

ADSORPTION OF COPPER FROM WASTEWATER USING
MAGNETIC BIOCHAR COMPOSITES BY
ZERO-VALENT IRON

การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสีย
ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2565

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION OF COPPER FROM WASTEWATER USING
MAGNETIC BIOCHAR COMPOSITES BY
ZERO-VALENT IRON



RATTAPOL SUWANNARACH
SUPHADIT VEERASUMATHA
SUPICHCHA RUEANGSIRI

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวนเวสสำหรับกรเซงานเพอการศกษาเท่านั้น ไมออนุญาตหนาไปเซประยชนดานการค้ำ
ไมว่ากรณใด ๆ ทั้งสิ้น อกทั้งห้ามมิให้ดัดแอสงเอกสารทุกคร้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2022

หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสีย
ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์
Adsorption of Copper from Wastewater Using Magnetic
Biochar Composites by Zero-Valent Iron

ชื่อนักศึกษา นายรัฐพล สุวรรณราช รหัสนักศึกษา 62050435
นายศุภดิษฐ์ วีรสุมธา รหัสนักศึกษา 62050453
นางสาวสุพิชชา เรืองศิริ รหัสนักศึกษา 62050863

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการ	
ดร.กสินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสีย ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์
ชื่อนักศึกษา	นายรัฐพล สุวรรณราช รหัสนักศึกษา 62050435 นายศุภดิษฐ์ วีรสุมธา รหัสนักศึกษา 62050453 นางสาวสุพิชชา เรืองศิริ รหัสนักศึกษา 62050863
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) ออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวดูดซับ ทำการสังเคราะห์และวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (MBC) จากการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีพื้นผิวขรุขระมากกว่า มีรูขนาดเล็กลง มีเหล็กเกาะกระจายทั่วพื้นผิว ประจุที่ผิวถ่านเป็นศูนย์ที่พีเอช 5.2 จากการวิเคราะห์ FTIR พบพีคของ Fe-O นอกจากนี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด ซึ่งผลการทดลองชี้ว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ทำการบำบัดเมื่อน้ำเสียมีพีเอชเริ่มต้น 7 ใช้ถ่านชีวภาพ 3 กรัม/ลิตร และใช้เวลาในการบำบัด 30 นาที อุณหภูมิในการบำบัด 50 องศาเซลเซียส เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสามารถบำบัดทองแดงได้ 93.48% การดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์ และเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน มีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก การดูดซับเกิดขึ้นได้เอง

คำสำคัญ: การดูดซับ, ทองแดง, ถ่านชีวภาพ, แม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์, น้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Adsorption of Cu from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron
Students	Rattapol Suwannarach Student ID 62050435 Suphadit Veerasumatha Student ID 62050453 Supichcha Rueangsiri Student ID 62050863
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 research was conducted to study the adsorption of copper (Cu^{2+}) from wastewater using magnetic biochar containing zero valence iron as an adsorbent. Synthesis and characterization of biochar (BC) and magnetic biochar (MBC) were performed. The results demonstrated that the magnetic biochar had a rougher surface, smaller pores, and iron deposition throughout the surface. The magnetic biochar surface charge was zero at pH 5.2. From the FTIR analysis, a peak of Fe-O was presented. In addition, studies were conducted to find the optimal conditions for the treatment. The results indicated that the optimum treatment conditions were initial pH 7, 3 g/l of biochar, 30 min treatment time, and 50 °C treatment temperature. When using the optimum treatment conditions, 93.48% of copper could be removed from wastewater. The adsorption followed the Langmuir isotherm and the pseudo-second-order reaction model. The reaction was endothermic, with large disorder between sorbent and sorbent. Adsorption occurred spontaneously.

Keywords: adsorption, copper, biochar, zero valence magnet, wastewater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง “การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์” โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำที่ถูกต้องและได้รับความอนุเคราะห์จากบุคลากรของ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชมพูนุทไชยรักษ์ เป็นอย่างยิ่ง ที่ให้กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องจนโครงการพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อมาเป็นกรรมการพิจารณางานวิจัย โดยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ชี้แนะข้อบกพร่อง แนวทางการแก้ไขปัญหา ซึ่งทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคลากรภาควิชาเคมี สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ให้แก่คณะผู้จัดทำ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัยเสร็จสิ้น

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ผู้ที่สนับสนุนทางการศึกษาและให้ความช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจตลอดจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆ บุคคลที่รู้จักในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยเป็นกำลังใจ แนะนำ และคอยช่วยเหลือระหว่างการเรียนรู้ตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รัฐพล สุวรรณราช

ศุภดิษฐ์ วีรสุมธา

สุพิชชา เรืองศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทองแดง	4
2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง	4
2.2 กระบวนการผลิตและแปรรูปทองแดง	5
2.2.1 การผลิตโลหะทองแดงจากแร่ (Primary Production)	5
2.2.1.1 กระบวนการถลุงแร่ด้วยโดยกรรมวิธีทางความร้อน	6
2.2.1.2 การทำโลหะทองแดงให้บริสุทธิ์	7
2.2.2 การผลิตโลหะทองแดงจากเศษโลหะ	8
2.3 ถ่านกัมมันต์ (ฉวีวรรณ, 2562)	9
2.3.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	9
2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์	9
2.4 การดูดซับ	10
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ	10
2.4.2 กลไกการดูดซับ	10
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	11
2.4.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ	11
2.4.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ	11
2.4.3.3 ความปั่นป่วน	12
2.4.3.4 อุณหภูมิ	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.4.3.5 ผลของความเป็นกรด-ต่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	12
2.5 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron)	12
2.5.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties).....	12
2.5.2 การกักตร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	14
2.5.3 จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์	16
2.5.4 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์.....	16
2.5.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	18
2.5.6 การใช้ประโยชน์.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
3.1.1 อุปกรณ์	22
3.1.2 สารเคมี.....	23
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง	23
3.3 การเตรียมน้ำชีวภาพ (BC).....	23
3.4 การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีไบโรไฮโดรริคชัน.....	23
3.5 การศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (MBC)	24
3.6 การวิเคราะห์ค่า Point of zero charge (pHpzc) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดย วิธี pH drift method	24
3.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด.....	24
3.8 การคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกส์ไอโซเทอมการดูดซับ	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	28
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	28
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	36
4.3 ค่าดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดงความเข้มข้นต่างๆ	37
4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pHPZC).....	38
4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย	39
4.5.1 อิทธิพลของค่า pH.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

1. ความเข้มข้นของแอมโมเนียมของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ	39
2. ความเข้มข้นเหล็กของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ	40
4.5.2 อิทธิพลของปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก	41
4.5.3 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง	42
4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง	43
4.6 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์	43
4.6.1 สมการการดูดซับของ Langmuir.....	43
4.6.2 สมการการดูดซับของ Freundlich	45
4.6.3 สมการการดูดซับของ Temkin	46
4.6.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich	48
4.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ...	50
4.7.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Model).....	50
4.7.2 แบบจำลองดูดซับอันดับสอง	53
4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ...	57
4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH_0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง	58
4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS_0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	59
4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG_0) ของการดูดซับ	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก.....	66
ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร	66
ก.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง 1000 มิลลิลิตร/ลิตร	66
ก.2 การเตรียมสารละลายเฟอรัสซัลเฟต 1 โมลาร์ (MW.=278)	66
ก.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์ (MW.=37.83).....	66
ก.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ (MW.= 40).....	66
ก.5 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ (MW.=36.459).....	67
ก.6 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ (MW.= 58.44).....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
ภาคผนวก ข.....	68
ภาคผนวก ค.....	69
ภาคผนวก ง.....	72
ภาคผนวก จ.....	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติทองแดง	5
ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	25
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	37
ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก	50
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความชันและจุดตัดแกน y ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	56
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ...	57
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง	58
ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นทองแดงของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	68
ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นเหล็กของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7 และ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	68
ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	69
ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง	69
ตารางที่ ค.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 1 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	70
ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 2 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	70
ตารางที่ ค.5 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 3 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ค.6 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 4 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	71
ตารางที่ ง.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ใช้ปริมาณถ่าน ชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 3 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เป็นดังนี้ 50 , 200 และ 300 มิลลิกรัม ต่อลิตร.....	72
ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โดยใช้ปริมาณ ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 3 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเสียดังนี้ อุณหภูมิห้อง, 45, และ 50 องศาเซลเซียส.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ตารางธาตุแสดงตำแหน่งทองแดง	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการถลุงทองแดงจากแร่.....	6
รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตทองแดงจากเศษโลหะ.....	8
รูปที่ 2.4 เป็นแบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์	9
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	29
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็ก	30
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย EDS ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2	31
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ แสดงการกระจายตัวของธาตุ ชนิดต่างๆบนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) Ca และ (e) Na	32
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 1 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุ ชนิดต่างๆบนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na.....	33
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 2 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุ ชนิดต่างๆบนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na.....	34
รูปที่ 4.7 Map Sum Spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2.....	35
รูปที่ 4.8 FT-IR spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก..	36
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน ทองแดงกับความเข้มข้น.....	37
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก.....	38
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของเหล็กของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ.....	40
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ	41
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง	42
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับอุณหภูมิ.....	43
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก.....	46
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง	47
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง	49
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน...	53
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า t/q_t กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่ปริมาณถ่านต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมถือเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากโลหะหนักสามารถสะสมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และสุขภาพของมนุษย์ โดยของเสียที่นับว่าเป็นปัญหารุนแรงคือของเสียจำพวกโลหะหนัก เช่น ทองแดง เนื่องจากเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างกว้างขวาง อาทิ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมย้อมสี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้อาจปล่อยมลพิษ และของเสียจากกระบวนการผลิตออกแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งทางอากาศเสีย น้ำเสีย ขยะ และกากของเสีย การชะล้างหน้าดินที่เกิดจากการเปิดหน้าดิน รวมถึงสถานประกอบการต่างๆที่ประกอบธุรกิจด้วยการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารโลหะหนักผสมอยู่ อาทิ ร้านซ่อมเคาะพ่นสีรถยนต์ และปั้มน้ำมัน (ธีรนาถ, 2019) และเมื่อนำทองแดงไปใช้ประโยชน์นั้น ทองแดงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ใช้ในการทำอุปกรณ์ไฟฟ้า และใช้ผสมโลหะชนิดอื่น ซึ่งพบมากในน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานทอผ้า โรงกลั่นน้ำมัน การทำเหมืองแร่ และการใช้ทองแดงเป็นสารในการกำจัดสาหร่าย โดยผลกระทบของโลหะทองแดงคือเป็นพิษต่อพืชน้ำและสัตว์น้ำรวมถึงมนุษย์หากได้รับทองแดงเข้าสู่ร่างกาย 100 มิลลิกรัม จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร เม็ดเลือดแดงแตกตัวทำลายตับ ยับยั้งการทำงานของตับ หากร่างกายมีทองแดงสะสมในปริมาณ 25-30 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัวกิโลกรัม จะทำให้ตับแข็งได้ นอกจากนี้หากในน้ำมีปริมาณทองแดงมากกว่า 0.1 ppm จะทำให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำ (Baldwin และคณะ, 2003)

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดทองแดงจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการกำจัดโลหะในน้ำเสียมีอยู่หลายวิธี เช่น การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน (Membrane Separation) การแยกโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic Process) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) การใช้สารดูดซับ (Adsorption) (ศศิธร, 2551) โดยกระบวนการต่างๆเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี แต่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง อีกทั้งยังต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ

การบำบัดด้วยวิธีการดูดซับมีข้อดีคือประหยัด เป็นมิตรกับระบบนิเวศ สารดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ราคาถูก มีความสามารถสูงในการดูดซับและมีการใช้อย่างกว้างขวาง (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)

มีนักวิจัยจำนวนมากใช้ถ่านที่ทำจากวัสดุที่หาง่าย ราคาถูกหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเอกสารนี้เป็นเอกสารทสรงานวิชาหการใชงานเพอการศึกษาเท่านั้น เมืออนุญาตให้เนาไปใช้ประยชนดานการคา การเกษตร เช่น แกลบ กากอ้อย และแกนข้าวโพด มาเป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย พื้นที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเม็ดตบเลียงเนอหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกตงทมการเนาไปใช้

เพาะปลูกรวมทั้งประเทศ 7.03 ล้านไร่ แบ่งเป็นพื้นที่เพาะปลูกภาคเหนือ 4.51 ล้านไร่ พื้นที่เพาะปลูกภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1.66 ล้านไร่ และพื้นที่เพาะปลูกภาคกลาง 0.86 ล้านไร่ จังหวัดที่มีเนื้อที่เพาะปลูกมากที่สุดคือ เพชรบูรณ์ 834,584 ไร่ รองลงมา คือ จังหวัดน่าน 732,914 ไร่ ผลผลิต 4.62 ล้านตัน เพิ่มขึ้น 0.01 ล้านตัน จากปีที่ผ่านมา และมีต้นทุนการผลิต 6.81 บาท/กิโลกรัม (กลุ่มงานกิจการพิเศษ สำนักนโยบายและแผน สำนักงานปลัด กระทรวงมหาดไทย, 2560) แคนข้าวโพดเป็นสิ่งเหลือทิ้งจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้ประโยชน์ในการใช้ถ่านชีวภาพดูดซับมลพิษในน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพที่น่าพอใจ แต่ปัญหาคือการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสียหลังจากดูดซับแล้วทำได้ยาก จึงมีนักวิจัยหลายคนสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก Fe^{2+} และ Fe^{3+} แล้วนำไปดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งให้ผลการดูดซับที่ดีและแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายขึ้น โดยใช้แม่เหล็กดูดออก โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์สามารถดูดซับได้ดียิ่งขึ้น และไม่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม (ชมพูนุท และคณะ, 2561) แต่ยังพบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่สังเคราะห์จาก Fe^{2+} และ Fe^{3+} มีความไม่เสถียร เหล็กหลุดออกจากถ่านและปนเปื้อนในน้ำเสียได้ง่าย ในเวลาต่อมามีผู้วิจัยสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก Fe^0 และระบุว่าเหล็กจะมีความเสถียรมากขึ้น ไม่หลุดออกมาง่าย แต่งานวิจัยยังมีอยู่ในวงจำกัด

ผู้วิจัยจึงมุ่งที่จะสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดง ในงานวิจัยจะศึกษาถึงไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้น และเทอร์โมไดนามิกส์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ทำการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดง ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวดูดซับ โดยประเด็นที่ศึกษามีดังนี้

- 1) สังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กและทดสอบคุณสมบัติ
- 2) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ
- 3) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ
- 4) ศึกษาอัตราเร็วในการดูดซับ
- 5) ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) สังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และวิเคราะห์คุณสมบัติ ดังนี้ ค่า Point of zero charge วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิว องค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชัน วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2) สังเคราะห์น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทองแดง คือ 50, 200, 300 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการคำนวณค่าไม่ว่าการวัดค่าความเข้มข้นทองแดง หักตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้
- ความเข้มข้นของน้ำเสีย 50, 200, 300 มิลลิกรัม/ลิตร
 - ค่า pH คือ 2, 3, 4, 5, 7, 9
 - ปริมาณของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก คือ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 กรัม/ลิตร
 - ระยะเวลาในการดูดซับ คือ 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที
 - อุณหภูมิ 33°C, 45°C, 50°C

โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของทองแดงหลังบำบัดแล้วทุกครั้ง และความเข้มข้นของเหล็กในน้ำเสียเฉพาะในการทดลองอิทธิพลของ pH

4) นำผลการทดลองไปคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา พลังงานกระตุ้นและเทอร์โมไดนามิกส์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม
- 2) สามารถนำของเสียมาเพิ่มคุณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทองแดง

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของทองแดง

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นหลายประการโดยเฉพาะการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อนและการสึกกร่อน มีความสามารถในการขึ้นรูปและความเหนียวสูงจึงสามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆได้ง่าย และไม่เสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของทองแดงได้ โดยการเติมธาตุผสมต่างๆ เช่น สังกะสี นิกเกิล เบอริลเลียม ก็จะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานความล้าสูง สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น ทองแดง และโลหะผสมทองแดง เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย คุณสมบัติที่ทำให้ทองแดงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท คือ ความแข็งแรง, สภาพการเป็นตัวนำ, ความต้านทานการกัดกร่อน, การแปรรูป และความอ่อน รายละเอียดด้านคุณสมบัติอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1

ตารางธาตุ																		[ช่วง]													
1	2											11	12	13	14	15	16	17	18												
1 H												11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar												
2 Li	4 Be											19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
3 Na	4 Mg											37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
4 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
5 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
6 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
โลหะอัลคาไล		โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ		แลนทาไนด์		แอกทิไนด์		โลหะทรานซิชัน		ธาตุสังกะสี		โลหะหนักทรานซิชัน		โลหะหนัก		แก๊สเฉื่อย		ไฮโดรเจน		แฮโลเจน		โลหะหนัก		แก๊สเฉื่อย		เมทัลลอยด์		ไม่จัดประเภทชัดเจน			

รูปภาพที่ 2.1 ตารางธาตุแสดงตำแหน่งทองแดง

ที่มา : www.wikipedia.org

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางคุณสมบัติทองแดง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	
สัญลักษณ์ทางเคมี	Cu
ความหนาแน่น	8.96 ก./ซม. ³
จุดหลอมเหลว	1084.62 °C
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	3000.4 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 24.440 J/(mol.K)
คุณสมบัติทางกล	
Youngs modulus	110-128 GPa
Shear modulus	48 GPa
Brinell hardness	874 MPa

