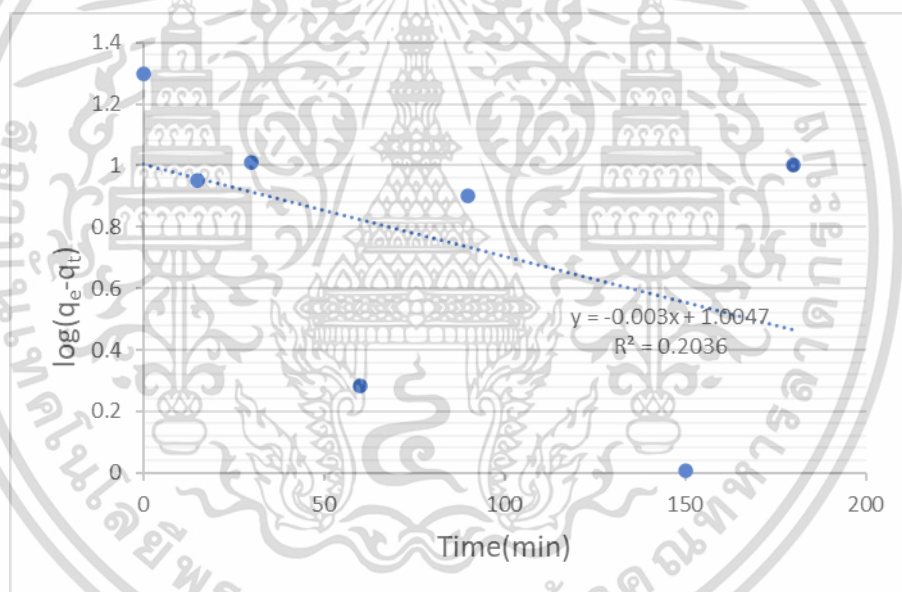
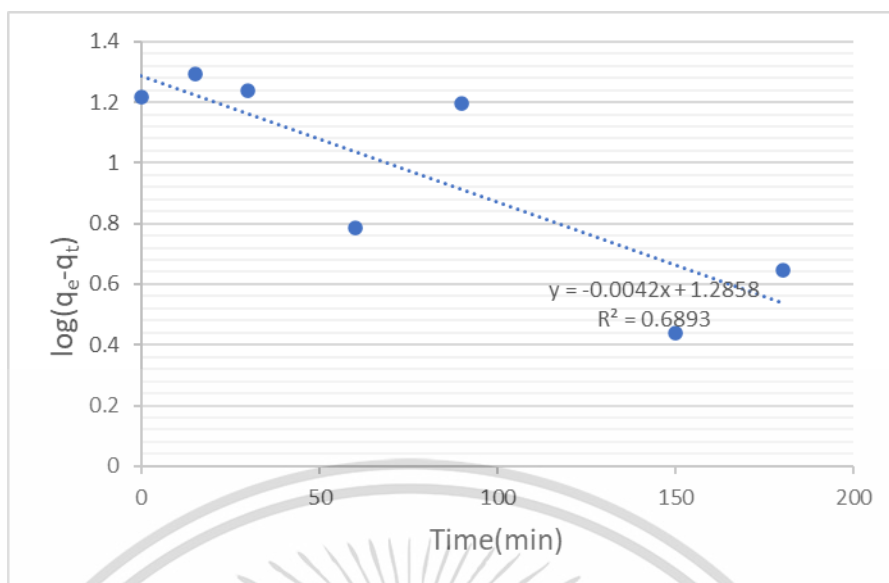


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน

- (a) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0 กรัม/ลิตร
- (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 3 กรัม/ลิตร
- (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 6 กรัม/ลิตร
- (d) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 9 กรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (e) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 12 กรัม/ลิตร ภาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 แบบจำลองดูดซับการอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model)

สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + t/q_e$$

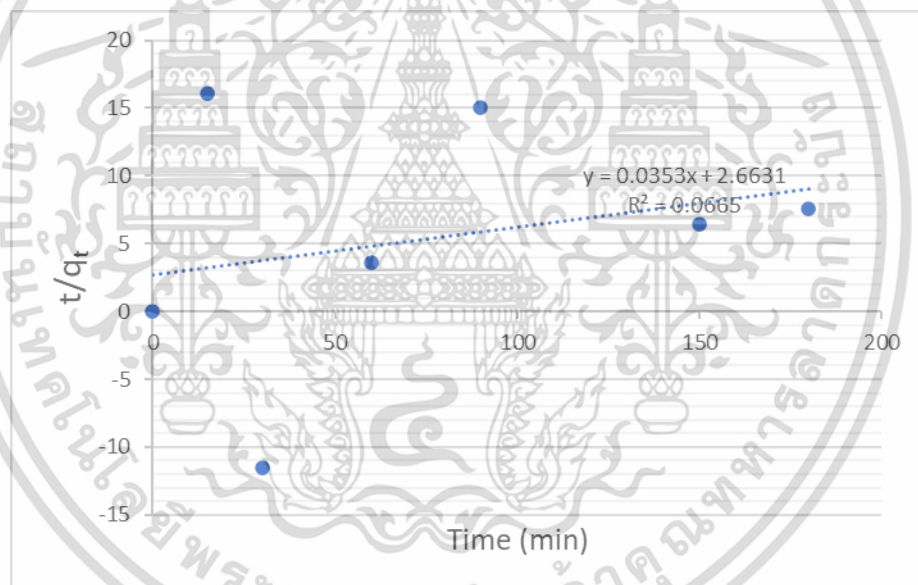
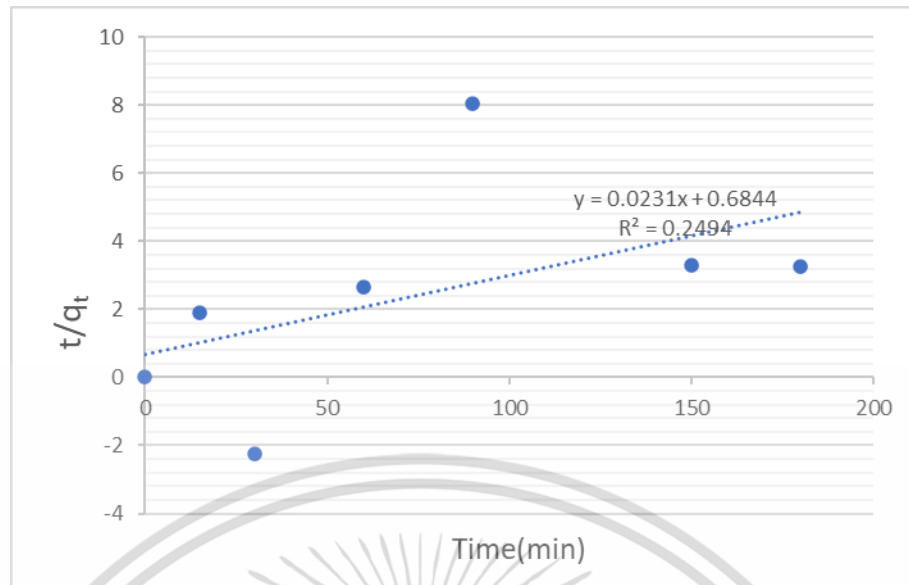
- โดย K_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/mg.min)
 q_t = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)
 q_e = ปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 t = เวลาที่ใช้ (min)