ที่มา : www.wikipedia.org

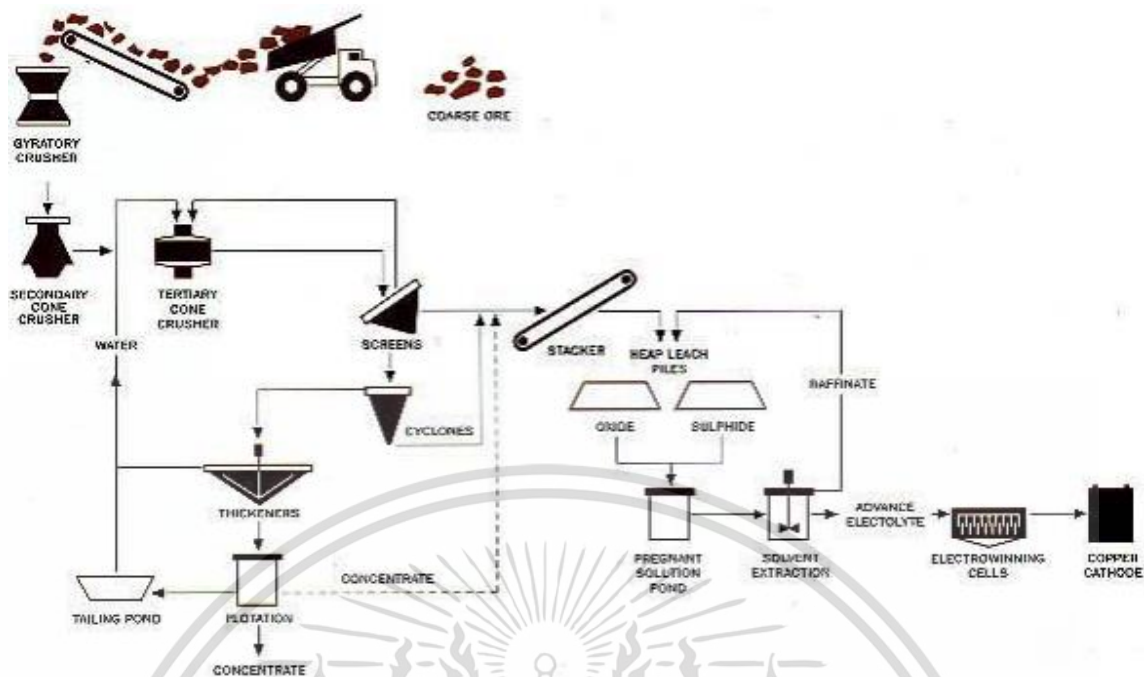
2.2 กระบวนการผลิตและแปรรูปทองแดง

กระบวนการผลิตโลหะทองแดงสามารถแบ่งตามประเภทของวัตถุดิบได้ 2 ประเภท ทั้งการผลิตทองแดงจากแร่ และการผลิตทองแดงจากเศษโลหะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การผลิตโลหะทองแดงจากแร่ (Primary Production)

การถลุงแร่ทองแดงในอุตสาหกรรมประมาณร้อยละ 90 ของโลหะทองแดงที่ผลิตได้จะเป็น การถลุงโดยกรรมวิธีใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) จากแร่ทองแดงซัลไฟด์ถ้าเป็นแร่ออกไซด์หรือ คาร์บอเนตจะใช้กรรมวิธีสารละลายเคมี (Hydrometallurgy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการถลุงทองแดงจากแร่
ที่มา : <http://www.mine-engineer.com/mining/copperm.htm>

2.2.1.1 กระบวนการถลุงแร่ด้วยโดยกรรมวิธีทางความร้อน มีขั้นตอนดังนี้

1) การแยกแร่ที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการบดแร่และการลอยแร่ ขั้นตอน นี้เรียกว่า การแต่งแร่เพื่อแยกเนื้อแร่ทองแดงออกจากมลทินหรือออกจากแร่อื่นๆ ที่ ปะปนอยู่ ซึ่งการแต่งแร่จะทำให้ได้หัวแร่ที่มีความสะอาดมากขึ้น จากนั้นจะนำไปผ่าน กระบวนการย่างแร่เพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นแร่ทองแดงออกไซด์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการย่าง จะอยู่ในช่วง 500-700 °C และใช้ถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

2) แร่ทองแดงที่ผ่านการย่างจะถูกนำมาถลุงในเตาหลอมประเภทเตาสูงหรือเตากระทะ และ จะหลอมละลายปนกันเมื่อถูกเผาในเตา เรียกว่า แมท (Matte) ระหว่างการถลุงจะต้อง ควบคุมปริมาณของกำมะถันไม่ให้สูงมาก เพื่อสามารถนำไปสกัดโลหะทองแดงได้ดี แร่ทองแดงที่ใช้ควรมีขนาดก้อนโตโดยนำแร่ไปผ่านการทำ Sintering หรือทำให้เป็นก้อน (Briquetting) ก่อนเพื่อป้องกันการสูญเสียแร่ การหลอมแมทจะเริ่มโดยการบรรจุแร่ ทองแดงกับถ่านโค้กทางด้านบนของเตา ทางตอนล่างจะมีท่อสำหรับพ่นลมเข้าไปทำการ จุดไฟใช้ถ่านโค้กลุกไหม้ บริเวณก้นเตาจะมีช่องเจาะให้แมทไหลออกมา อุณหภูมิของ แมทที่หลอมละลายจะอยู่ในช่วง 1,200-1,250 °C สำหรับการหลอมด้วยเตากระทะจะ บรรจุแร่ทางด้านบนของเตาและใช้น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงและมีการพ่น อากาศช่วยให้เกิดการเผาไหม้ ส่วนก๊าซร้อนเมื่อถ่ายเทความร้อนให้กับแร่แล้วจะออกจากเอกสารนี้เตาที่อีกด้านหนึ่ง จากนั้นเมื่อแร่ทองแดงหลอมละลายก็กลายเป็นแมทที่อุณหภูมิประมาณ 1,000-1,050 °C แล้วจะถูกเจาะให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 การทำโลหะทองแดงให้บริสุทธิ์ การทำทองแดง Blister ที่ได้จากการถลุงแร่ให้บริสุทธิ์ สามารถทำได้ 2 วิธีหลักๆ คือ การใช้ความร้อน (Fire Refining) และการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (Electric Refining) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1) การใช้ความร้อน เป็นการนำเอาทองแดง Blister มาหลอมให้ละลายอีกครั้งภายในเตา หมุนหรือภายในเตากระทะโดยใช้น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ถ้าใช้ถ่านหินจะต้องมีปริมาณกำมะถันต่ำมากๆ เมื่อทองแดงหลอมละลายแล้วจะเป่าอากาศผ่านท่อลงไปในน้ำ โลหะทองแดง ออกซิเจนในอากาศจะไปรวมตัวกับสารเจือปนที่ผสมอยู่ในทองแดง กลายเป็นสารประกอบออกไซด์และลอยขึ้นมาตามฟองอากาศเป็นตะกอนที่ผิวด้านบน ง่ายต่อการกวาดออก การพอร์มตัวของตะกอนหรือสแลกอาจใช้ทรายซิลิกาใส่ลงไปเพื่อให้จับตัวง่ายขึ้น จากการพ่นอากาศลงไปในทองแดงหลอมละลายอาจทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆเหลืออยู่ในทองแดงหลอมละลาย ดังนั้นอาจใช้ก๊าซ ไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซมีเทน โพรเพน หรือก๊าซผสมระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับ ไฮโดรเจนซึ่งได้มาจากธรรมชาติเป่าลงไปในทองแดงหลอมเหลวพร้อมการกวนเพื่อไล่ก๊าซต่างๆ

2) การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า วิธีการทำให้โลหะทองแดงบริสุทธิ์โดยใช้กระแสไฟฟ้า จะประกอบด้วยแผ่นทองแดงแอโนด แผ่นทองแดงแคโทด และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเริ่มจากการนำทองแดง Blister มาหลอมและกำจัดสารมลทิน เช่น เหล็กและกำมะถัน ออกก่อน จากนั้นนำมาหล่อเป็นแผ่นทองแดงแอโนด ซึ่งขนาดของแผ่นจะขึ้นอยู่กับขนาด ของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (โดยทั่วไปจะมีน้ำหนัก 150-200 กิโลกรัม) สำหรับแผ่นทองแดง แคโทดจะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ที่มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ใกล้เคียงกับแผ่นทองแดงแอโนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ได้แก่ ทองแดงซัลเฟตและกรดกำมะถันประมาณ 12-20% หรือมีความเข้มข้นของทองแดงซัลเฟต 40-50 กรัมต่อลิตรและกรดกำมะถัน 100-200 กรัมต่อลิตร เพื่อเพิ่มสภาพตัวนำไฟฟ้า อุณหภูมิของสารอิเล็กโทรไลต์จะอยู่ที่ 60-65 °C ส่วนอิเล็กโทรไลต์เซลล์จะทำจากคอนกรีตหนาและบุด้วยยางหรือไวนิลพลาสติก ภายในบ่อจะวางแผ่นทองแดงแคโทดและแอโนดไว้สลับกันมีระยะห่างประมาณ 10 เซนติเมตร ที่ด้านบนจะยึดติดกับบัสบาร์ของขั้วบวกและลบ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นกระแสตรง 10,000-20,000 แอมแปร์ ความต่างศักย์ 100-250 โวลต์ และมีความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า 100-500 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การแยกโลหะทองแดงด้วยกระแสไฟฟ้าจะใช้หลักการของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยมีขั้วแอโนดและแคโทดแช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหรือทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด โลหะที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกกับอิเล็กตรอน และเมื่อทองแดงไอออนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดจะให้อิเล็กตรอนกับขั้วแคโทดซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าวิ่งจากขั้วแคโทดไปยังแอโนด และทองแดงไอออนจะเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะทองแดงเกาะบนผิวของทองแดงแคโทด เมื่อทองแดงมาจับบนแผ่นแคโทดในปริมาณที่มากพอจะเอาขึ้นมาเพื่อลอกเอาโลหะทองแดงบริสุทธิ์ไปหลอมเป็นโลหะแท่ง หรือส่งจำหน่ายในรูปของทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การผลิตโลหะทองแดงจากเศษโลหะ

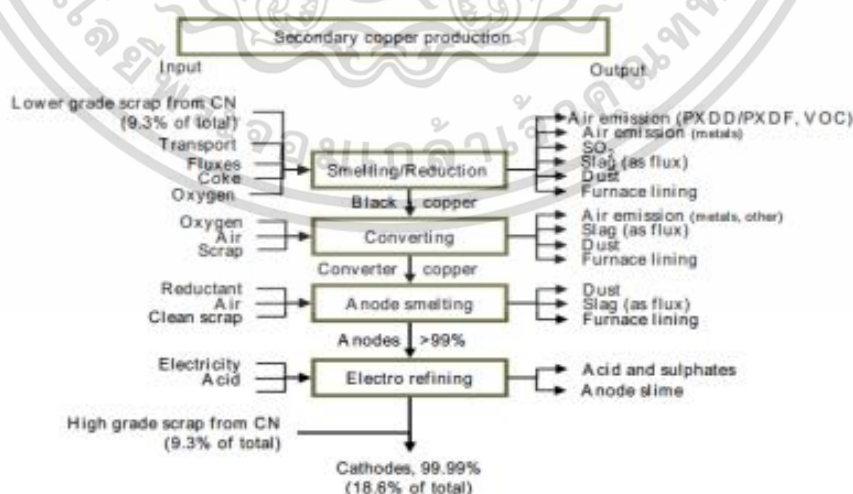
เศษโลหะทองแดงที่นำมาผลิตเป็นโลหะทองแดง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ เศษโลหะทองแดงใหม่ เป็นเศษโลหะที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม (Returned Scrap) และโรงงานแปรรูปโลหะ เช่น โรงกลึงเจาะ ไส หรือโรงหล่อ เป็นต้น และเศษโลหะทองแดงเก่า (Obsolete Scrap) เป็นเศษโลหะจากร้านค้าเศษโลหะ และโลหะที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น ลวดทองแดง สายไฟ ชิ้นส่วน ยานยนต์ท่อทองแดง เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น กระบวนการผลิตโลหะทองแดงจากเศษโลหะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1) การเตรียมวัตถุดิบ เป็นการแยกเศษโลหะทองแดงตามปริมาณธาตุผสมที่มีอยู่ในเศษ ทองแดง และการทำความสะอาดเอาสิ่งปนเปื้อนออกจากเศษโลหะ การแยกและเตรียม เศษโลหะทองแดงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแยกด้วยมือ การใช้เครื่องจักร การเตรียมเศษโลหะด้วยความร้อน เช่น การอบสายไฟเพื่อกำจัดฉนวนที่หุ้มทองแดงออก และการเตรียมเศษโลหะด้วยสารเคมี เช่น การแยกทองแดงจากตะกรัน ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะสำหรับตะกรันที่มีเนื้อทองแดงปริมาณมาก

2) การหลอมโลหะทองแดง เป็นการใช้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะทองแดงในเตาซึ่งอาจใช้เตาพ่นลม เตาหมุน เตาอน หรือเตาไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโลหะทองแดง สำหรับทองแดงที่หลอมในเตาพ่นลมจะมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80-90 ในขณะที่ทองแดงที่หลอมด้วยเตาอนจะมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99

3) การปรับส่วนผสม ได้แก่ การเติมธาตุชนิดต่างๆเข้าไปในโลหะทองแดงหลอมเหลว เพื่อให้มีส่วนผสมที่ตรงตามความต้องการใช้งาน

4) เมื่อได้โลหะทองแดงหลอมเหลวที่ปรับปรุงคุณภาพเรียบร้อยแล้ว จะนำไปเทลงในแบบหล่อเป็นโลหะแท่งเพื่อจำหน่ายให้ลูกค้าต่อไป



รูปที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตทองแดงจากเศษโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ใน **China and Global Markets: Copper Supply Chain Sustainable Development**, International Institute for Sustainable Development นำไปใช้

2.3 ถ่านกัมมันต์ (ฉวีวรรณ, 2562)

ถ่านกัมมันต์ หรือคาร์บอนกัมมันต์มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษคือ Activated Carbon หรือ Activated Charcoal คือถ่านที่ต้องนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือวิธีทางกายภาพ ก่อน เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จำนวนมหาศาล โดยขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ เมื่อมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำให้การดูดซับของโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2.4 เป็นแบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโมเลกุลขนาดต่างๆ



รูปที่ 2.4 เป็นแบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์
ที่มา: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf

2.3.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ผงถ่านกัมมันต์ (Powdered Activated Carbon) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยารักษาโรค สารเคมี ยางรถยนต์โครงสร้าง อาคาร เหมืองแร่ บำบัดน้ำเสีย และการกรองน้ำ เม็ดถ่านกัมมันต์ (Granular Activated Carbon) ใช้ในการกรองอากาศเสีย อุตสาหกรรมสารเคมีและเวชภัณฑ์ยานยนต์ใช้ในการ ถ่ายเทพลังงานความร้อน และการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ และถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded Activated Carbon) ใช้ในการกำจัดสารเคมีที่มีพิษ ตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

2.3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถใช้วัสดุใดๆก็ได้ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เปลือกไม้ไม้ไผ่ ถ่านหิน กะลามะพร้าว ฯลฯ ซึ่งกระบวนการผลิตมี 2 วิธีคือ

1) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Reactivation) เป็นการนำถ่านที่ผ่านการเผาไหม้ในสภาพ อับอากาศ หรือจำกัดอากาศทำให้มีออกซิเจนน้อย มากระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิกระตุ้น (Activation Temperature) ประมาณ 600-950 องศาเซลเซียส ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมาก เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในทางอ้อม ทั้งยังไม่สามารถควบคุมสมบัติของถ่านกัมมันต์ให้คงที่ได้ รวมถึงพื้นที่ผิวและรูพรุนเกิดในปริมาณน้อย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งที่ ไม่มีเหตุแต่บังเอิญหา และต้องอย่างอื่นเองใจของเอกสารทุกครั้งที่นำไปใช้

2) การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation) เป็นการเปลี่ยนวัตถุดิบโดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 450-900 องศาเซลเซียส ในภาคอุตสาหกรรมนิยมผลิตถ่านด้วยวิธีนี้มากกว่า วิธีกระตุ้นทางกายภาพเนื่องจากใช้ความร้อนและเวลาในการผลิตน้อยกว่า แต่บางครั้งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตวิธีนี้อาจมีปัญหาเรื่องสารตกค้างได้เช่น การพบสังกะสีตกค้างในผลิตภัณฑ์ สังกะสีเป็นโลหะหนักเมื่อเข้าสู่ร่างกายมากขึ้น เกิดการสะสมที่บริเวณตับและไตทำให้โครโมโซมผิดปกติ เสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง

2.4 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดักจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้เกาะจับและติดบนผิว เป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ ซึ่งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวมีตัวถูกดูดซับมาเกาะเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียง ขนาด เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) การดูดซับทางกายภาพ เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและโมเลกุลบนพื้นผิวตัวถูกดูดซับ ซึ่งแรงดูดค่อนข้างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) เกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด ได้แก่ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับคายความร้อนค่อนข้างน้อย การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานในระบบลดลงเพื่อให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

2) การดูดซับทางเคมี มีลักษณะคล้ายการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีมีการสร้างพันธะของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวตัวดูดซับ มีการสร้างพันธะไอออนิกหรือโควาเลนต์ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงเป็นผลให้การดูดซับส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้ เมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพที่ผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีเกิดบริเวณพื้นที่จำเพาะเจาะจงและเกิดที่อุณหภูมิสูง

2.4.2 กลไกการดูดซับ

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

เอกสารนี้เผยแพร่ภายใต้ลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาที่ไม่สามารถตรวจสอบได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.4.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

1) พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นเพราะถ้าขนาดของสารดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับก็ต่ำลง

2) ขนาดของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับ ในกรณีที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าวัสดุดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในการนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัสดุ

3) เคมีที่ผิวหน้าหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) เฉพาะที่อยู่บนผิววัสดุดูดซับจะมี สมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรด ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิก ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น

2.4.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นการชี้ถึง ปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล เมื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์และจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

3) ความมีขั้วของโมเลกุลความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

4) ความสัมพันธ์ของขนาดโมเลกุลความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับขนาดของรูพรุน ถ้าขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า ขนาดของสารที่ถูกดูดซับโมเลกุลก็ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุน การดูดซับโดยรูพรุนจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใด เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำ เข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงกรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.4.3.4 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

2.4.3.5 ผลของความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มีไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

2.5 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron)

2.5.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

เหล็ก (Iron) โดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0 +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ หรือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น ได้แก่

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

2) เหล็กหล่อ (Cast iron) คือเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2% ขึ้นไปใช้ประโยชน์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เหล็กดิบ (Pig iron) คือเหล็กที่นำมาจาก การขุดสินแร่ดิบโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งอื่นเจือปนอยู่โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือเฟอร์รัสไอออน (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



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว ตามสมการที่ 2.3 ดังนี้



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ต่อไปนี้



สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic Region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษหิน ดิน ทราเยปนอยู่ด้วยเสมอ (วุฒิชัย, 2545; วรณวิภา, 2547; ศุทธวดี, 2548; อุทัย, 2548) ส่วน $FeOOH$ จะมีลักษณะเป็นตะกอนผลึก สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าเลนซ์ศูนย์

โลหะสถานะออกซิเดชันศูนย์ มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically Stable Form) เช่น เหล็กกล้าเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) จะถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมากเมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือ จะสามารถเกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอน (Electron: e^-) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic Region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (Metal Cation) และอิเล็กตรอนจะถูกนำไป อีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic Region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า

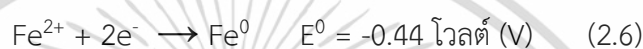
เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สถานะเดิมของมัน เช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของแร่เหล็ก เป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่มีสภาวะที่เหมาะสม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

การกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็กกล้าเลนซ์ศูนย์เป็นการผุกร่อนหรือการสลายตัวตามกลไกของธรรมชาติ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation – Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันลดลงจะเรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และปริมาณอิเล็กตรอนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์จะมีจำนวนเท่ากันในสมการที่ดุลแล้ว เลขออกซิเดชันที่เพิ่มจะเท่ากับเลขออกซิเดชันที่ลดสารตัวใดจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน มาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard Reduction Potential) ใช้สัญลักษณ์ E^0_{red} หรือ E^0 ซึ่งคือความสามารถ ในการให้อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาในแต่ละครึ่งเซลล์ โดยครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายบวก และครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายลบ (ศุภทวดี, 2548) ดังนั้น ปฏิกิริยารีดอกซ์ต้องประกอบไปด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและ ปฏิกิริยารีดักชัน คือมีการ

ถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron Transfer) ระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่เหล็กกล้าเลนซ์ศูนย์จะทำหน้าที่
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในที่เห็นเป็นเชิงธุรกิจหรือในทางการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) และมีสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor)

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนประกอบด้วยครึ่งปฏิกิริยา (Half Reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชัน โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของเหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วบวก (Anode) โลหะเหล็กจะสลายตัวกลายเป็นเหล็กเฟอร์ส (Fe^{2+}) และให้อิเล็กตรอนส่วนปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) คือกลไกของการรับอิเล็กตรอน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) และสามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ขึ้นกับตัวรับอิเล็กตรอนทำให้การกัดกร่อนของเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.6 (Zhang, Liu et al., 2010; Xi et al., 2011)



จากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของเหล็กเท่ากับ -0.44 โวลต์ แสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันนั้น Fe^0 จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และ Fe^{2+} จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะมีสารปนเปื้อน ที่ต้องการกำจัดเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) และตัวถูกรีดิวซ์ (Reduced) ตามลำดับ เนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ของโลหะ ทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอกหากมีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

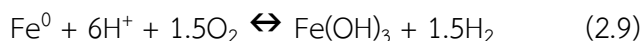
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของเหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดสารปนเปื้อนสามารถเกิด ได้ 3 รูปแบบ (วุฒิชัย, 2545) ดังนี้

- 1) การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเหล็ก คือ เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของเหล็ก
- 2) การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกลางอื่น ได้แก่ เฟอร์สไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อน ของเหล็กและจะละลายอยู่ในน้ำทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์แต่ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า
- 3) การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจน (H_2) จากการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาที่จะทำให้ไฮโดรเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้ต้องอยู่ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นผิวของเหล็กเกิดการผุกร่อนหรือมีโลหะอื่นอยู่ในกระบวนการซึ่งจะทำให้ไฮโดรเจนเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+)

ตัวอย่างกลไกการเกิดการกัดกร่อน สามารถอธิบายโดยใช้เซลล์กัดกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Corrosion Cell) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ก๊าซ

ไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.9 ตามลำดับ หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจน ไอออนจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ตัวอย่างของเซลล์กักกร่อนไฟฟ้าเคมีเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วบวก จะเกิดตามสมการที่ 2.7 ถึง 2.9 ดังต่อไปนี้ (วุฒิชัย, 2545)



ปฏิกิริยากักกร่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้ค่าพีเอชของระบบกักกร่อนเพิ่มขึ้น (Powell et al., 1995 อ้างอิงในวุฒิชัย, 2545)

2.5.3 จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับเวลา เรียกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Of Reaction) และการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือจลนพลศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics) เป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารในขณะที่เกิดปฏิกิริยา และผลของการเปลี่ยนแปลงที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้ทราบถึงลำดับขั้นของปฏิกิริยา เรียกว่า กลไกปฏิกิริยา (Reaction Mechanism) ในการศึกษาผลจากความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นการศึกษาถึงกฎอัตราและลำดับของปฏิกิริยา (Sawyer et al., 2003)

กฎอัตรา (Rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.10

$$\text{อัตรา } (r) = k[\text{A}]^n [\text{B}]^m \quad (2.10)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ณ อุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้น ค่า k จะเปลี่ยนเมื่อมีการแปลงอุณหภูมิ

$[\text{A}]$ และ $[\text{B}]$ เป็นความเข้มข้น (M/L^3) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

n และ m เป็นเลขยกกำลังตามที่สารเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งมีค่า = 0, 1/2, 1, 2, 3, ...

ลำดับของปฏิกิริยา (Order Of Reaction) คือ ผลรวมของกำลังของสารที่ปรากฏในกฎอัตรา เช่น เมื่อผลรวมของ n และ m มีค่าเท่ากับศูนย์จะเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เท่ากับหนึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และเท่ากับสองเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

2.5.4 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในเอกสารนี้ การดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของไม่ว่ากั มัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิว

ของของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์เป็นสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate คือสารดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ (Sawyer et al., 2003; วุฒิชัย, 2545) ได้แก่การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) การดูดซับของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนผิว แต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และเกิดเป็นชั้นทับกันหลายๆชั้นที่ผิวของสารดูดซับ อย่างไรก็ตาม การดูดซับทางกายภาพ โดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นคือโมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดซับได้โดยง่าย การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมี ปกติโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะก่อชั้นบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดซับก็จะหมดลง การดูดซับทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดซับให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน การดูดซับแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ก็รวมอยู่ในกระบวนการนี้ด้วย ในที่นี้ไอออนของสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตย์โดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนที่มีประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดยิ่งเล็กลงก็ยิ่งมีความสามารถในการดูดซับที่แข็งแรงมากขึ้น

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ (Sawyer et al., 2003; อุทัย, 2548; ปรีนทร, 2551) ได้แก่ การกวนผสม (Mixing) ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size And Surface Area Of Adsorbent) โดยที่ขนาดจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ เป็นผลให้ความจุของการดูดซับต่างกัน หมายความว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ (Nature Of Adsorbate) คุณสมบัติของสาร

แต่ละชนิดที่ต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย โครงสร้างโมเลกุล และขนาดของสารหรือโมเลกุล จะเป็นผลให้สารแต่ละชนิดดูดซับได้ไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่า ขนาดของตัวดูดซับเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้ ค่าพีเอช (pH) ของสารละลายมีผลต่อการแตกตัวของสาร การแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ โดยมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ดังนั้นพีเอชจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ อุณหภูมิ (Temperature) ของระบบมีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง และสุดท้ายระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ (Contact Time) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา คือเมื่อเวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตาม แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งซึ่งความสามารถในการดูดซับคงที่ คือ ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

2.5.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) เป็นจุดสมดุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเป็นลักษณะเฉพาะของระบบซึ่งเกี่ยวกับปัจจัยของการดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นสารดูดซับ สารถูกดูดซับตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายละลาย ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และการศึกษาดังกล่าวจะใช้ เส้นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ เรียกว่า ไอโซเทอร์ม (Isotherm) ซึ่งอาศัยสมการคณิตศาสตร์ในการอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น (Sawyer et al., 2003; อุทัย, 2548; ปรีนทร, 2551) ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) โดยอาศัยสมการเพื่อพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม สำหรับปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 (Zhang, Liu et al., 2010)

$$q = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \quad (2.11)$$

โดย q คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

C_i , C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและที่สมดุล (mg/L) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง V คือ ปริมาณของสารละลาย (L) W คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (g) เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ อาศัยสมการไอโซเทอร์ม คือเมื่อคำนวณ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับได้ จากนั้นนำค่าที่ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient Of Determination: R²) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า จาก การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด สูงสุด โดยไอโซเทอร์มที่นิยมใช้กันได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) (วรรณวิภา, 2547; สุทธิสา และคณะ, 2551; Arancibia-Miranda et al., 2014) ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm) (Liu, Bei, and Zhou, 2009; อุทัย, 2548) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough Surface)

2.5.6 การใช้ประโยชน์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent Iron: ZVI) เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับ บำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อมเพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรงและมีศักย์รีดักชัน (Reduction Potential) สูง รวมถึงไม่เป็นพิษและมีราคาถูก (Gillham and O'Hannesin, 1992 อ้างอิงใน Yossapol, 1999) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วย ZVI สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ZVI ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Yossapol (1999) ได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของ ZVI ในอดีตว่า ได้มีงานวิจัย เกี่ยวกับการใช้ ZVI ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบฮาโลเจน เต็ดอะลิฟาติก (Halogenated Aliphatic Compounds) เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride: CT) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) เป็นต้น สารประกอบฮาโลเจนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbon Compounds) เช่น สารกำจัดศัตรูพืช และสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) เป็นต้น ไนเตรท (Nitrate) โลหะ (Metals) เช่น UO_2^{2+} MoO_4^{2-} TcO_4^- และ CrO_4^{2-} เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูป (Transformation) คือ การเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษน้อยลง เช่น เปลี่ยนจากคาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นมีเทน (Methanes) เป็นต้น แต่ถึงอย่างไรกลไกของการเกิดปฏิกิริยายังคงมีความไม่แน่นอน ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้เสนอเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วย ZVI ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หรือปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous Reaction) โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) เข้าทำปฏิกิริยากับ ZVI ที่ผิวหน้าอย่างสมบูรณ์ การอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นการเกิดกลไกทางไฟฟ้าเคมี นั่นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวให้อิเล็กตรอนและตัวรับโดยที่ ZVI จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยมีสารปนเปื้อนหรือสารตัวอื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน นอกจากนี้การลดการปนเปื้อนของน้ำยังอาศัยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือ

กระบวนการแยกสารที่ต้องการกำจัดออกจากสารละลายของเหลว โดยการให้สารละลายผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะเกิดกลไกการทางเคมีขึ้น

การใช้ประโยชน์จาก ZVI ซึ่งทำให้หลังจากนั้นมีการวิจัยออกมาจากต่อเนื่อง โดยจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า ZVI สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งที่ได้รับความสนใจและมีกระบวนการบำบัดที่ค่อนข้างชัดเจน จะสามารถจำแนกตามชนิดของสารปนเปื้อนได้ดังนี้

1) โลหะหนัก (Heavy Metals)

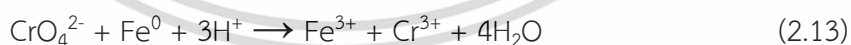
การบำบัดโลหะหนักด้วย ZVI ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่ส่วนใหญ่จะบำบัดโครเมียมและสารหนู กลไกในการย่อยสลายคือการเปลี่ยนรูป (Transformation) จากสารที่เป็นพิษ (Toxic) ให้เป็นสารที่เป็นพิษน้อยลงหรือไม่เป็นพิษเลย (Non-Toxic) หรือกลไกการดูดซับ (Adsorption) บนพื้นที่ผิวของ ZVI ซึ่งก็ขึ้นกับโลหะหนักแต่ละชนิด

การกำจัดโครเมียมด้วย ZVI ส่วนใหญ่ใช้กำจัด Cr(VI) เนื่องจากมีความเป็นพิษให้เป็น Cr(III) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) ตามสมการที่ 2.12 (Cissoko, Zhang, Zhang, and Xu, 2009)



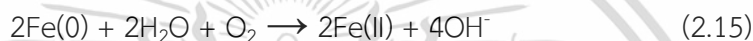
เมื่อศักย์ไฟฟ้ารีดักชันลดลงพร้อมกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของ Cr(VI) และกลายเป็น Cr(III) ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบ Cr(OH)₃ ขึ้นในที่สุด

แต่ในความเป็นจริง กลไกในการกำจัด Cr(VI) ด้วย Fe⁰ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อเกิดแร่ที่ผิวหน้าของเหล็ก เช่น แร่เกอไทต์ (Goethite: α-FeOOH) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide: γ-Al₂O₃) ซึ่งจะเกิดที่พีเอชของสารละลายที่ต่ำ ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 (Lee, Lim, Lee, and Park, 2003)



สารหนู (Arsenic) ที่ปนเปื้อนในน้ำและมีความเป็นพิษมักพบในรูปอาร์เซนไนท์ [As(III)] และอาร์เซนเตต [As(V)] ลักษณะการเกิดของสารทั้งสองชนิด As(V) จะมีความเสถียรในสภาวะที่มีออกซิเจนและค่าพีเอชตามธรรมชาติ โดยจะแสดงในรูปที่มีออกซิเจนประกอบอยู่ด้วย (Oxyanionic Forms) ได้แก่ H₃AsO₄, H₂AsO₄⁻ และ HAsO₄²⁻ ส่วน As(III) จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนลดลง และค่าพีเอชต่ำกว่า 9 โดยจะเกิดในรูป H₃AsO₃ เนื่องจาก Fe(0) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) อย่างไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่ง Fe(0) จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) ได้ Fe(II) และก๊าซไฮโดรเจน (H₂) การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง As(V) - As(III) และ As(III) - As(0) สามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่า H₂O - H₂ แสดงให้เห็นว่า As(V) และ As(III) สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ได้ดีว่าน้ำ ดังนั้น As(V) และ As(III) สามารถถูกรีดิวซ์ (Reduced) ได้ด้วย Fe(0) (Bang, Korfiatis, and Meng, 2005) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กำจัดสารหนูในรูป As(III) โดยใช้การออกซิเดชัน (Oxidation) ด้วย ZVI ร่วมกับการกรองด้วยทราย (Leupin, and Hug, 2005) ดังนี้เริ่มด้วยการเกิด Fe(II) จากการกัดกร่อนของ Fe(0) ดังสมการที่ 2.15 การออกซิเดชันของ Fe(II) ด้วยออกซิเจนสามารถทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์อินเตอร์มีเดียต (Oxidizing Intermediates) ได้แก่ $\cdot\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}_2$ และ $\cdot\text{OH}$ หรือแม้กระทั่ง Fe(IV) ซึ่งสามารถเกิดการออกซิเดชันของ As(III) กลายเป็น As(V) ตามสมการที่ 2.16 และ 2.17 จากทำการกรอง As(V) ด้วยทรายต่อไป



การปนเปื้อนของโลหะหนักตัวอื่นๆ เริ่มมีงานวิจัยออกมา เช่น นิกเกิล (Nickel) ทองแดง (Copper) และซีลีเนียม (Selenium) ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดได้ด้วย ZVI (Komnitsas et al., 2007; Yoon, Kim, Bang, and Kim, 2011; Calabrò, Moraci, and Suraci, 2012) นอกจากสารปนเปื้อนที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ยังมีสารปนเปื้อนที่น้ำหนักกว่าเลขศูนย์มาทำการบำบัด ซึ่งเริ่มมีการศึกษาวิจัยมากขึ้น เช่น ฟีนอล (Phenol), เปอร์คลอเรต (Perchlorate) เป็นต้น (Shimizu, Tokumura, Nakajima, and Kawase, 2012) ทั้งนี้ในส่วนของโลหะหนักยังมีการศึกษาวิจัยที่แพร่หลายเพียงไม่กี่ชนิด ได้แก่ โครเมียมและสารหนู แต่ในความเป็นจริงโลหะหนักที่พบว่าการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินบ่อยครั้ง มักมีหลายชนิดมากกว่านั้น เช่น แคดเมียม แมงกานีส สังกะสี ดีบุกและตะกั่ว เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท Science Engineering International Co.,LTD. ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) รุ่น Spectrum GX บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer: AAS) รุ่น AS900 New บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องเขย่าสารละลาย (Orbital shaker) รุ่น SHO-1D ยี่ห้อ Wiseshak ประเทศอังกฤษ
5. เครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Centrifuge) รุ่น 300 ML ยี่ห้อ MRC Scientific Instruments ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
6. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) รุ่น 14H ยี่ห้อ NEY ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. เครื่องกรองลดความดัน (Filter pressure) รุ่น Aspirator A-3S ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
10. เครื่องบด ยี่ห้อ Bosco บริษัท Bosco Engineering ประเทศไทย
11. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
12. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Oven) รุ่น UN 55 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
13. ตู้ดูดควัน (Hood) ยี่ห้อ Flexleb รุ่น FH150/DC ประเทศเยอรมนี
14. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM 11 ประเทศอังกฤษ
15. กระดาษกรอง (Filter Paper) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
16. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buncher Funnel)
17. โถดูดความชื้น (Desiccator)
18. ขวดน้ำกลั่น (Wash Bottle)
19. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ DURAN ประเทศเยอรมนี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. แผ่นทองแดง
2. กรดไนตริก (HNO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK
3. เฟอร์รัส (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade Loba Chemie ประเทศ อินเดีย
4. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศไทย
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
6. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) AR Grade บริษัท QRëC ประเทศนิวซีแลนด์
7. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
8. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, ประเทศอังกฤษ
10. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท European Distribution Center
11. แคลเซียมไนเตรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท European Distribution Center
12. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
13. โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_3HPO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
14. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
15. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง

ชั่งแผ่นทองแดง มา 1 กรัม ละลายใน HNO_3 เข้มข้น เติมน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดงความเข้มข้นประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเจือจางตามความเข้มข้นที่ต้องการใช้ในการทดลอง

3.3 การเตรียมถ่านชีวภาพ (BC)

1. ล้างแกนข้าวโพดด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาด นำไปตากแดดให้แห้ง
2. นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นตัวลง ที่อุณหภูมิห้อง
3. บดถ่านให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh ปล่อยให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.4 การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีโบโรไฮไดรด์รีดักชัน (Ma et al., 2020;

Ahmad et al., 2019) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียม 1 M FeSO₄ ในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมห่านชีวภาพ ปริมาณ 100 กรัมลงในบีกเกอร์ข้อที่ 1 และกวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. หลังจากนั้นไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพร้อมการปั่นกวน
4. เติม 2 M NaBH₄ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยการเติมทีละหยด ภายใต้สภาวะมีไนโตรเจน พร้อมกับปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
5. หยุดการเติมก๊าซไนโตรเจน ทิ้งไว้ข้ามคืนโดยปิดพาราฟิล์มไว้
6. นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอน แล้วนำไปอบในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง ข้อที่ 1-6

3.5 การศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพ (BC) และถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (MBC)