เมื่อพล็อตกราฟความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/K_2 q_e^2$

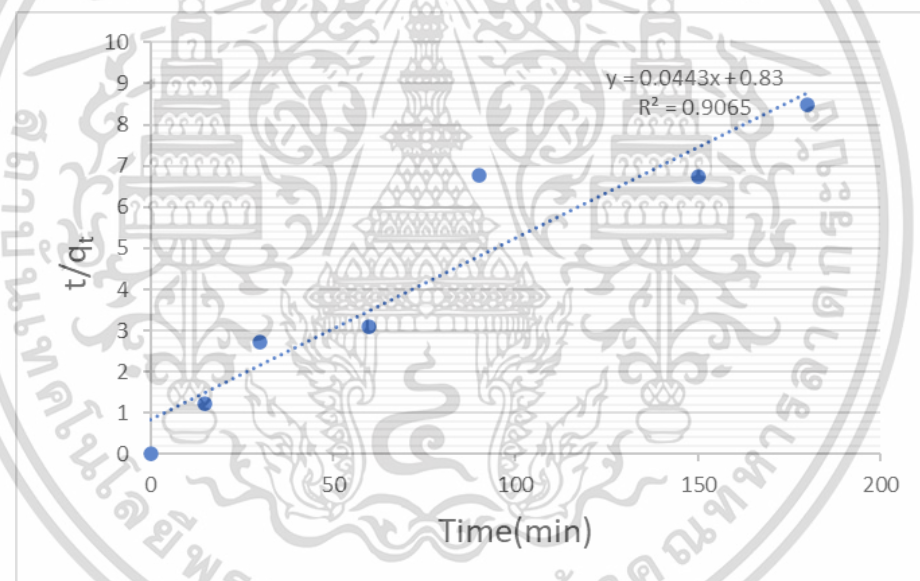
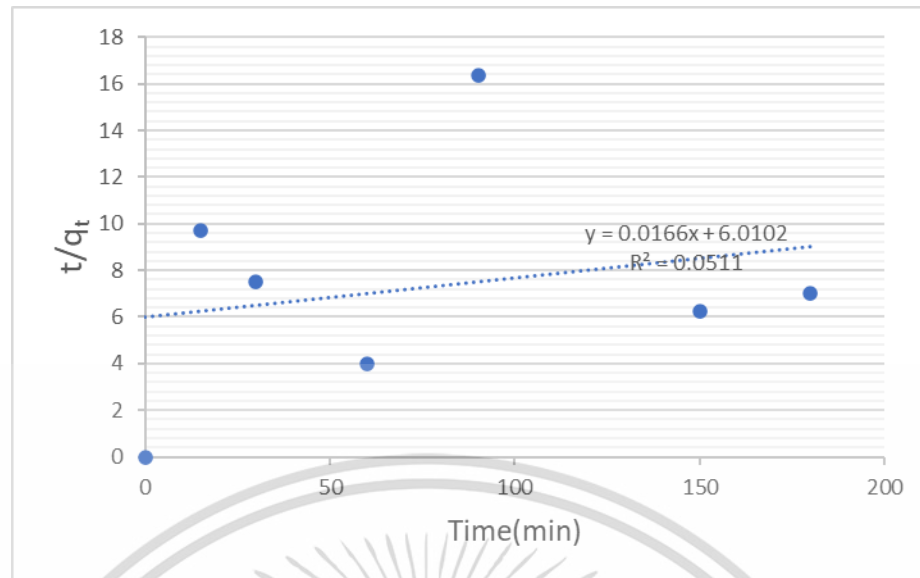


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า t/q_t กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน

- (a) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0 กรัม/ลิตร
- (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 3 กรัม/ลิตร
- (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 6 กรัม/ลิตร
- (d) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 9 กรัม/ลิตร
- (e) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 12 กรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวงแคบเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

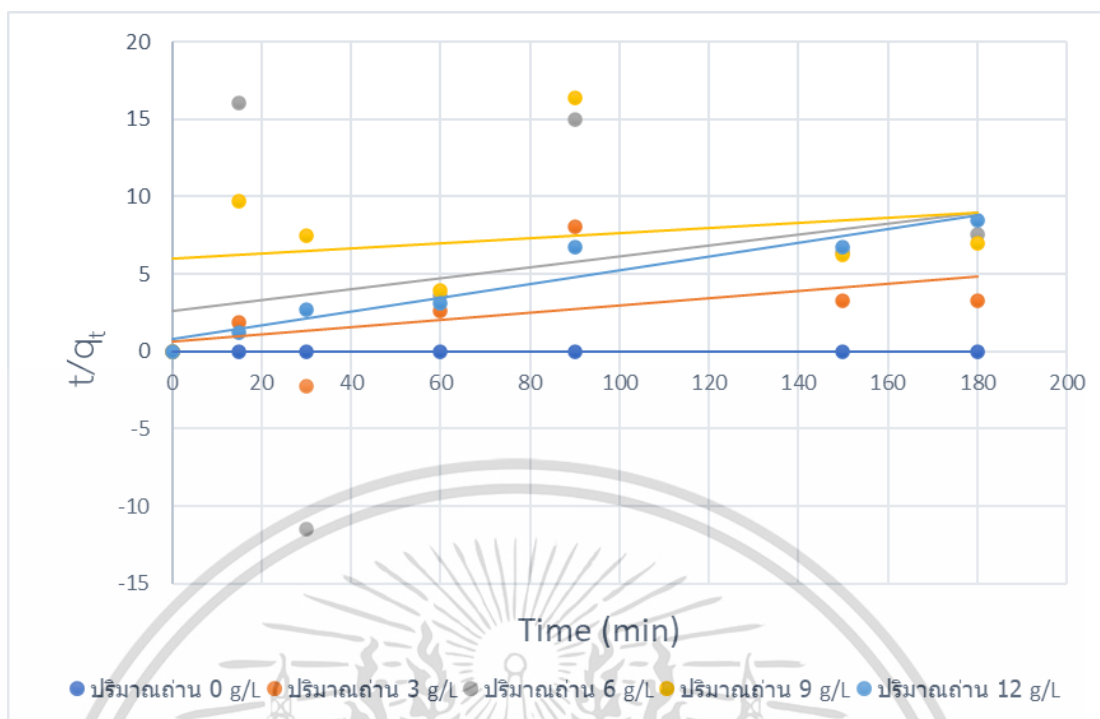
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความชันและจุดตัดแกน y ของการดูดซับสีย้อม
ไดเร็กซ์เรด 81

ปริมาณถ่าน (g/L)					
Pseudo-First Order					
	0	3	6	9	12
$K_1(1/\text{min})$	-1.1515×10^{-17}	-0.039	-0.0097	-0.0097	-0.0069
$q_e(\text{mg/g})$	21.2373	37.3938	15.0072	19.3108	10.1088
R^2	0	0.831	0.4591	0.6893	0.2036
Pseudo-Second Order					
	0	3	6	9	12
$K_2(\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min})$	0	0.0008	0.0005	0.0001	0.0024
$q_e(\text{mg/g})$	0	43.2900	28.3286	60.2409	22.5733
R^2	0	0.2494	0.0665	0.0511	0.9065

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ปริมาณถ่านและเวลาต่างกันเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Model) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 เมื่อแปรผันปริมาณถ่าน พบว่าค่า K_2 จะเพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการดูดซับ

จากแบบจำลองอัตราการดูดซับการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ คือ 0, 3, 6, 9 และ 12 กรัม/ลิตร ได้ดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง
ที่ปริมาณถ่านต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์

ปริมาณถ่าน (g/L)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (K_2) (g/mg.min)	R^2
0	0	0
3	0.0008	0.2494
6	0.0005	0.0665
9	0.0001	0.0511
12	0.0024	0.9065

จากตาราง 4.4 เมื่อปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย และที่ปริมาณถ่าน 12 กรัม/ลิตร พบว่ามีค่าอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ณ เวลานั้นๆ แต่เนื่องจากในเวลาที่จำกัด จึงไม่สามารถทำการทดลองเพื่อหาความสมดุลในสภาวะที่เหมาะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น ของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ศึกษาแก่การเปลี่ยนแปลง เอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ผลการศึกษาเป็นดังนี้

4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81

การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_c) คำนวณได้จากสมการ

$$K_c = \frac{q_e}{C_e}$$

$$\ln K_c = -\left(\frac{\Delta H^0}{RT}\right) + \left(\frac{\Delta S^0}{R}\right)$$

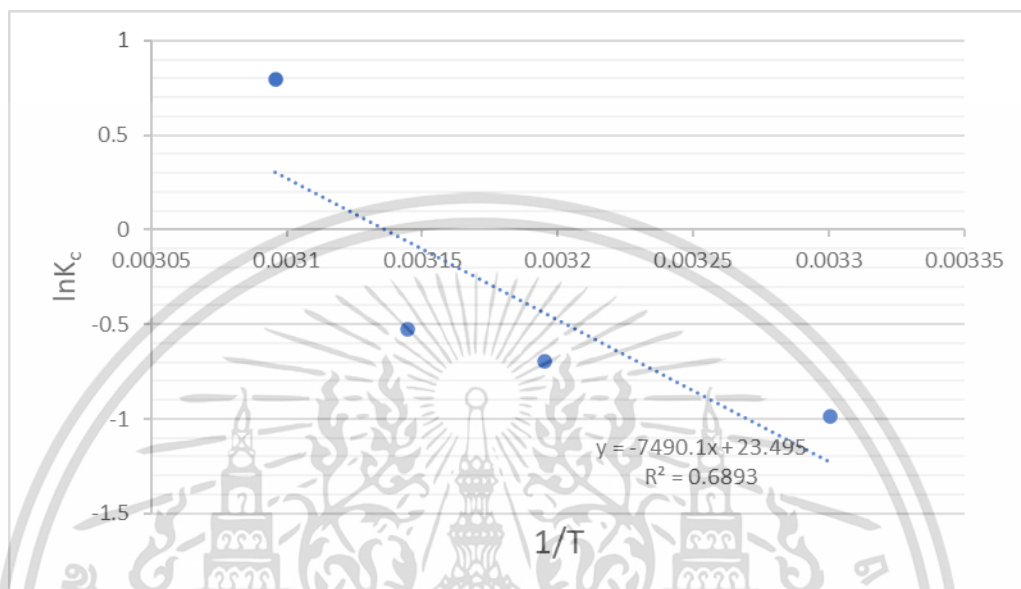
- เมื่อ q_e = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 C_e = ความเข้มข้นของสีย้อมละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 K_c = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 ΔH^0 = ค่าเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (KJ/mol)
 ΔS^0 = ค่าเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (J/mol.K)

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิ 30, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ไดเร็กต์เรด 81

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ K_c
30	0.37
40	0.49
45	0.59
50	2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-\Delta H^0/R$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\Delta S^0/R$



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียสของ น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81

จากความชันที่ได้จากสมการสามารถคำนวณค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0) เท่ากับ 62.272 kJ/mol ค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ($\Delta H^0 = \text{บวก}$) แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาล์วเลขศูนย์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น

4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81

จากจุดตัดแกน y ที่ได้จากสมการเท่ากับ $\Delta S^0/R$ ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) ของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กซ์เรด 81 เท่ากับ 0.1953 KJ/mol.K ซึ่งค่าเอนโทรปีบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบ ระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta S^0 = \text{บวก}$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอกละถึงการเกิดพันธะหรือ มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ ($\Delta S^0 = \text{ลบ}$) มีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอกละถึงการไม่เกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโมเลกุลของน้ำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้นมีความติดแน่นมาก