1. วิเคราะห์สัณฐานวิทยา ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดย Scanning Electron Microscopy (SEM) และการกระจายของธาตุบนผิว (SEM-EDS)
2. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวโดย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) Perkin Elmer model Spectrum GX
3. วิเคราะห์ค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) โดยวิธี pH drift method

3.6 การวิเคราะห์ค่า Point of zero charge (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดยวิธี pH drift method (ปรับปรุงจากวิธีของ Khanal et al., 2020)

1. เตรียม 0.01 M NaCl 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรจำนวน 11 ใบ
2. ชั่งถ่าน 0.4 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
3. ปรับ pH สารละลายให้เป็น 2-12 โดยเติม 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH เรียกว่า pH เริ่มต้น
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH ด้วยเครื่อง pH จะได้ค่า pH สุดท้าย
5. นำค่า pH ที่บันทึกไว้ ไปใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นและ pH สุดท้าย

3.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

1. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 150 มิลลิลิตร
 2. ชั่งถ่านชีวภาพแม่เหล็กในปริมาณที่ต้องการศึกษา
- เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปรับพีเอชของสารละลาย ด้วย 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH ให้ได้ตามค่าที่กำหนด
4. เขย่าด้วยความถี่ 120 รอบ/นาที ตามระยะเวลาที่กำหนดในตารางที่ 3.1
5. นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงด้วยเครื่อง AAS
6. ทดลองทำทั้งสิ้น 3 ซ้ำ
7. สภาวะที่ทำการทดลองเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ทำการทดลอง

ชุดการทดลอง	สภาวะที่ทำการทดลอง	หมายเหตุ
การทดลองชุดที่ 1 pH ของสารละลายเริ่มต้น 2, 3, 4, 5, 7, 9	ความเข้มข้นสารละลายทองแดง 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ MBC 3 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 180 นาที	วัดความเข้มข้นทองแดง วัดความเข้มข้นเหล็ก
การทดลองชุดที่ 2 ปริมาณ MBC 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที	ความเข้มข้นสารละลายทองแดง 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1	วัดความเข้มข้นทองแดง ข้อมูลใช้ศึกษา แบบจำลองการดูดซับ pseudo-first order, pseudo-second order
การทดลองชุดที่ 3 ความเข้มข้นของน้ำเสีย 50, 200, 300 มิลลิกรัม/ลิตร	pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 ปริมาณ MBC ที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 2 เวลาในการบำบัดเหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 2 ใช้ศึกษาไอโซเทอม	วัดความเข้มข้นทองแดง ข้อมูลใช้ศึกษาไอโซเทอม
การทดลองชุดที่ 4 อุณหภูมิ 33°C, 45°C, 50°C เวลาในการบำบัด 0, 30 นาที	ความเข้มข้นสารละลายทองแดง 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 1 ปริมาณ MBC ที่เหมาะสมจากการทดลองชุดที่ 2	วัดความเข้มข้นทองแดง ข้อมูลใช้ศึกษาอุณหภูมิพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกส์ไอโซเทอมการดูดซับ

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 = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)

$$= \frac{(C_0 - C_t)}{W} \times V$$

q_e = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

$$= \frac{(C_0 - C_e)}{W} \times V$$

C_t = ความเข้มข้นของ Cu ในสารละลาย ณ เวลา t (mg/L)

C_0 = ความเข้มข้นของ Cu ในสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของ Cu ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลาย (L)

W = มวลของตัวดูดซับ (g)

q_m = ปริมาณ Cu ที่ดูดซับสูงสุดต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ (mg/g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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)
 α = อัตราการดูดซับเริ่มต้น (mg/g min)
 β = ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของการครอบคลุมพื้นผิวและพลังงานกระตุ้นสำหรับการดูดซับเคมี (g/mg).
 K_{id} = ค่าคงที่อัตราการแพร่ในอนุภาค ($\text{mg/g min}^{1/2}$)
 K_C = ค่าคงที่สมดุลสะท้อนความสามารถในการดูดซับเพื่อให้ตัวดูดซับและขยายการเคลื่อนไหวของตัวดูดซับภายในสารละลาย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

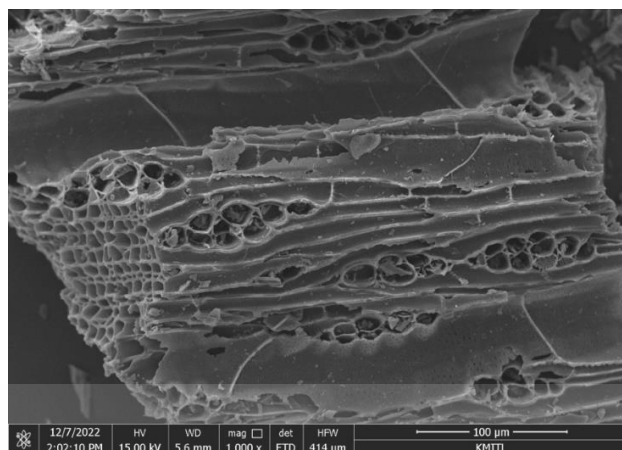
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

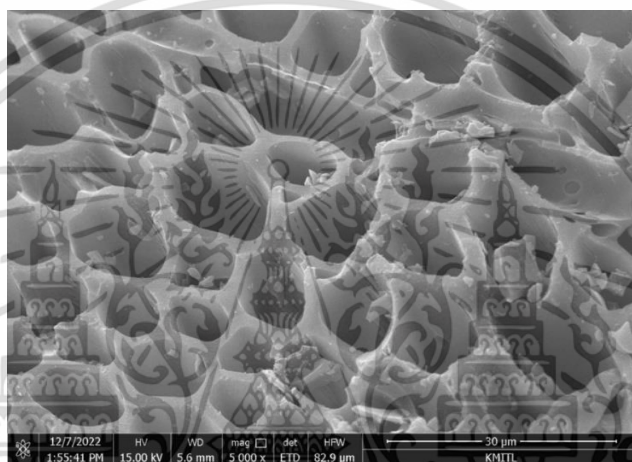
การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ มีขั้นตอนในการศึกษาคือ ศึกษาถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิว วิเคราะห์องค์ประกอบหมู่ฟังก์ชัน การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก การศึกษาการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พีเอช ปริมาณของถ่านชีวภาพ เวลาในการบำบัด ความเข้มข้นของน้ำเสีย และอุณหภูมิในการบำบัด และนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ อันดับของปฏิกิริยา และเทอร์โมไดนามิกส์ ผลการทดลองการศึกษาเป็นดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

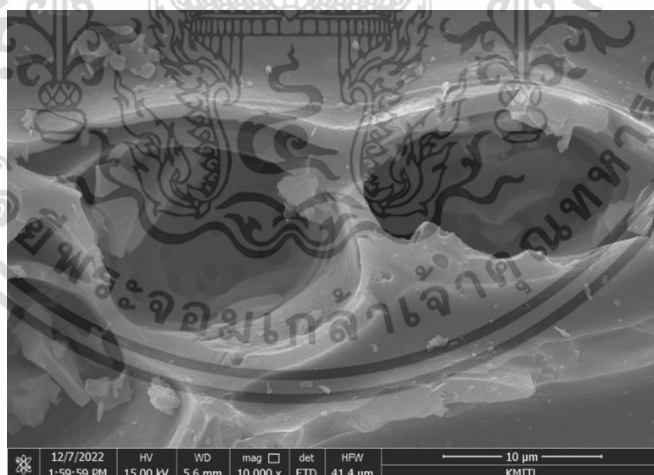
นำถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการถ่ายภาพพื้นผิว รูพรุนของถ่าน และธาตุองค์ประกอบบนผิวของถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ, ถ่านชีวภาพแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 4.1-4.7



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ

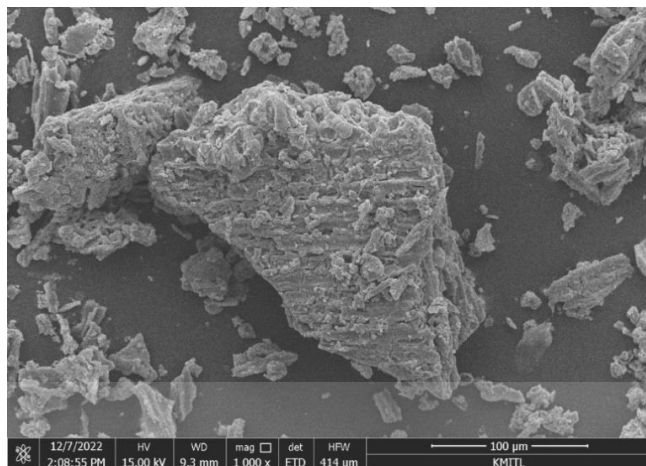
(a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 1,000 เท่า

(b) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 5,000 เท่า

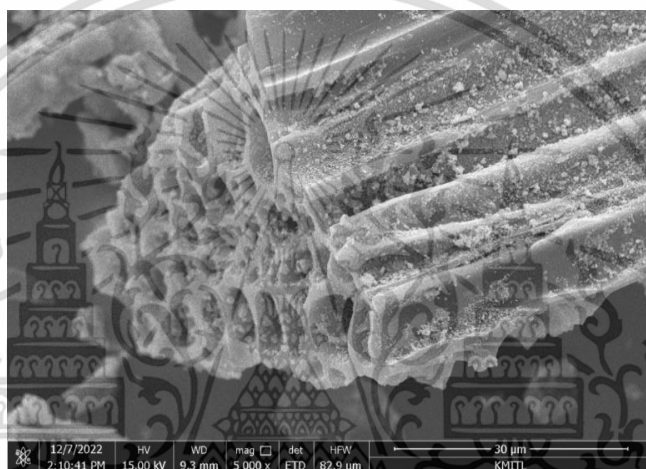
(c) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในข้อมูลต่างๆ ที่ปรากฏในเอกสารนี้ หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

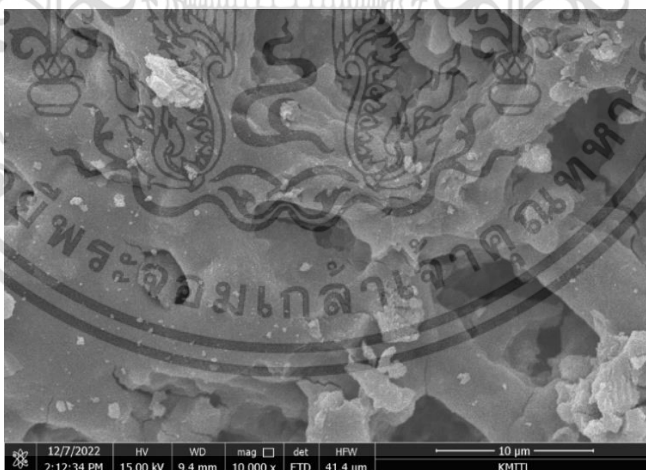
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสถานะแม่เหล็ก

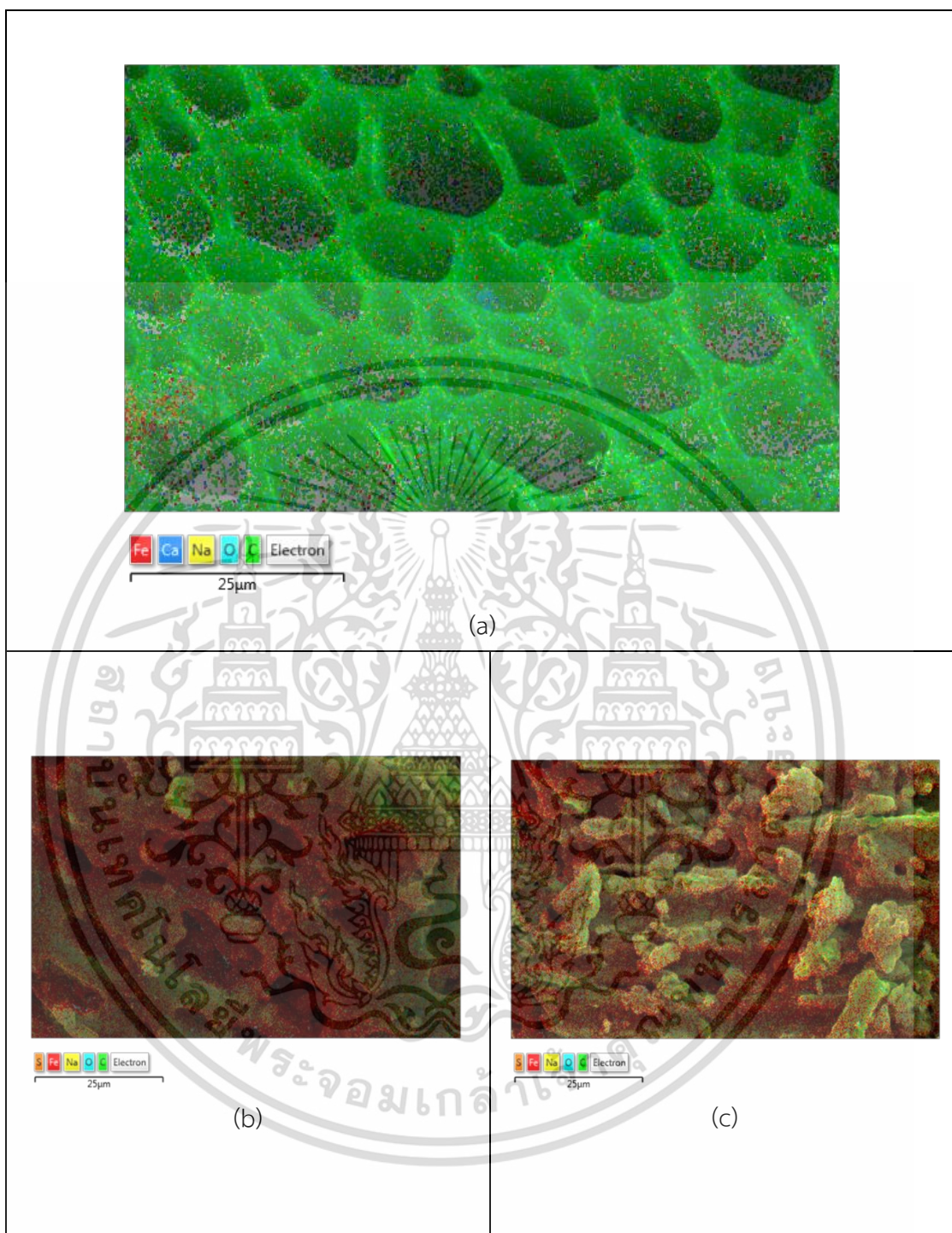
(a) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสถานะแม่เหล็ก กำลังขยาย 1,000 เท่า

(b) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสถานะแม่เหล็ก กำลังขยาย 5,000 เท่า

(c) ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสถานะแม่เหล็ก กำลังขยาย 10,000 เท่า

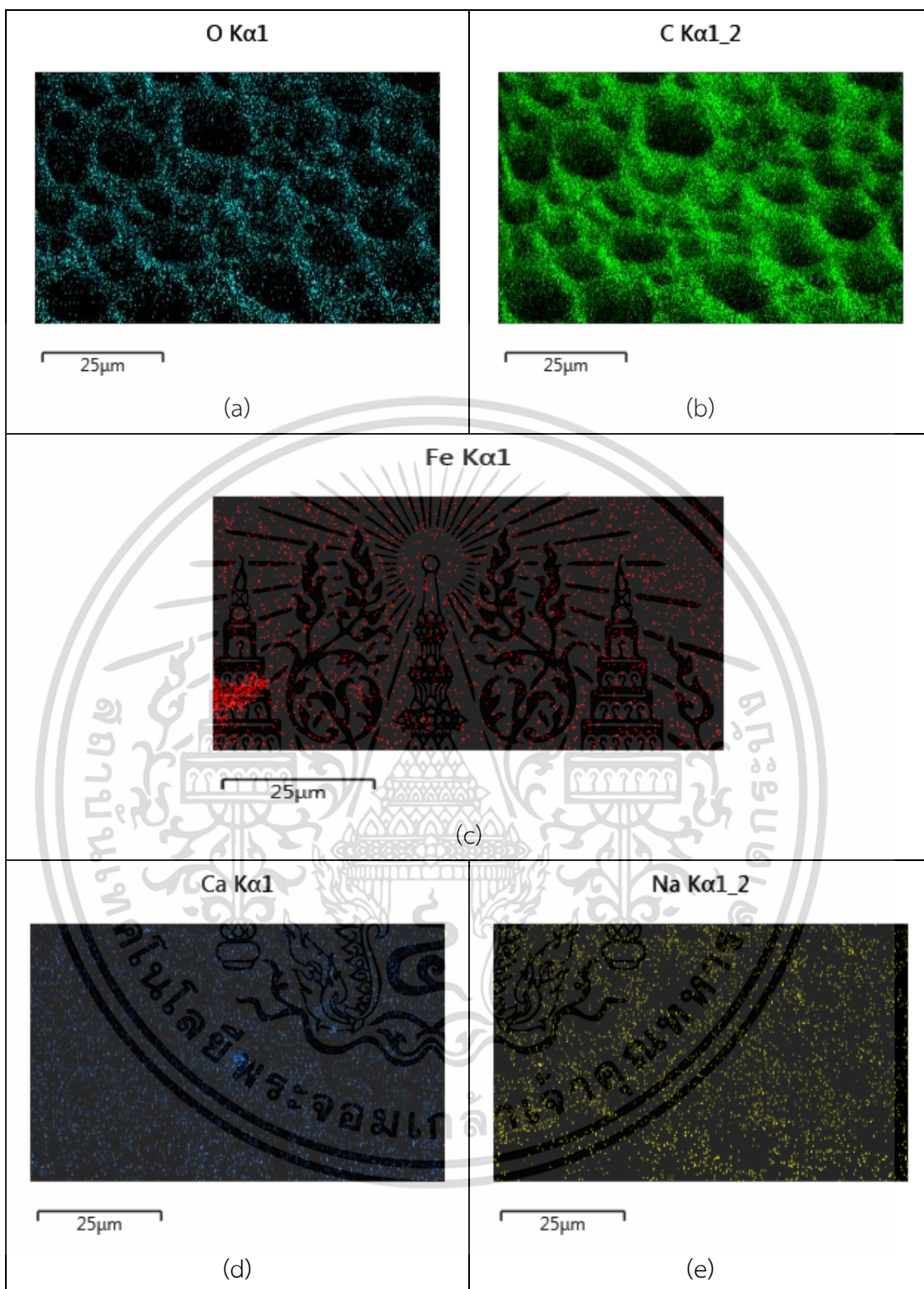
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการแข่งขันเพื่อการพัฒนาคน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