4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ของการดูดซับ

จากการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) นำมาแทนค่าในสมการ $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$ ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) ของการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 มีค่าของการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่อุณหภูมิ 30, 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 3.0849, 1.1315, -5.7052 และ -0.8219 kJ/mol ตามลำดับ การดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานค่าเป็นลบสามารถเกิดเองได้ตามธรรมชาติ และการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานค่าเป็นบวกไม่สามารถเกิดเองได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 ที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กตามธรรมชาติเองได้ และการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 ที่อุณหภูมิ 45 และ 50 องศาเซลเซียส สามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กตามธรรมชาติเองได้

4.9 การศึกษาน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 โดยทำการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของซีโอดี

จากการศึกษาน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของน้ำเสียดังเคราะห์โดยน้ำเสียดังเคราะห์ 300 มิลลิกรัม/ลิตร ก่อนการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำเสียดังเคราะห์สี่ยมโตเร็กซ์เรด 81 มีค่าเท่ากับ 422 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อทำการบำบัดโดยเติมถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในสภาวะที่เหมาะสม ค่าซีโอดีของน้ำเสียดังเคราะห์เท่ากับ 122 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการบำบัดค่าซีโอดีลดลงไป 300 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 71.09 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะเห็นรูพรุนชัดเจนและมีลักษณะพื้นผิวขรุขระเพียงเล็กน้อย ส่วนลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็กจะพบรูพรุนมีขนาดเล็กและพื้นผิวขรุขระมากขึ้นมีเหล็กเกาะที่ผิว ปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.19% เป็น 47.71%
- 2) น้ำเสียสังเคราะห์ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 225 นาโนเมตร
- 3) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีค่า Point of Zero Charge เท่ากับ 8
- 4) การดูดซับมีประสิทธิภาพดี เมื่อพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าต่ำกว่าค่า Point of Zero Charge ของถ่านแม่เหล็ก ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ใช้เท่ากับ 12 กรัม/ลิตร ระยะเวลาการบำบัดเป็น 180 นาที และอุณหภูมิที่เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถบำบัดน้ำเสียจากความเข้มข้นของสี 300 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 30.99 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 90.47 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดค่า COD จาก 422 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 122 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 71.09 เปอร์เซ็นต์
- 5) การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นการดูดซับแบบ Langmuir สามารถดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ได้สูงที่ 33.8983 mg/g
- 6) ในการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order)
- 7) ΔH^0 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 มีค่าเท่ากับ 62.272 KJ/mol เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน
- 8) ΔS^0 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 มีค่าเท่ากับ 0.1953 KJ/mol.K แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก
- 9) ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) เมื่อดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่อุณหภูมิ 30, 40 45 และ 50 องศาเซลเซียสได้ค่าเท่ากับ 3.0849, 1.1315, -5.7052 และ -0.8219 kJ/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหาที่มีอยู่ในเอกสารฉบับนี้

ตามลำดับ แสดงว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กตามธรรมชาติเองได้ ที่อุณหภูมิ 45 และ 50 องศาเซลเซียสสามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียตามธรรมชาติเองได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียที่มีผลต่อการดูดซับ
- 2) ควรศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2542). **ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อมที่นิยมใช้**. (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม).
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2556). **ประเภทและคุณสมบัติของสีย้อมที่นิยมใช้**. (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม).
- กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข. (2554). **คู่มือวิชาการเรื่อง แนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทสถานประกอบการการย้อม การกีดสีผ้าหรือสิ่งทออื่นๆ**. (สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม, กรมอนามัย, กระทรวงสาธารณสุข).
- กัณฑ์ศรี พงศ์พันธุ์. (2547). **เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม**.
- กิตติกร สาสุจิตต์. (2558). **การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งซังและเปลือกข้าวโพด ด้วยเทคนิคการอัด ริดขึ้นรูป โดยใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาว**. (มหาวิทยาลัยทักษิณ).
- กุสุมา สัญญา. (2562). **การดูดซับฟีนอลในสารละลายโดยใช้ถ่านเปลือกทุเรียนที่ถูกกระตุ้นทางเคมี** (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- ขนิษฐา ชัยรัตนวรรณ. (2550). **อุตสาหกรรมฟอกย้อม**. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.tpa.or.th/writer/อุตสาหกรรมฟอกย้อม>
- จวีรพร วงศ์จันดา. (2562). **การกำจัดสีย้อมมาลาโคทกรีนจากสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริสโลไนต์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี).
- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). **ถ่านกัมมันต์**. (กรมวิทยาศาสตร์บริการ).
- ชมพูนุท ไชยรักษ์. (2563). **การดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวา**. (สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- ณัฐพันธุ์ ศุภกา. (2546). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก**. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- เทพฤทธิ ปิติฤทธิ. (2544). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว**. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นิตยา ผาสุขพันธ์. (2545). การศึกษาการใช้ระบบถังที่มีตัวกลางในการบำบัดสารอินทรีย์และสีรีแอกทีฟจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- นิรามัย ไตรยวงศ์. (2558). กำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และฟิอาร์บี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- ปรางศิริ ศรีศุภพชร. (2551). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์ และสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว. (สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- มณฑา จันทร์เกตุเลี้ยงด. (2541). คุณสมบัติของสีย้อมสังเคราะห์.
- ยุวรัตน์ เงินเย็น. ฉันทกร ปาทวาท. เกศรา ศีลาเกษ. และสมชาย ชวนอุดม. (2565). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากลูกยางนา. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2565, จาก <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/227840>
- รัชนีย์ รุกขชาติ. (2544). การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ควอเตอร์ไนซ์โครอสต์ลิงก์เซลลูโลสจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับประรด และกาบมะพร้าว. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- วนิดา ชูอักษร. (2555). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- วรรณวิภา ผลาหาราญ. (2547). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษเหล็ก. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- วรนิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก).
- วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2540). วิธีบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2565, จาก <http://otop.dss.go.th/index.php/knowledge/interesting-articles/101-2016-11-15-07-10-54>
- วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ. (2558). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. (ศูนย์วิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์).
- วุฒิชัย ทิลุพงษ์. (2545). การกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).

- ศศิธร จิตติมา. และชลอ จารุสุทธิรักษ์. (2564). การบำบัดเมโทรนิดาโซลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่ใช้ระบบเวทูลรี. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2565, จาก https://agkb.lib.ku.ac.th/main/search_detail/result/413654
- ศุภธวดี วีระพงษ์. (2548). การกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมจากน้ำทิ้งโรงงานชุบโครเมียมโดยใช้เศษผงเหล็ก. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- สกล ศิริรัตน์. (2546). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิคจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี).
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากิจการกระบวนการเรียนรู้. (2557). การดักกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2565, จาก https://il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page3_3.html
- สถาบันพัฒนาสิ่งทอ. (2565). สถานการณ์อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทย. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.thaitextile.org/th/insign/detail.3285.1.0.html>
- สายรุ้ง นพขุนทด. (2554). การกำจัดรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). ตารางแสดงรายละเอียดข้าวโพดหวาน. สืบค้นเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม 2565, จาก <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดข้าวโพดหวาน/TH-T>
- อภิชาติ หิรัญจิตต์. (2539). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดติดผิวและโคแอกกูเลชัน. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- อุทัย สอนเทศ. (2548). การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร).
- Ahmad, M. Usman, A.R.A. Rafique, M.I. and Al-Wabel, M.I. (2019). “Engineered biochar composites with zeolite, silica, and nano-zerovalent iron for the efficient scavenging of chlortetracycline from aqueous solutions” Environ. Sci. Pollut. Res. 26: 15136–15152.
- Al-Degs, Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J., Ahmad, M.N. and Walker, G.M. (2007). Competitive adsorption of reactive dyes from solution: equilibrium isotherm studies in single and multisolute systems. Chemical Engineering Journal 128: 163–167.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Arancibia-Miranda, N., Baltazar, S.E., Garcia, A., Romero, A.H., Rubio, M.A., and Altbir, D. (2014). Lead removal by nano-scale zero valent iron: Surface analysis and pH effect. *Materials Research Bulletin* 59: 341-348.
- Attia, A.A., Rashwan, W.E. and Khedr, S.A. (2006). Capacity of activated carbon in the removal of acid dyes subsequent to its thermal treatment. *Dyes and Pigments* 69: 128-136.
- Bhattacharya, K.G. and Sharma, A. "Azadirachta indica leaf powder as an effective biosorbent for dyes: A case study with aqueous congo red solutions", *Journal of Environmental Management*. 71: 217-229; March, 2004.
- Cao, J., Wei, L., Huang, Q., Wang, L., and Han, S. (1999). Reducing degradation of azo dye by zero-valent iron in aqueous solution. *Chemosphere* 38(3): 565-571.
- Chen, J-L., Al-Abed, S.R., Ryan, J.A., and Li, Z. (2001). Effects of pH on 74ichlorination of trichloroethylene by zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials B83*: 243-254.
- Chowdhury, S. and Saha, P. (2010). Sea shell powder as a new adsorbent to remove basic green 4, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal* 164: 168-177.
- Clark, C.J., Rao, P.S.C., and Annable, M.D. (2003). Degradation of perchloroethylene in cosolvent solutions by zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials B96*: 65-78.
- Helland, B.R., Alvarez, P.J.J., and Schnoor, J.L. (1995). Reductive 74ichlorination of carbon tetrachloride with elemental iron. *Journal of Hazardous Materials* 41: 205-216.
- Iqbal, M.J. and Ashiq, M.N. (2007). Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials* 139: 57-66.
- Jain, R. and Sikarwar, S. (2008). Removal of hazardous dye congo red from waste material. *Journal of Hazardous Materials* 152: 942-948.
- Khanal, M. Rai, D. Khanal, R. (2020). "Determination of Point Zero Charge (PZC) of Homemade Charcoals of Shorea Robusta (Sakhuwa) and Pinus Roxburghii (Salla)" *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 9(10): 153-155.
- Kumar, P.S., Ramalingam, S., Senthamarai, C., Niranjana, M., Vijayalakshmi, P. and Sivanesan, S. (2010). Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut

- shell: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. *Desalination* 261(1): 52-60.
- Lookman, R., Bastiaens, L., Borremans, B., Maesen, M., Gemoets, J., and Diels, L. (2004). Batch-test study on the 75 chlorination of 1,1,1-trichloroethane in contaminated aquifer material by zero-valent iron. *Journal of Contaminant Hydrology* 74: 133-144.
- Lorenc-Grabowska, E. and Gryglewicz, G.Z. (2007). Adsorption characteristics of congo red on coal-based mesoporous activated carbon. *Dyes and Pigments* 74: 34-40.
- Ma, F. Zhao, B. Diao, J. Jiang, Y. and Zhang, J. (2020). "Mechanism of phosphate removal from aqueous solutions by biochar supported nanoscale zero-valent iron" *RSC Adv.* 10: 39217-39225.
- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon* 42: 83-94.
- Nam, S., and Tratnyek, P.G. (2000). Reduction of azo dyes with zero-valent iron. *Wat. Res.* 34(6): 1837-1845.
- Sun, D., Zhang, C., Wub, Y. and Liu, X. (2010). Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 181: 335-342.
- Wang, K-S., Lin, C-L., Wei, M-C., Liang, H-H., Li, H-C., Chang, C-H., Fang, Y-T., and Chang, S-H. (2010). Effects of dissolved oxygen on dye removal by zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials* 182: 886-895.
- Yanan, D., Yanlei, S., Wenjuan, C., Jinming, P., Yan, Z. and Zhongyi, J. (2011). Ultra filtration enhanced with activated carbon adsorption for efficient dye removal from aqueous solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 19(5): 863-869.
- Zhang, X., Lin, S., Lu, X-Q., and Chen, Z-L. (2010). Removal of Pb(II) from water using synthesized kaolin supported nanoscale zero-valent iron. *Chemical Engineering Journal* 163: 243-248.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

การวิเคราะห์ซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

หลอดย่อยสลาย (Digestionvessels) ควรใช้หลอดแก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (Borosilicate culture tubes) ขนาด 16×100 มิลลิเมตรที่มีฝาเกลียวชนิดเอพี (Tetrafluoroethylene; TFE) และใช้หลอดบอโรซิลิเกต ขนาด 10 มิลลิเมตร ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 150±2 องศาเซลเซียส การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 องศาเซลเซียสจะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหายปิเปต ขนาด 2-5 มิลลิเมตร ขวดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 100 มิลลิเมตร