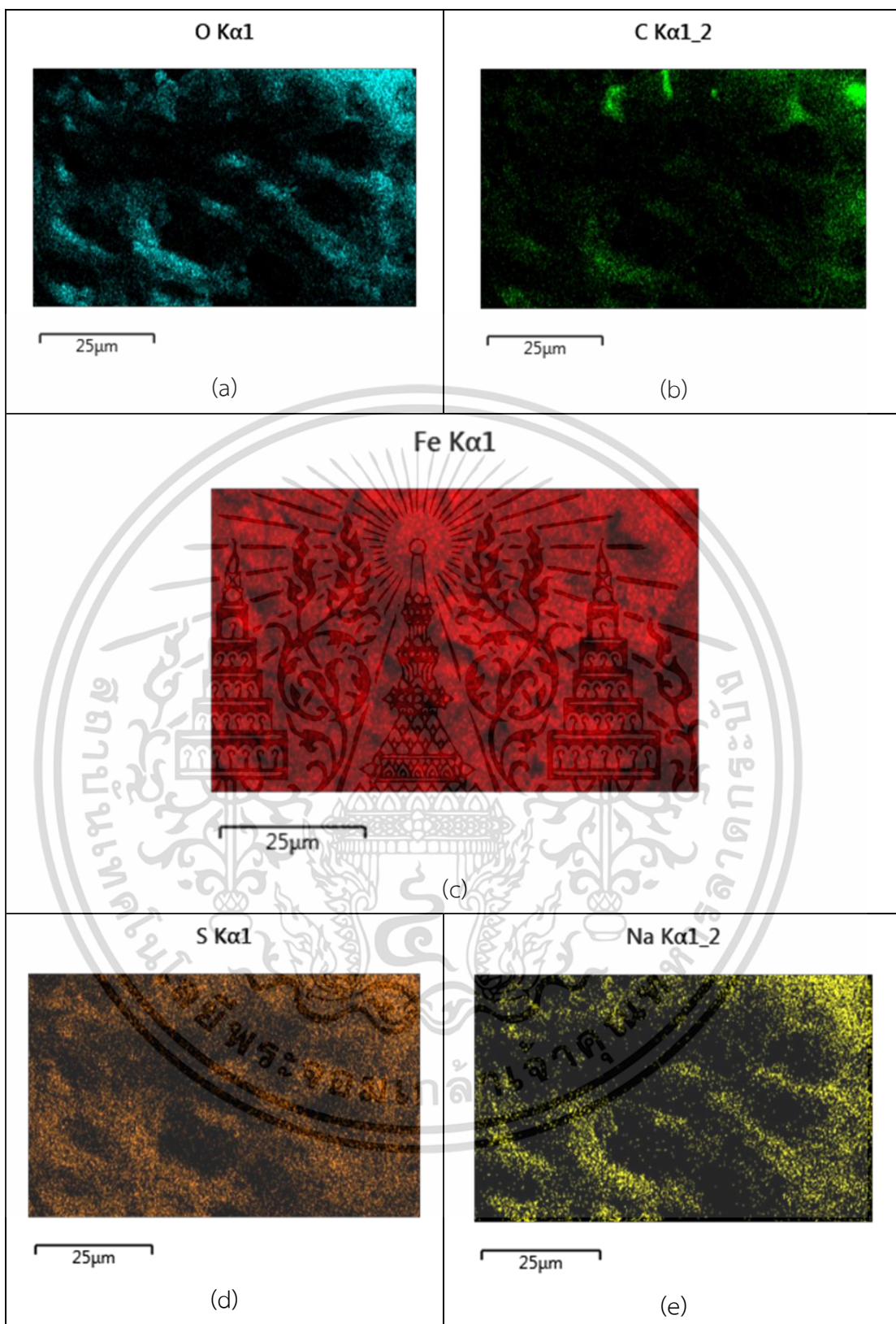
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย EDS ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



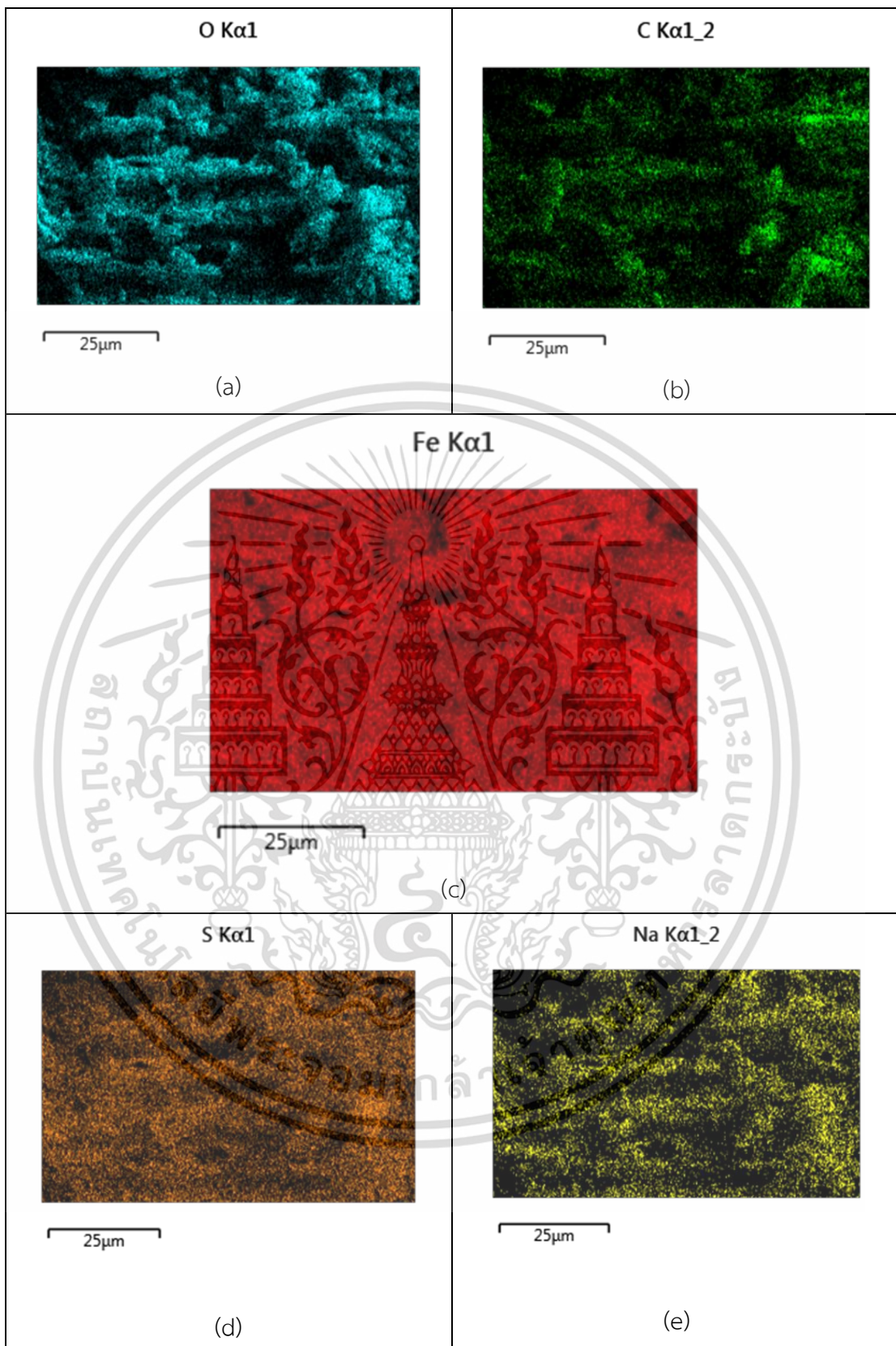
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆบนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) Ca และ (e) Na

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

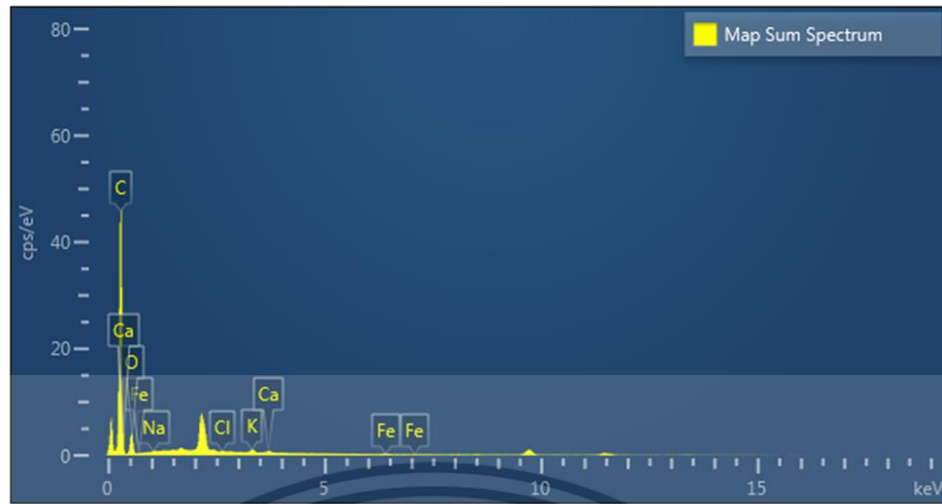


รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย EDS จุดที่ 2 ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก แสดงการกระจายตัวของธาตุชนิดต่างๆ

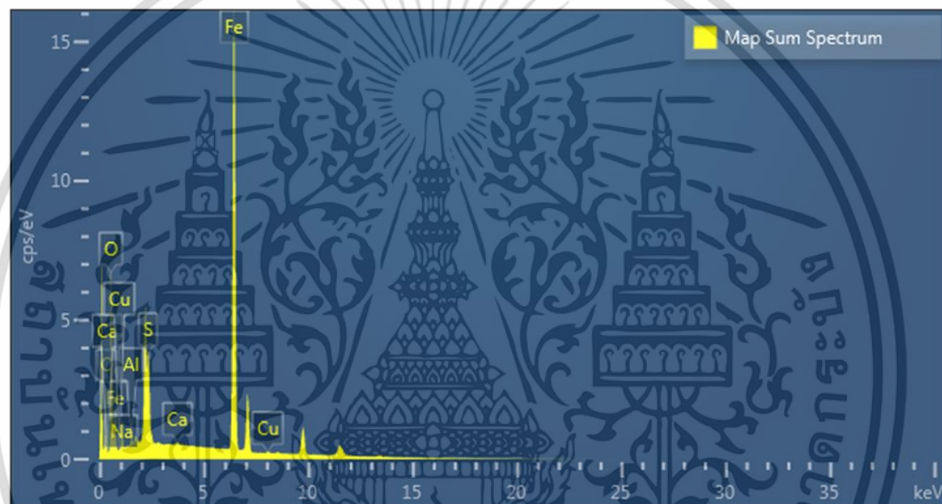
บนผิวถ่าน (a) O, (b) C, (c) Fe, (d) S และ (e) Na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

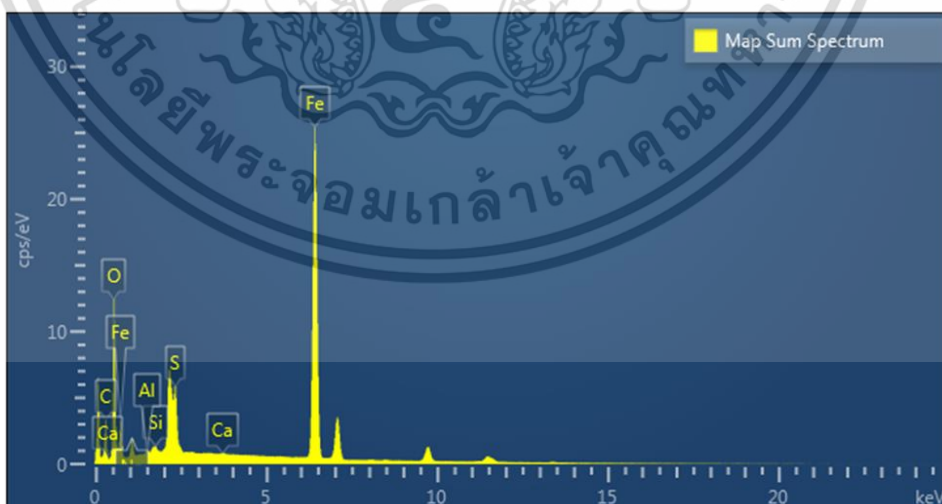
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



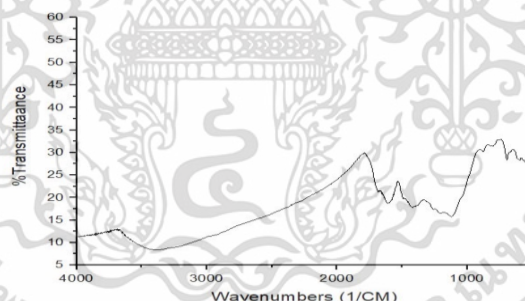
(c)

รูปที่ 4.7 Map Sum Spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ถ่ายจากจุดที่ 1 (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กถ่ายจากจุดที่ 2 โยชนด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

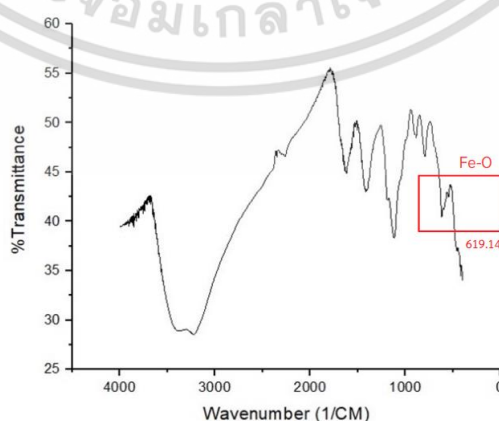
จากรูปที่ 4.1 พบว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะเห็นรูปพรุนชัดเจนและมีลักษณะพื้นผิวขรุขระเพียงเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.2 เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพแม่เหล็ก จะพบรูปพรุนมีขนาดเล็กและพื้นผิวขรุขระมากขึ้น เมื่อถ่ายภาพด้วย EDS ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (รูปที่ 4.3a, 4.4 และ 4.7a) 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 % ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ามีหลักฐานของแม่เหล็กกว่าเลขซีศูนย์กระจายอยู่ทั่วและมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น

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

นำถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบสารโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 4.8



(a)



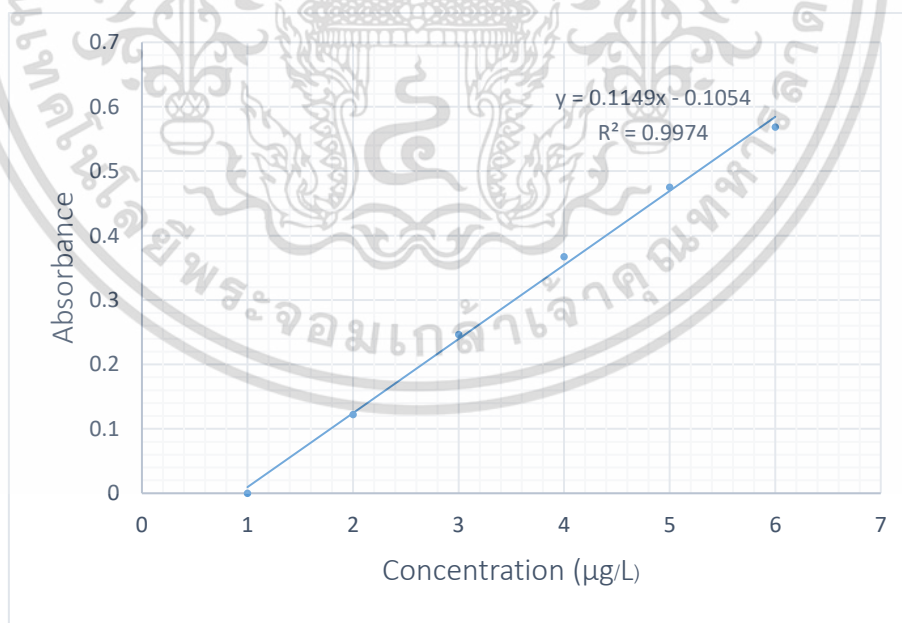
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษ(บ)เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 4.8 FT-IR spectrum ของ (a) ถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

Wavenumbers		หมู่ฟังก์ชัน
ก่อนปรับปรุงคุณภาพ	หลังปรับปรุงคุณภาพ	
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

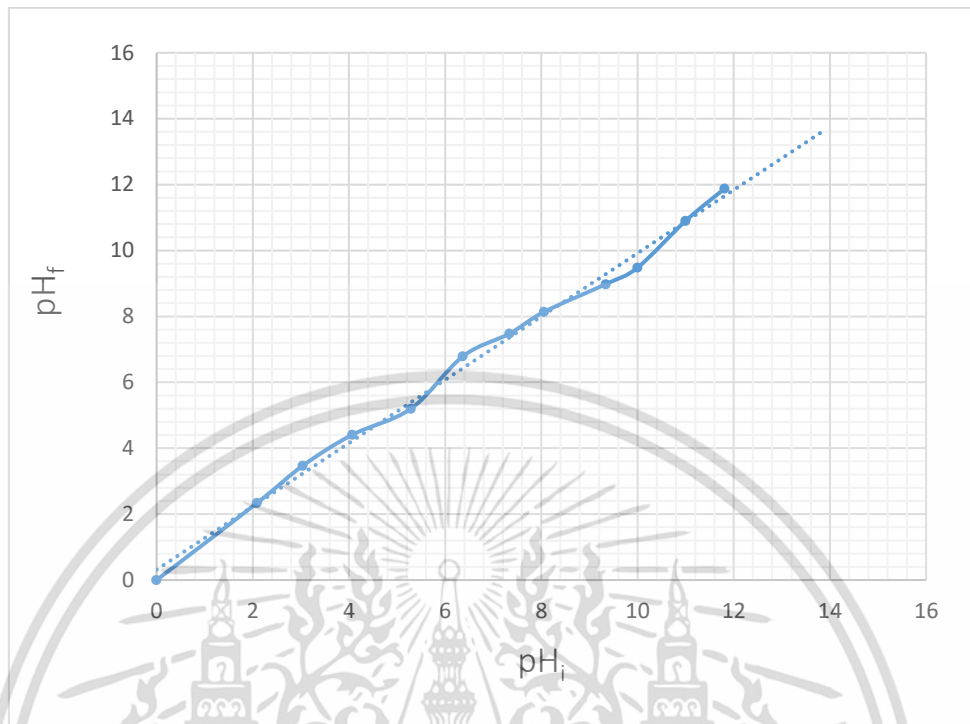
4.3 ค่าดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดงความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดงกับความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pHPZC)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก

กราฟแสดงค่าสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) พบว่าประจุที่ผิวของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กจะเป็นศูนย์เมื่อมีค่า pH เท่ากับ 5.20 เมื่อตัวดูดซับนี้อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นลบและในทางตรงข้าม ถ้าหากในสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นบวก

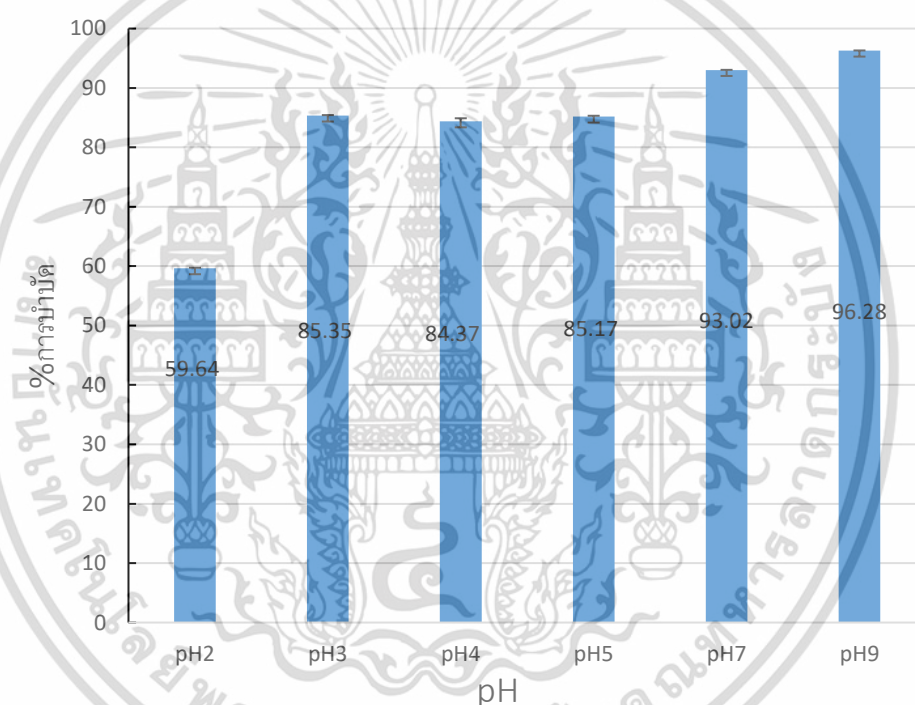
4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย

4.5.1 อิทธิพลของค่า pH

1. ความเข้มข้นของแดงของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ

การศึกษาค่าผลของ pH ของสารละลายเริ่มต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 3 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นตั้งแต่ pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 7, และ 9 โดยใช้เวลาบำบัด 180 นาที หลังการทดลองวัดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการบำบัดและคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลดังรูปที่

4.11



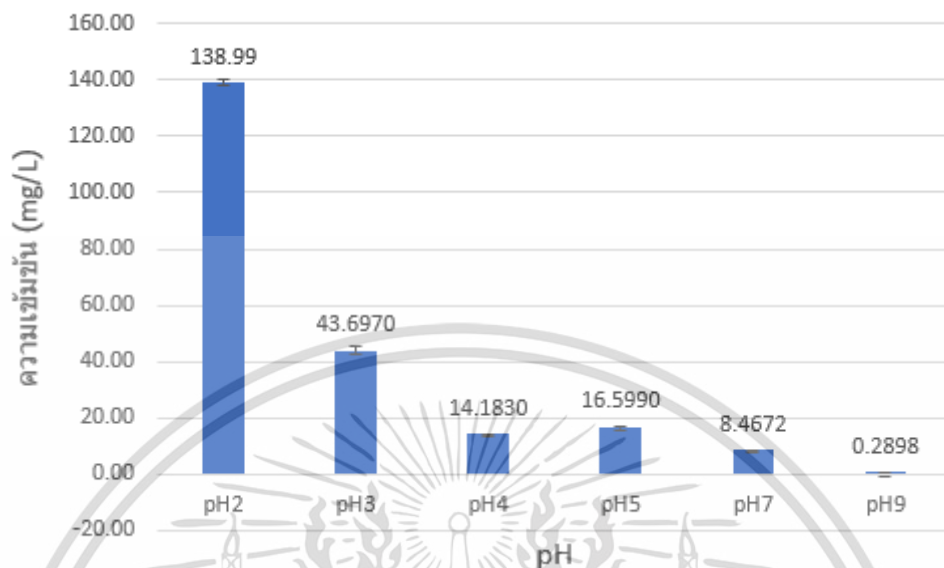
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ต่ำกว่า 5.2 (Point of Zero Charge ของตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 5.2) ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะต่ำ แต่เมื่อเพิ่มพีเอชของน้ำเสียเป็น 7 และ 9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อสารละลายมีพีเอช 7 และ 9 พื้นผิวตัวดูดซับจะมีประจุลบ จึงดูดยึดไอออนบวกได้ดี ในการทดลองนี้ผู้วิจัยจึงเลือก pH 7 ในการศึกษาต่อไป เนื่องจากเป็นค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสภาพความเป็นกลาง ไม่ต้องมีการปรับค่า pH และที่ไม่

เลือก pH 9 เนื่องจากมีสภาพความเป็นเบสและเมื่อสารละลายมี pH 9 จะสามารถเกิดการตกตะกอนได้เป็น $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ที่ pH 9-10 ลักษณะที่ขุ่น และ คณະ (2565)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเข้มข้นเหล็กของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ

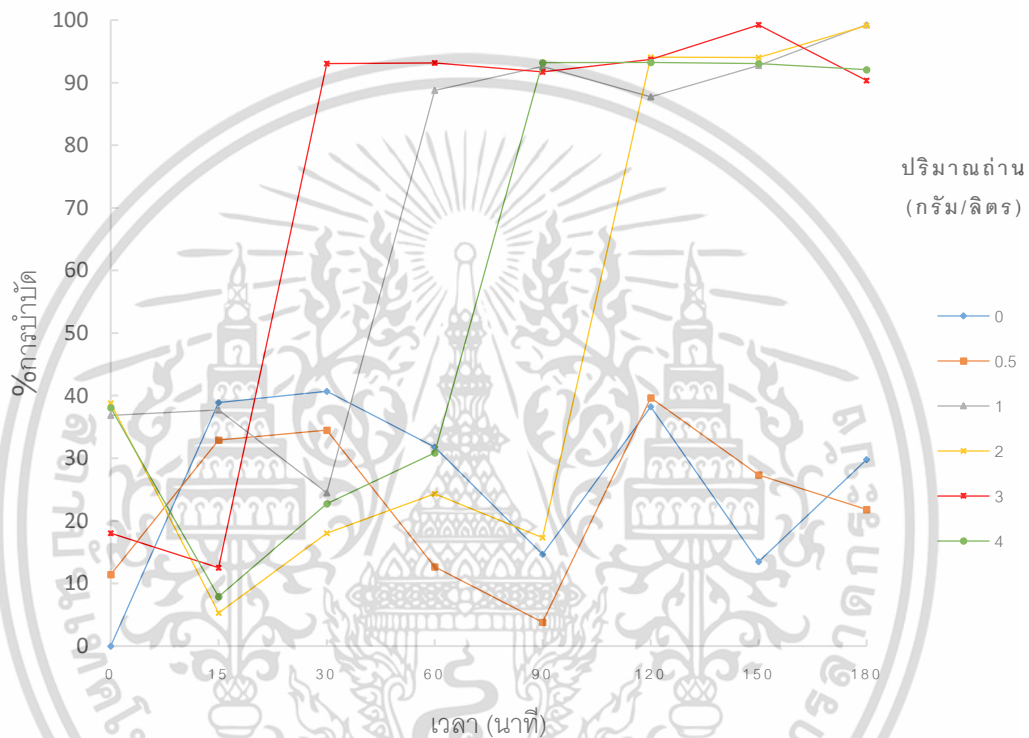


รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของเหล็กของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ค่า pH ต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าที่ pH เป็นกรดเหล็กจะละลายออกมาได้มากขึ้น แต่ pH ที่เหมาะสมในการบำบัดคือ pH 7 พบความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 8.4672 mg/L ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำเสียที่กำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำเสียเหล็กทั้งหมด ไม่เกิน 10 mg/L ซึ่งอ้างอิงจากประกาศนิตมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (2560)

4.5.2 อิทธิพลของปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก

การศึกษาผลของปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กดังนี้ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัมต่อลิตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.13



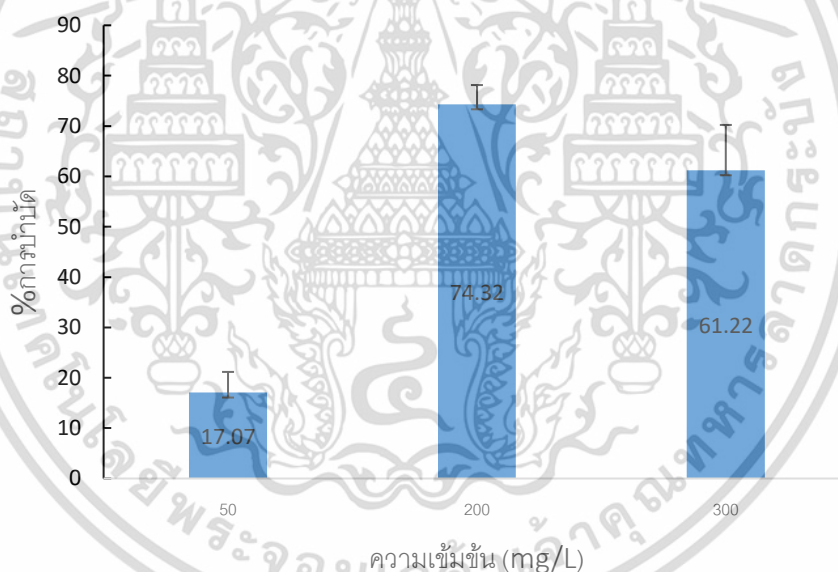
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ตอบสนองบนพื้นผิวของตัวดูดซับและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อการเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของตัวดูดซับ แต่พบว่าที่ถ่านชีวภาพแม่เหล็กปริมาณ 3 กรัม/ลิตร ณ เวลา 30 นาที ประสิทธิภาพของถ่านจะเริ่มมีการเข้าสู่สมดุล สังเกตว่าเมื่อเวลามากขึ้น การบำบัดยังคงมีประสิทธิภาพใกล้เคียงเดิม เนื่องจากปริมาณรูพรุนของถ่านมีอย่างจำกัด เมื่อรูพรุนของถ่านเต็มไปด้วยสิ่งสกปรกแล้วจึงไม่สามารถดูดซับสารได้เพิ่มอีก ดังนั้นเวลาที่ 30 นาที และถ่านปริมาณ 3 กรัม/ลิตร จึงเป็นสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด แต่สังเกตเอกสารนี้ว่าที่ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0 กรัม/ลิตร ณ เวลาการบำบัดที่ 15, 30, 60, 90 และ 180 นาที มีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่สูงกว่าจุดอื่น อาจเกิดจากการที่นำตัวอย่างไปเจือจางความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากค่าดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ซึ่งต้องการผลลัพธ์ที่อยู่ในช่วงกราฟมาตรฐานค่าดูดกลืนแสงของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อน และส่งผลให้ที่ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0 กรัม/ลิตร ณ เวลาการบำบัดที่ 15, 30, 60, 90 และ 180 นาที มีเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่สูงกว่าจุดอื่น

4.5.3 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 3 กรัม/ลิตร ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง เป็นดังนี้ 50, 200 และ 300 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ ดังรูปที่ 4.14



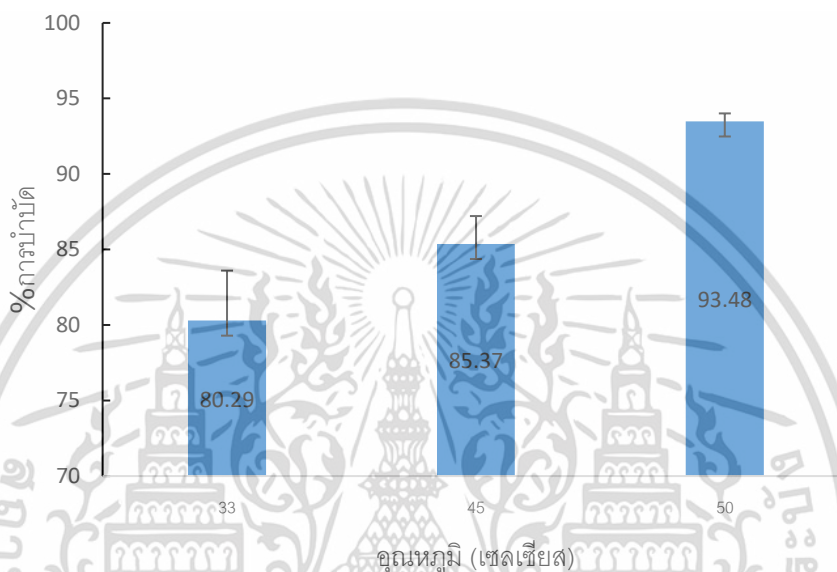
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเมื่อทำการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนทองแดงเข้มข้น 200 และ 300 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดงเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร บำบัดได้เท่ากับ 74.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง โดยใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 3 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเสียดังนี้ 33, 45, และ 50 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.15 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สภาวะ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้อนุภาควิ่งได้เร็วขึ้นส่งผลให้อนุภาคชนกันได้มากขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดดีที่สุด แต่เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดจะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลง

4.6 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์

ทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการดูดซับใช้ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของน้ำเสียเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich ผลการคำนวณแสดงดังนี้

4.6.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานการดูดซับเป็นอิสระจาก

ระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

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

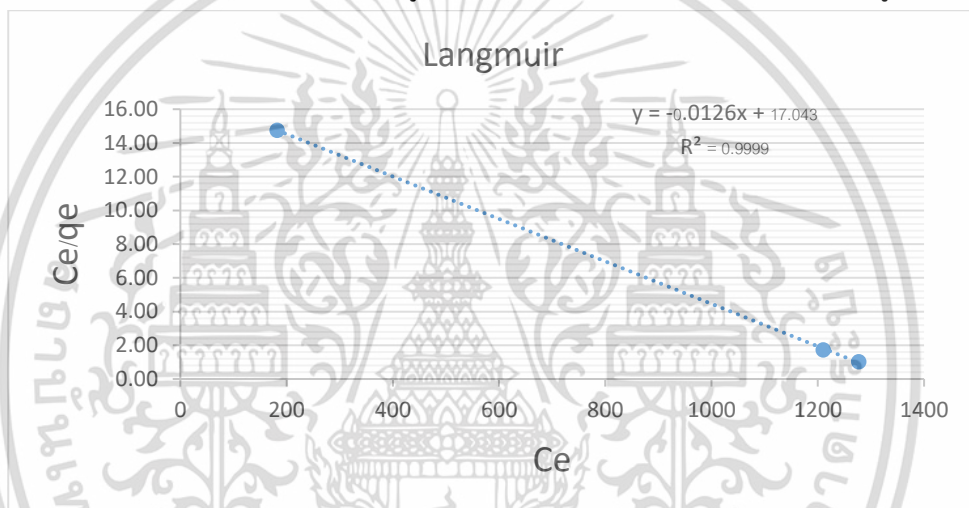
โดย C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล(mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_m = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของ Langmuir (L/mg)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = -0.0126 และจุดตัดแกน y = 17.043 ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_m) ค่าคงที่สมการ Langmuir (K_L) และค่า R_L ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+K_L C_0} \\ -0.0126 &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+(0.0007 \frac{L}{mg})(200 \frac{mg}{L})} \\ q_m &= 79.3650 & R_L &= 0.8712 \\ \text{จุดตัดแกน y} &= \frac{1}{K_L q_m} \\ 17.043 &= \frac{1}{K_L (79.3650)} \\ K_L &= 0.0007 \text{ L/mg} \end{aligned}$$

ค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir ถ้า R_L

> 1 การดูดซับจะไม่เป็นแบบ Langmuir (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), 0 $$ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$> R_L < 1$ การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (favorable), และเมื่อ $R_L = 0$ การดูดซับจะเกิดการผันกลับไม่ได้ (Irreversible) จากการคำนวณพบว่าค่า R_L ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.8712 จึงเป็นไปตามไอโซเทอมแบบ Langmuir ค่าประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9999 ซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้ 1 ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงจะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ Langmuir และค่า q_m ในการดูดซับเท่ากับ 79.3650 mg/g

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)

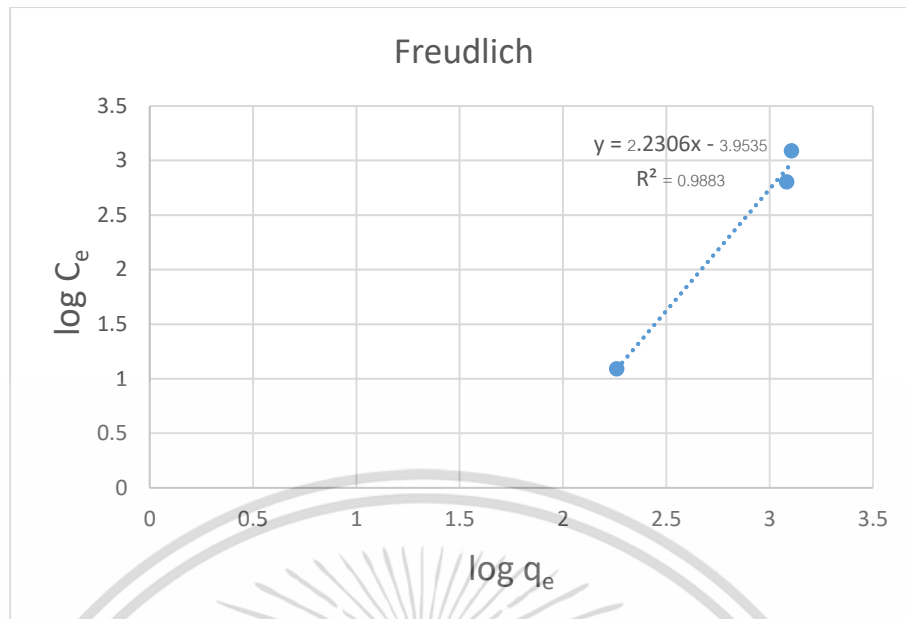
$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่

4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 2.2306 และจุดตัดแกน $y = -3.9535$ สามารถนำไปหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_f ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{1}{n} & \text{จุดตัดแกน } y &= \log K_f \\ 2.2306 &= \frac{1}{n} & -3.9535 &= \log K_f \\ n &= 0.4483 & K_f &= 10^{-3.9535} \text{ L/g} \\ & & &= 0.0001 \text{ L/g} \end{aligned}$$