สารเคมี

สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard Potassium Dichromate Digestion Solution) 0.1 นอร์มอล นำโพแทสเซียมไดโครเมตอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่ง 4.913 กรัม และปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิเมตรด้วยน้ำกลั่น เติม กรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิเมตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม จากนั้นทำการละลายทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิเมตรด้วยน้ำกลั่น สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid reagent) : เติมสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 กรัม ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2.5 ลิตร แล้วทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลาย สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferriin indicator solution) : ละลาย 1, 10-ฟีแนนโทโรไลน์โมโนไฮเดรต 1.485 กรัมและเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.695 กรัมในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิเมตร สารละลายมาตรฐานไอออน(II)แอมโมเนียมซัลเฟตไทเทรนต์ (Standard Ferrous Ammonium Sulfate Titrant (FAS) : นำสารละลายมาตรฐานไอออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต มา 19.6 กรัมละลายในน้ำกลั่นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิเมตรทำให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิเมตร และจากนั้นนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนทุกครั้ง ดังต่อไปนี้ นำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตมา 1.5 มิลลิเมตรลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 150 มิลลิเมตร เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิเมตร และเติมซัลฟูริก 3.5 มิลลิเมตร ทิ้งให้เย็น จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ ลงไป 1-2 หยด และนำไปไทเทรตกับสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

$$\text{นอร์มอร์ลิตี} = \frac{\text{ปริมาตรสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (มิลลิเมตร)}}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรต}} \times 0.1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟูริก 20% ก่อนใช้ทุกครั้งเพื่อป้องกันการปนเปื้อน นำหลอดแก้วมา 3 หลอด ทำแบลงค์ โดยการเติมน้ำกลั่นหลอดละ 2.5 มิลลิลิตร นำหลอดแก้วมาเติมน้ำตัวอย่างตัวอย่างละ 3 หลอดหลอดละ 2.5 มิลลิลิตร (หากตัวอย่างน้ำแขย่นอยู่ต้องทำให้มีอนุภาคน้ำเท่ากับอนุภาคน้ำหึ่งก่อนแล้วเขย่าให้ตัวอย่างน้ำผสมเข้ากันให้ดี) เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 3.5 มิลลิลิตร โดยต้องค่อยๆ เติมน้ำเข้าไปให้ไหลลงจากข้างหลอดแก้ว จะทำให้สารละลายกรดซัลฟูริกลงไปอยู่ข้างล่างหลอดแก้ว เช็ดปากหลอดแก้วตรงเกลียวให้แห้ง (ป้องกันการเปิดฝาหลอดแก้วยากหลังอบ) แล้วปิดฝาหลอดแก้วให้สนิทกลับหลอดแก้วไปมาเพื่อให้สารผสมเข้ากัน และในขณะที่กลับหลอดแก้วไปมาควรสวมถุงมือกันความร้อน เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำหลอดแก้วออกมาแล้วรอให้เย็นเท่ากับอนุภาคน้ำหึ่ง เมื่อหลอดแก้ว

ทุกหลอดเย็นเท่ากับอนุภาคน้ำหึ่ง ให้เทสารในขวดแก้วแต่ละหลอดลงในขวดวัดปริมาตรของแต่ละขวด จากนั้นนำแต่ละขวดไปเติมสารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ ลงไป 1-2 หยด และนำไปไทเทรตกับสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

บันทึกปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต จากนั้นนำไปคำนวณหา

ปริมาณซีโอดี ดังต่อไปนี้ :

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัม } O_2 \text{ /ลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = นอร์มอลลิตีของ FAS

8,000 = milliequivalent weight ของออกซิเจน \times 1,000 มิลลิลิตร/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 เข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

ซังสีย้อมไดเร็กต์เรด 81 2 กรัม สารละลาย = 1000 มิลลิลิตร

ดังนั้น ซังไดเร็กต์เรด 81 2 กรัม แล้วปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ความเข้มข้น 50, 100, 300, 500 มิลลิกรัม/ลิตร
- น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 30 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์ (MW.=278)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์

ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร มีเฟอร์รัสซัลเฟต $(1 \times 250 / 1,000) = 0.25$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์เท่ากับต้องซังเฟอร์รัสซัลเฟต $(0.25 \times 278) = 69.5$ กรัมในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดด์ 2 โมลาร์ (MW.=37.83)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมโบรโมไฮไดด์ 2 โมลาร์

ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร มีโซเดียมโบรโมไฮไดด์ $(2 \times 250 / 1,000) = 0.5$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดด์ 2 โมลาร์ เท่ากับต้องซังโซเดียมโบรโมไฮไดด์ $(0.5 \times 37.83) = 18.915$ กรัม ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ (MW.= 40)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ $(2 \times 1,000 / 1,000) = 0.1$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ $(0.1 \times 40) = 4$ กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ (MW.= 58.44)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตรต้องการให้มีโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร มีโซเดียมคลอไรด์ $(0.01 \times 1,000 / 1,000) = 0.01$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ เท่ากับต้องซังโซเดียมคลอไรด์ $(0.01 \times 58.44) =$

0.5844 กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ (MW.=36.459)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตรต้องการให้มีกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

ในสารละลาย 500 มิลลิลิตร มีกรดไฮโดรคลอริก $(0.1 \times 500 / 1,000) = 0.1$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องกรดไฮโดรคลอริก $(0.1 \times 36.459) = 4.16$

มิลลิลิตร ในสารละลาย 500 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ สีย้อมไดเร็กต์เรด 81

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 (w/v) เท่ากับ 300 มิลลิกรัม ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

น้ำเสียสังเคราะห์ ปรับค่า pH	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัด (mg./L.)			เฉลี่ยความ เข้มข้น
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	
ค่า pH = 2	4.52	2.13	2.54	3.06
ค่า pH = 3	3.13	1.93	4.02	3.02
ค่า pH = 4	1.15	2.32	1.28	1.58
ค่า pH = 5	2.66	3.55	1.36	2.52
ค่า pH = 7	2.17	3.10	2.74	2.67
ค่า pH = 9	13.00	11.87	14.95	13.28
ค่า pH น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนปรับ เท่ากับ 5				

ตารางที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 6 กรัม ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเร็กต์เรด 81 เป็นดังนี้ 10, 20, 30, 40, 50 และ 100, 300, 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวอย่าง (mg/L)	ก่อนการ ดูดซับ (mg/L)	หลังการดูดซับ รอบ 1 (mg/L)	หลังการดูดซับ รอบ 2 (mg/L)	การดูดซับเฉลี่ย (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การ ดูดซับ
น้ำตัวอย่าง 10	10.15	-3.74	-4.21	-3.85	100%
น้ำตัวอย่าง 20	19.85	-3.95	-4.11	-4.06	100%
น้ำตัวอย่าง 30	27.90	-3.69	-3.59	-3.50	100%
น้ำตัวอย่าง 40	39.30	-3.61	-3.75	-3.56	100%
น้ำตัวอย่าง 50	48.65	-3.54	-4.16	-3.87	100%
น้ำตัวอย่าง 100	95.78	-9.22	-4.32	-6.77	100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตัวอย่าง 300	320.43	27.20	31.61	29.41	90.19%
น้ำตัวอย่าง 500	511.43	340.49	332.27	336.38	34.22%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่

อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์
0	325.20	21.95
15	261.5	19.58
30	220.12	32.31
60	315.38	3.02
90	214.67	33.98
150	310.94	4.38
180	285.84	12.10

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 3 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่

อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์
0	209.79	35.49
15	237.98	26.82
30	260.49	19.90
60	247.76	23.81
90	181.07	44.32
150	173.63	46.59
180	120.87	62.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 6 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่

อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์
0	230.83	29.02
15	255.90	21.31
30	235.77	27.50
60	215.18	33.83
90	178.70	45.05
150	170.86	47.76
180	142.89	56.06

ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 9 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่

อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์
0	283.08	12.95
15	247.57	23.87
30	184.19	43.36
60	179.38	44.84
90	165.16	49.21
150	95.09	70.76
180	54.80	83.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 12 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 300 mg/L pH เท่ากับ 2 ที่

อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์
0	310.07	4.65
15	114.17	64.89
30	87.87	72.98
60	83.58	74.30
90	55.38	82.97
150	43.87	86.51
180	30.99	90.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมไดเรกต์เรด 81 โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 12 กรัม ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา 180 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเสียดังนี้ 30, 40, 45, และ 50 องศาเซลเซียส

	ความเข้มข้นก่อนบำบัด รอบ 1 (mg/L)	ความเข้มข้นก่อนการดูด ซับ รอบ 2 (mg/L)	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ
น้ำเสียสังเคราะห์ 300 mg/L	285.53	280.29	282.91	0%
อุณหภูมิ (องศา)	ความเข้มข้นหลังการดูด ซับ รอบ 1 (mg/L)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ รอบ 2 (mg/L)		
30	91.75	83.27	87.51	69%
40	71.92	69.54	70.73	75%
45	56.31	68.17	62.24	78%
50	20.12	19.48	19.80	93%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

รูปที่ จ.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ CHNS โดย Elemental Analyzer with Thermal Conductivity Detector Model Flash CHNS/O ของถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงสภาวะแม่เหล็ก

EagerSmart Summarize Results

Date : 12/07/2022 at 13:24:04
Method Name : CHNS
Method Filename : CHNS.mth

Group No : 1	Element %			
Sample Name	Nitrogen	Carbon	Hydrogen	Sulphur
normal-1	0.2882937193	63.13739395	3.50681448	0
normal-2	0.2722649276	66.88153076	3.379936934	0
synthetic-1	0.1968496144	27.93535805	2.21441555	1.854718089
synthetic-2	0.1976898164	24.59726715	2.392428875	1.695141077

4 Sample(s) in Group No : 1

Component Name	Average	Std. Dev.	% Rel. S. D.	Variance
Nitrogen	0.2387745194	0.04837	20.2582	0.0023
Carbon	45.63788748	22.46191	49.2177	504.5374
Hydrogen	2.87339896	0.66418	23.1146	0.4411
Sulphur	0.8874647915	1.02683	115.7031	1.0544

รูปที่ จ.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ O โดย Elemental Analyzer with Thermal Conductivity Detector Model Flash CHNS/O ของถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงสภาวะแม่เหล็ก

EagerSmart Summarize Results

Date : 12/23/2022 at 15:25:49
Method Name : CHNS
Method Filename : Oxygen..mth

Group No : 1	Element %			
Sample Name	Oxygen			
normal-1	21.68991852			
normal-2	22.43816948			
synthetic-1	28.09578896			
synthetic-2	26.54225922			

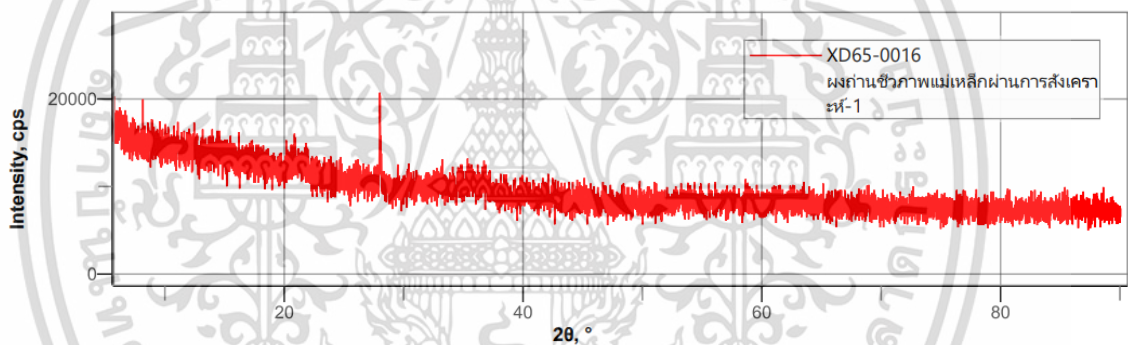
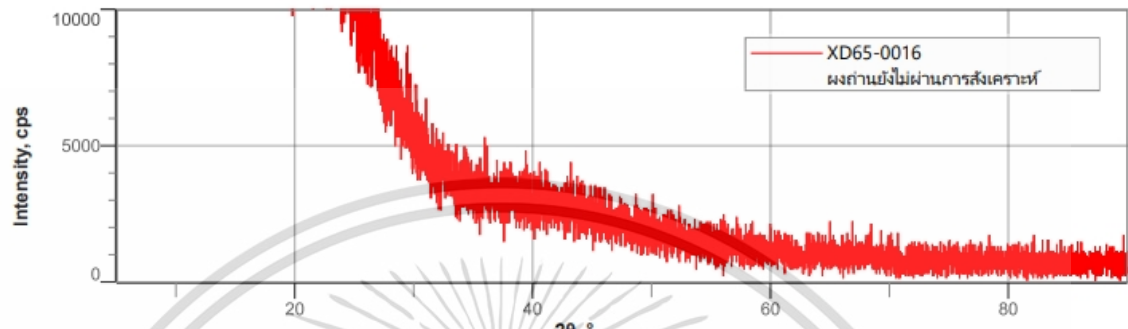
4 Sample(s) in Group No : 1