ค่าที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (K_f) ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็กเท่ากับ 0.0001 L/g ความชัน $1/n = 1$ ไอโซเทอมการดูดซับเป็นเส้นตรง ค่า $1/n > 1$ คือบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่ใช้ในการดูดซับและ $1/n < 1$ คือบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่ใช้ในการดูดซับ ดังนั้นจากผลการคำนวณที่ได้จากการทดลอง ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย ($1/n$) ของการดูดซับถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็น 2.2306 แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่ใช้ในการดูดซับ

4.6.3 สมการการดูดซับของ Temkin

สมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ในการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ มีสมมติฐานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (Adsorbent-Adsorbate Interactions)

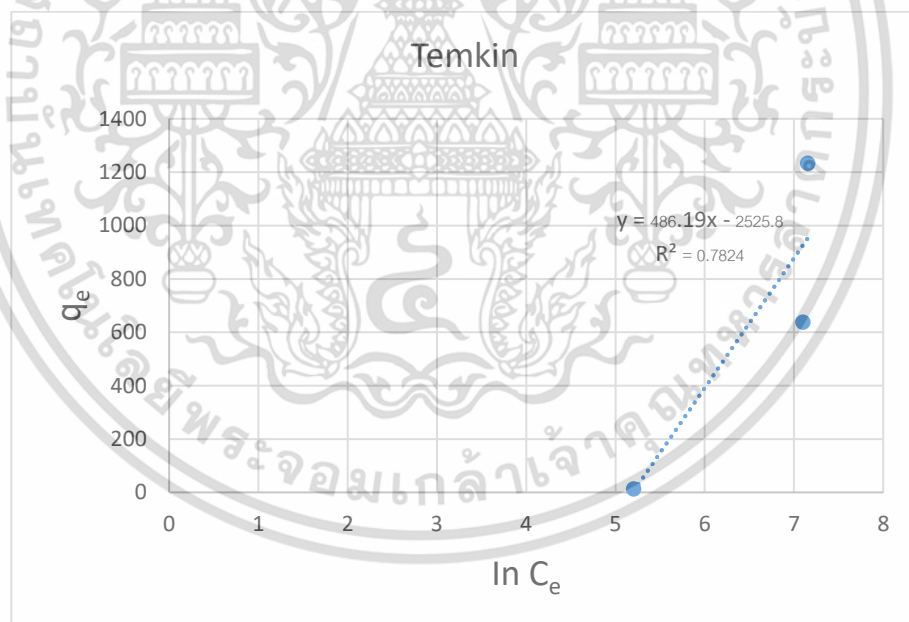
สมการการดูดซับของ Temkin

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

- 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

4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

ทองแดง

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 486.19 และจุดตัดแกน $y = -2525.8$ ค่าความสามารถหา
 เอกสารนี้ค่าคงที่ $1/n$ และ K_f ได้ดังนี้ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{array}{lcl}
 \text{ความชัน} & = & \frac{RT}{b_0} \\
 486.19 & = & \frac{RT}{b_0} \\
 b_0 & = & 5.1813 \text{ KJ/mol} \\
 \text{จุดตัดแกน } y & = & \frac{RT}{b_0} \ln A \\
 -2525.8 & = & \frac{RT}{b_0} \ln A \\
 \ln A & = & \frac{(-2525.8)(5.1813)}{(8.314)(306)} \\
 A & = & 5.1441
 \end{array}$$

สมการ Temkin สามารถนำมาอธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับได้ โดยที่หาก $b_0 > 80 \text{ KJ/mol}$ แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาเคมี จากการคำนวณพบว่าค่า b_0 ของการดูดซับของถ่านชีวภาพเท่ากับ 5.1813 KJ/mol แต่ผลจากการทดลองค่าที่ได้ไม่สอดคล้องกับสมการการดูดซับของ Temkin เนื่องจากค่าประสิทธิ์สัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.7824 ซึ่งค่าไม่เข้าใกล้ 1

4.6.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือกายภาพที่เกิดบนผิวตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

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

โดย q_D = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

K_{DR} = ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระเฉลี่ยของการดูดซับต่อโมลของตัวดูดซับ (mol^2/kJ^2)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

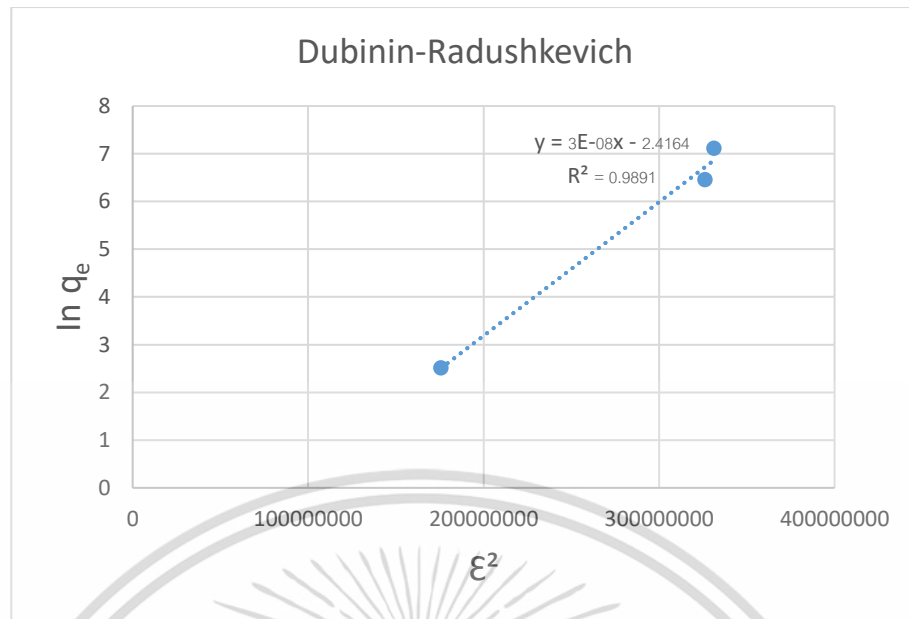
ϵ = $[RT \ln(1 + 1(C_e))]$

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

ทองแดง

จากกราฟจะได้ความชัน $= K_{DR} = 3 \times 10^{-8}$ หาค่า $E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$ และจุดตัดแกน $y = \ln q_D = -2.4164$ mg/g

E	$=$	$1/(2K_{DR})^{1/2}$	จุดตัดแกน Y	$=$	$\ln q_D$
E	$=$	$1/(2 \times 3 \times 10^{-8})^{1/2}$	$\ln q_e$	$=$	-2.4164
E	$=$	4.0824 KJ/mol	q_e	$=$	0.0892

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 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง มีค่าเท่ากับ 0.9891 ค่า E ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง มีค่า 4.0824 KJ/mol ซึ่งน้อยกว่า 8 KJ/mol จึงชี้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพและค่า q_D ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เท่ากับ 0.0892 mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

Langmuir Isotherm		Dubinin-Radushkevich Isotherm	
q_m (mg/g)	79.3650	K_{DR}	3×10^{-8}
K_L (L/mg)	0.0007	q_D (mg/g)	0.0892
R_L	0.8712	E (kJ/mol)	4.0824
R^2	0.9999	R^2	0.9891
Freundlich Isotherm		Temkin Isotherm	
K_f	0.0001	b_0 (kJ/mol)	5.1813
$1/n$	2.2306	A	5.1441
R^2	0.9883	R^2	0.7824

จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ (R^2) จากตารางพบว่า สมการแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ Dubinin-Radushkevich มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9999 และ 0.9891 แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนทองแดงด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นการดูดซับแบบ Langmuir และ Dubinin-Radushkevich ซึ่งเป็นแบบจำลองการดูดซับว่าแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียว โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันจะไม่มีแรงกระทำระหว่างกันหรือไม่มีปฏิกิริยาต่อกัน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเกิดการย้ายตำแหน่งของการดูดซับ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะมีจำนวนแน่นอน การดูดซับจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่แน่นอน การดูดซับจะเกิดเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่สามารถดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนทองแดง สูงสุดอยู่ที่ 79.3650 mg/g และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

4.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์

4.7.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Model)

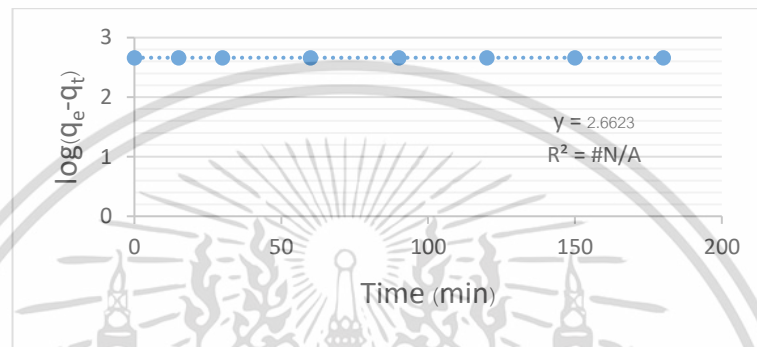
สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และตีพิมพ์ซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

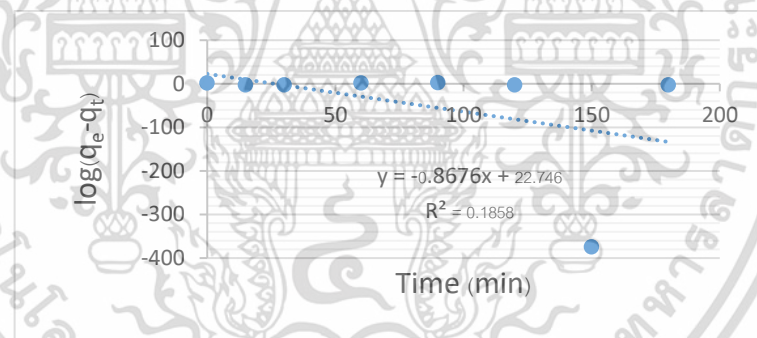
$$\log q_e - q_t = \log q_e - \left(\frac{K_1}{2.303}\right)t$$

โดย K_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/min)
 q_t = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)
 q_e = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 t = เวลาที่ใช้ (min)

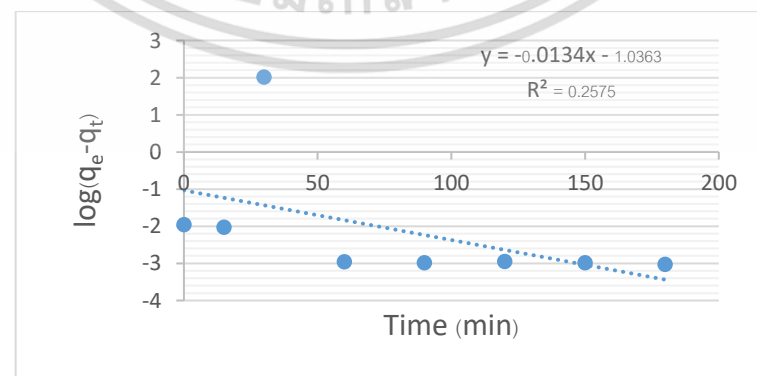
เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $k_1/2.303$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log q_e$



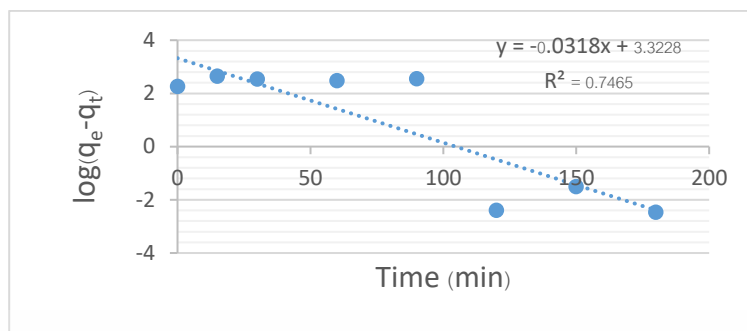
(a)



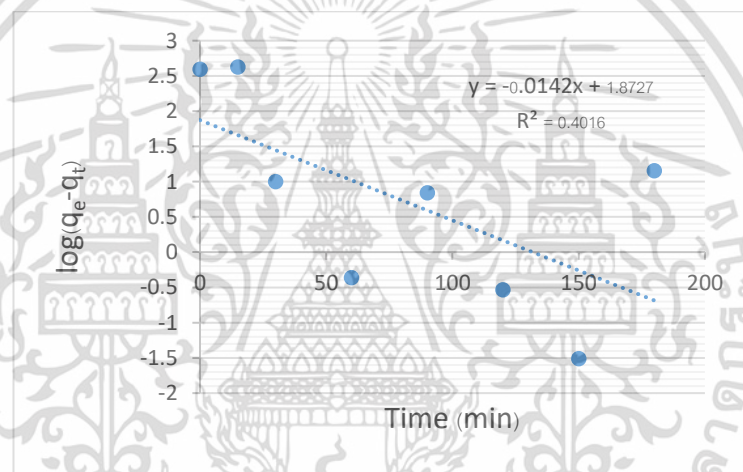
(b)



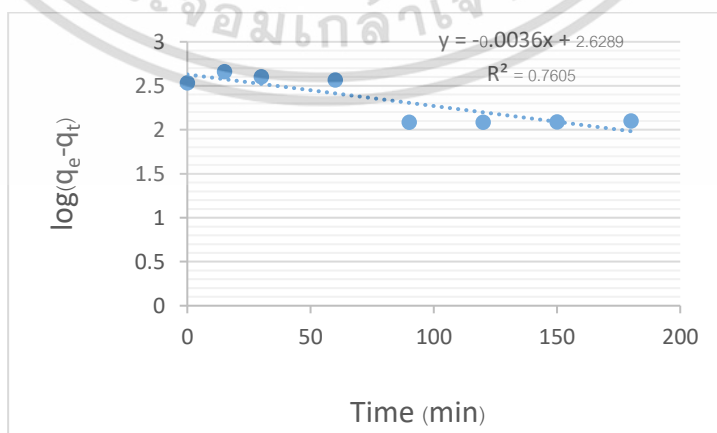
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)



(e)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(f)

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน

- (a) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0 กรัม/ลิตร
- (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0.5 กรัม/ลิตร
- (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 1 กรัม/ลิตร
- (d) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 2 กรัม/ลิตร
- (e) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 3 กรัม/ลิตร
- (f) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 4 กรัม/ลิตร

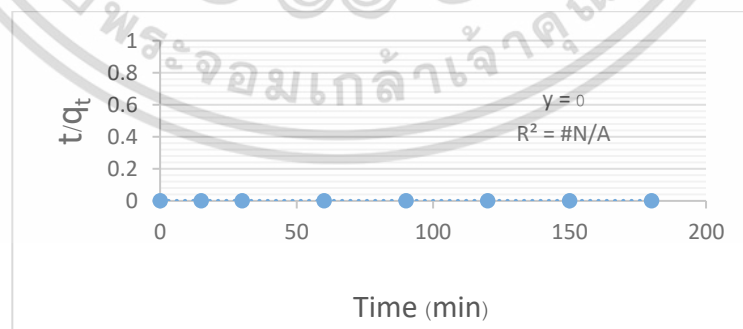
4.7.2 แบบจำลองดูดซับอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model)

สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเป็นดังนี้

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

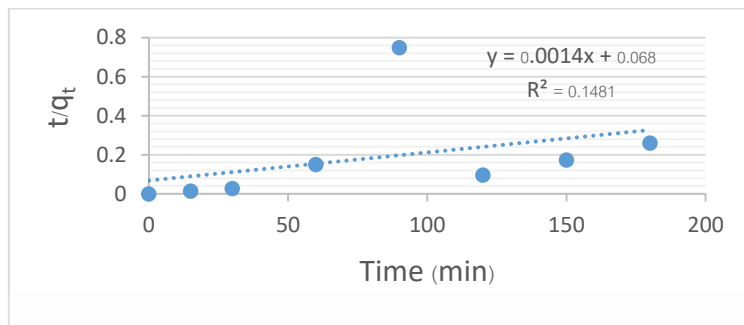
โดย K_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/mg.min)
 q_t = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)
 q_e = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 t = เวลาที่ใช้ (min)

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

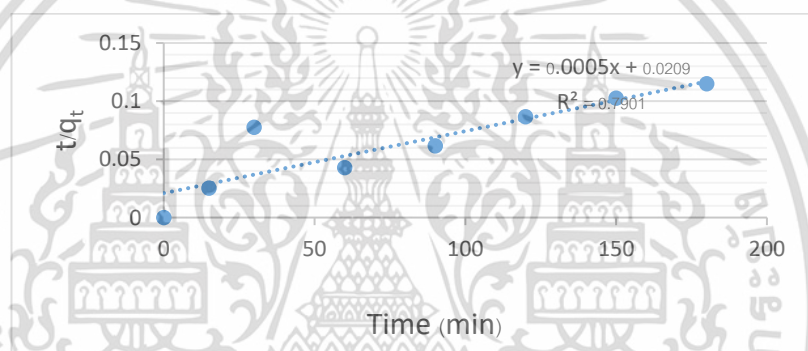


(a)

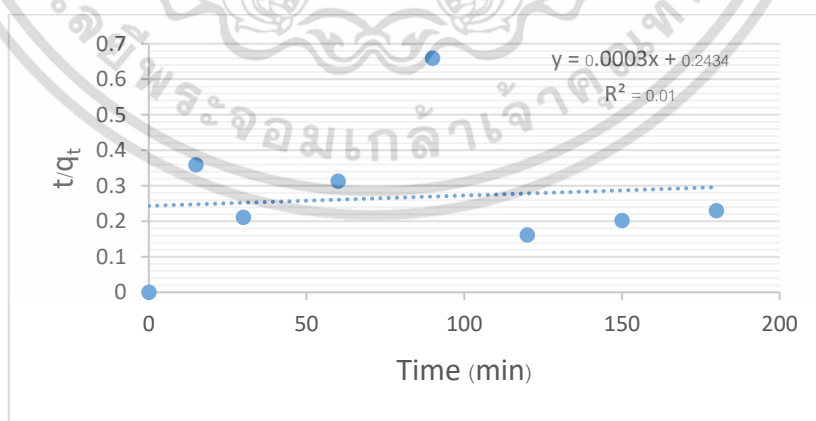
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