Component Name	Average	Std. Dev.	% Rel. S. D.	Variance
Oxygen	24.69153404	3.11456	12.6139	9.7005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงสถานะแม่เหล็กโดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD)



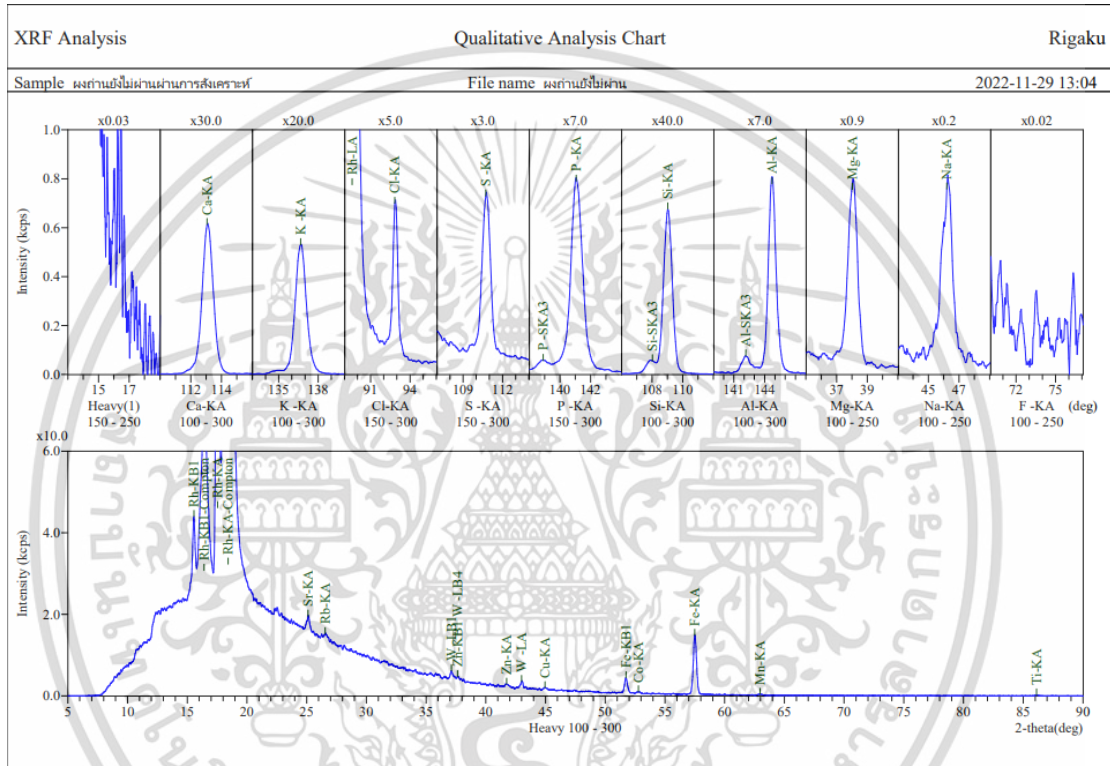
รูปที่ ฉ.1 การศึกษาโครงสร้างผลึก เมื่อใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD)

- (a) ถ่านชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง
- (b) ถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสถานะแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

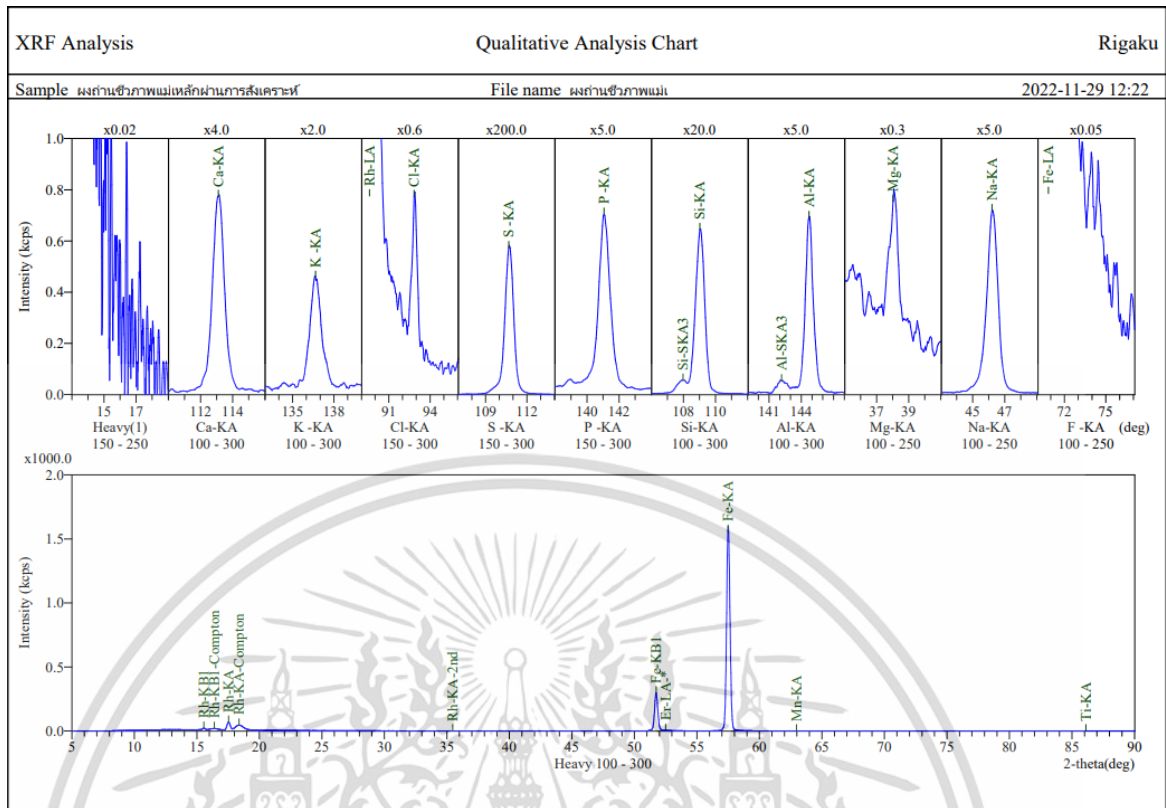
ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านชีวภาพที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุง สภาวะแม่เหล็กโดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ ข.1 การศึกษาองค์ประกอบธาตุเมื่อใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

(a) ถ่านชีวภาพที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง

(b) ถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสถานะแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