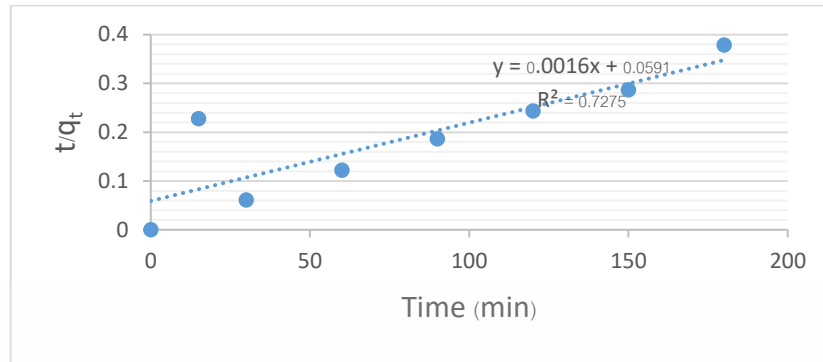


(c)

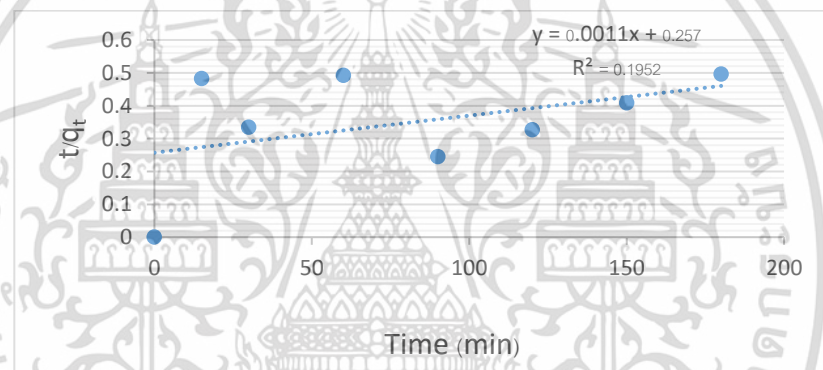


(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)



(f)

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า t/q_t กับเวลาเมื่อใช้ปริมาณถ่านต่างกัน

- (a) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0 กรัม/ลิตร
- (b) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 0.5 กรัม/ลิตร
- (c) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 1 กรัม/ลิตร
- (d) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 2 กรัม/ลิตร
- (e) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 3 กรัม/ลิตร
- (f) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปริมาณ 4 กรัม/ลิตร

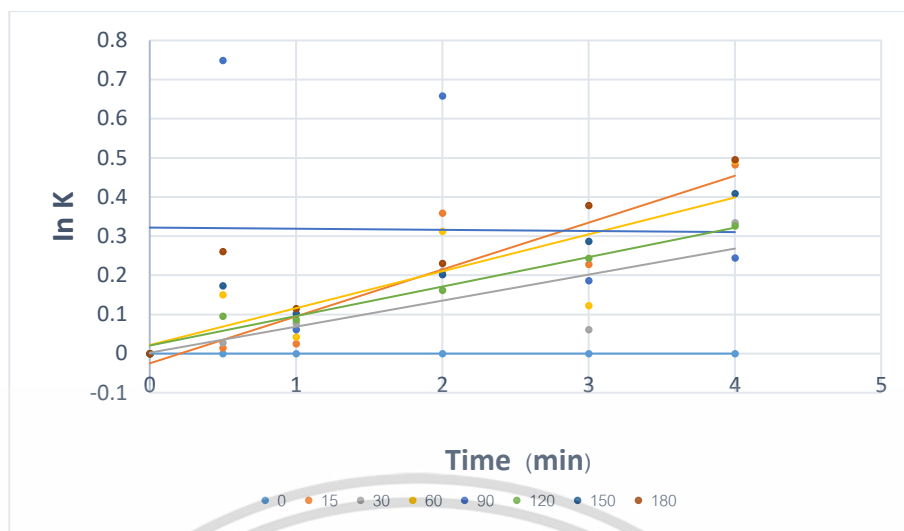
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความชันและจุดตัดแกน y ของการดูดซับน้ำเสีย
สังเคราะห์ทองแดง

ปริมาณถ่าน (g/L)						
Pseudo-First Order						
	0	0.5	1	2	3	4
K_1 (1/min)	6.1312	-1.9980	-0.0308	-0.0732	-0.0327	-0.0082
q_e (mg/g)	0	0.1356	0.0154	0.5215	0.2724	0.4197
R^2	0	0.1858	0.2575	0.7465	0.4016	0.7605
Pseudo-Second Order						
	0	0.5	1	2	3	4
K_2 (g/mg.min)	0	2.8823×10^{-5}	1.1961×10^{-5}	3.6976×10^{-7}	4.3316×10^{-5}	4.7091×10^{-6}
q_e (mg/g)	0	714.2857	2000	3333.33	625	909
R^2	0	0.1481	0.7901	0.01	0.7275	0.1952

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ปริมาณถ่านและเวลาต่างกันเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยอันดับหนึ่ง (Pseudo-First Order Model) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 เมื่อแปรผันปริมาณถ่านพบว่าค่า K_2 จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงว่าปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการดูดซับ

จากแบบจำลองอัตราการดูดซับการเกิดปฏิกิริยอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ คือ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัม/ลิตร ได้ดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่ปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่ปริมาณต่างกันต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

ปริมาณถ่าน (g/L)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (K_2) (g/mg.min)	R^2
0	0	0
0.5	3.0177×10^{-5}	0.1481
1	1.1961×10^{-5}	0.7901
2	3.6976×10^{-7}	0.01
3	4.3316×10^{-5}	0.7275
4	4.7091×10^{-6}	0.1952

จากตาราง 4.4 เมื่อปริมาณถ่านเพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย และที่ปริมาณถ่านมากกว่า 3 กรัม/ลิตร พบว่ามีค่าอัตราเร็วลดลงหมายความว่าที่ปริมาณถ่าน 3 กรัม/ลิตร มีการเข้า สู่สมดุลจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

4.8 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 3 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ศึกษาแก่

การเปลี่ยนแปลง เอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ผลการศึกษาเป็นดังนี้

4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

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 (mg/g) = ปริมาณ Cu ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

C_e = ความเข้มข้นของ Cu ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (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)

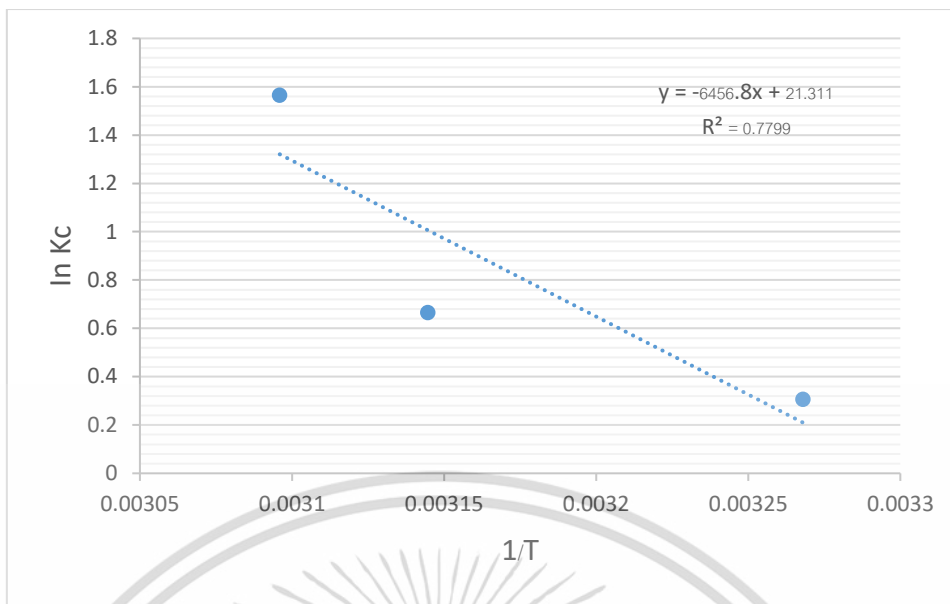
ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ K_c
33	1.3584
45	1.9456
50	4.7813

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 33 ถึง 50 องศาเซลเซียสของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง

$\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ $-\Delta H^0/R$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\Delta S^0/R$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

จากความชันที่ได้จากสมการสามารถคำนวณค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0) เท่ากับ 53.0271 kJ/mol ค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ($\Delta H^0 = \text{บวก}$) แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น

4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

จากจุดตัดแกน y ที่ได้จากสมการเท่ากับ $\Delta S^0/R$ ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เท่ากับ 0.1771 KJ/mol.K ซึ่งค่าเอนโทรปีบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta S^0 = \text{บวก}$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอกลักษณะการเกิดพันธะหรือ มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ ($\Delta S^0 = \text{ลบ}$) มีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอกลักษณะการไม่เกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่าง ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโมเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้นมีความตึงเครียดมาก

4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ของการดูดซับ

จากการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH^0) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) นำมาแทนค่าในสมการ $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$ ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง มีค่าของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ทุกสิ่ง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขศูนย์ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -1.1655, -3.2927, และ -4.6712 kJ/mol ตามลำดับ การดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานค่าเป็นลบสามารถเกิดเองได้ตามธรรมชาติ และการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานค่าเป็นบวกไม่สามารถเกิดเองได้ตามธรรมชาติ ดังนั้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส สามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กตามธรรมชาติเองได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะเห็นรูพรุนชัดเจนและมีลักษณะพื้นผิวขรุขระเพียงเล็กน้อย ส่วนลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็กจะพบรูพรุนมีขนาดเล็กและพื้นผิวขรุขระมากขึ้นมีเหล็กเกาะที่ผิว ปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.19% เป็น 47.71%
- 2) ถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีค่า Point of Zero Charge เท่ากับ 5.20
- 3) การดูดซับมีประสิทธิภาพดี เมื่อพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่า Point of Zero Charge ของถ่านแม่เหล็ก ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ใช้เท่ากับ 3 กรัม/ลิตร ระยะเวลาการบำบัดเป็น 30 นาที และอุณหภูมิที่เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถบำบัดน้ำเสียจากความเข้มข้นของทองแดง 200 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 58.16 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 93.48 เปอร์เซ็นต์
- 4) การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นการดูดซับแบบ Langmuir สามารถดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ได้สูงที่ 79.3650 mg/g
- 5) ในการศึกษาจลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order)
- 6) ΔH^0 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง มีค่าเท่ากับ 53.0271 KJ/mol เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน
- 7) ΔS^0 ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง มีค่าเท่ากับ 0.1771 KJ/mol.K แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก
- 8) ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) เมื่อดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ได้ค่าเท่ากับ -1.1655, -3.2927, และ -4.6712 kJ/mol ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 50 องศาเซลเซียส สามารถเกิดการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กตามธรรมชาติเองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาอิทธิพลของอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในน้ำเสียที่มีผลต่อการดูดซับ
- 2) ควรศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มงานกิจการพิเศษ สำนักนโยบายและแผนสำนักงานปลัด กระทรวงมหาดไทย, 2560 [Online]. Available: <http://www.aecth.org/upload/13823/Q8ru0PsGgR.pdf> 2-3
- การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีการทางชีวภาพ** (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553) [Online]. Available: <http://siweb1.dss.go.th/repack/fulltext/IR2.pdf>
- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). **ถ่านกัมมันต์**. (กรมวิทยาศาสตร์บริการ).
- ชมพูท ไชยรักษ์. (2563). **การดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จาก ผักตบชวา**. (สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- ธีรนาถ สุวรรณเรือง. (2562). **โลหะหนักปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และผลกระทบต่อสุขภาพ Heavy metal Contaminated in Environments and Health Effects**. (สาขาวิทยาการสิ่งแวดล้อม และทรัพยากรธรรมชาติคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์).
- นิรามัย ไตรยวงศ. (2558). **การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี**. (วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี). [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/154396856.pdf>
- ลักษณะทิพย์ พิงการักษ์¹, สายฝน ทิศกองราช², เมธาวิ ธรรมประเสริฐ³, และ ตีตคาญจน์ จันทร์ทอง³. (2565). **การกำจัดตะกั่วและทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้วิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยเปลือก**. (สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี¹, ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี², โรงเรียน มอ.วิทยานุสรณ์ สุราษฎร์ธานี³). [Online]. Available : <http://paj.pit.ac.th/index.php/paj2014/article/download/484/285.pdf> 87
- ศศิธร นามโคตร. (2551). **การศึกษาไอโซโทมของการดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยเยื่อเลือกถั่วเหลืองดัดแปร**. (ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2551). [Online]. Available: <https://opacimages.lib.kmitl.ac.th/medias/pdf/09023330.pdf> 1-1
- สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. (2557). **รายงานฉบับสมบูรณ์การศึกษาสถานภาพทองแดงไทย กระบวนการผลิตและแปรรูปทองแดง**. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 มกราคม 2566, [Online]. Available: <https://iiu.isit.or.th/th/reports/In-Depth%20Research%20Report/download.aspx?Content=1141> : 2-4 – 2-8

- Baldwin, D. H., J. F. Sandahl, J. S. Labenia and N.L. Scholz (2003). "Sublethal Effects of Copper on Coho Salmon: Impacts on Nonoverlapping Receptor Pathways in the Peripheral Olfactory Nervous System." *Environmental Toxicology and Chemistry*. 22(10) : 2266-2274
- Bang, S., Korfiatis, G.P., and Meng, X. (2005). "Removal of arsenic from water by zero-valent iron." *Journal of Hazardous Materials*. 121 : 61-67.
- Chatpet Yossapol. (1999). "Effect of Mixing and pH in the Reduction of Nitrate by Zero Valent Iron." Thesis of Master of Science in Environmental Engineering, Nashville, Tennessee.
- Cissoko, N., Zhang, Z., Zhang, J., and Xu, X. (2009). "Removal of Cr(VI) from simulative contaminated groundwater by iron metal." *Process Safety and Environmental Protection*. 87 : 395-400.
- Zhang, Z., Hao, Z., Yang, Y., Zhang, J., Wang, Q., and Xu, X. (2010). "Reductive denitrification kinetics of nitrite by zero-valent iron." *Desalination*. 257 : 158-162.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร

ก.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

ชั่งแผ่นทองแดง 1 กรัม สารละลาย = 1000 มิลลิลิตร

ดังนั้น ชั่งแผ่นทองแดง 1 กรัม แล้วปรับปริมาณ 1000 มิลลิลิตร จะได้ทำเสียสังเคราะห์ทองแดงเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50, 200, 300 มิลลิกรัม/ลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

- น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปิเปิดน้ำเสียสังเคราะห์ 30 มิลลิลิตร ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร

ก.2 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 3.5 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งเฟอร์รัสซัลเฟต $(0.25 \times 278) = 69.5$ กรัมในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

ก.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์ (MW.=37.83)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์

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

ดังนั้นสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ $(0.5 \times 37.83) = 18.915$ กรัม ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

ก.4 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 48

ดังนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ (MW.=36.459)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีกรดไฮโดรคลอริก $(0.1 \times 1000 / 1,000) = 0.1$ โมลาร์

ดังนั้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์เท่ากับต้องการไฮโดรคลอริก (0.1×36.459)

= 3.6459 มิลลิลิตร ในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร

ก.6 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ (MW.= 58.44)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์

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

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

0.5844 กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแดง
ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นทองแดงของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย
 สังเคราะห์ 100 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	9257	9266	9300	9274
ค่า pH = 3	3603	3577	3616	3598
ค่า pH = 4	3718	3751	3791	3598
ค่า pH = 5	3308	3327	3313	3316
ค่า pH = 7	2967	2985	2991	2981
ค่า pH = 9	1470	1480	1496	1482
ค่า pH น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนปรับ เท่ากับ 5				

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นเหล็กของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์
 100 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	137.8405	140.5401	138.5893	138.9900
ค่า pH = 3	41.7901	43.7286	45.5723	43.697
ค่า pH = 4	13.8913	14.3671	14.2906	14.183
ค่า pH = 5	16.6194	17.0705	16.1071	16.5990
ค่า pH = 7	8.2786	8.4572	8.6658	8.4672
ค่า pH = 9	0.2758	0.2875	0.3061	0.2898
ค่า pH น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนปรับ เท่ากับ 5				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	87	12.46
15	964	38.05
30	935	40.70
60	1076	31.77
90	1346	14.67
120	974	38.22
150	1365	13.45
180	1107	29.78

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม) น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0.5 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	1397	11.41
15	1058	32.91
30	1033	34.51
60	1378	12.65
90	1517	3.80
120	974	38.22
150	1146	27.35
180	1233	21.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 1 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7
 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	996	36.84
15	980	37.83
30	1191	24.48
60	177	88.75
90	116	92.59
120	193	87.73
150	114	92.73
180	11	99.11

ตารางที่ ค.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 2 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7
 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	966	38.77
15	1494	5.29
30	1293	18.04
60	1194	24.32
90	1304	17.31
120	93	94.08
150	94	94.00
180	124	92.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 3 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7
 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	1293	18.03
15	1380	12.52
30	109	93.06
60	108	93.14
90	130	91.73
120	99	93.71
150	12	99.22
180	152	90.35

ตารางที่ ค.6 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 (ปริมาณถ่านและเวลาที่เหมาะสม)
 น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 4 g/L ใช้ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 7
 ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการบำบัด	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ (%)
0	977	38.05
15	1453	7.88
30	109	93.06
60	1090	30.88
90	107	93.21
120	106	93.23
150	110	93.02
180	124	92.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก 3 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เป็นดังนี้ 50 , 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตัวอย่าง (mg/L)	ความเข้มข้นก่อนการดูดซับ (mg/L)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ รอบ 1 (mg/L)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ รอบ 2 (mg/L)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ รอบ 3 (mg/L)	ความเข้มข้นการดูดซับเฉลี่ย (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
น้ำตัวอย่าง 50	219	177	192	176	182	17.07
น้ำตัวอย่าง 200	4973	1469	1270	1090	1277	74.32
น้ำตัวอย่าง 300	3121	1106	996	1528	1210	61.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง โดยใช้ปริมาณ ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก 3 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 ในระยะเวลาการบำบัดที่เวลา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเสีย ดังนี้ อุณหภูมิห้อง, 45, และ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น หลังบำบัด รอบ 1 (mg/L)	ความเข้มข้น หลังการดูดซับ รอบ 2 (mg/L)	ความเข้มข้น หลังการดูดซับ รอบ 3 (mg/L)	ความเข้มข้น หลังการดูดซับ เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ (%)
อุณหภูมิห้อง (33 องศาเซลเซียส)	213	157	166	179	80.53
45	145	128	112	128	85.37
50	128	146	150	141	93.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว ธีรพล สุวรรณราช รหัสประจำตัว 62050435

นาย/นาง/นางสาว ศุภดิษฐ์ วัชรเมธา รหัสประจำตัว 62050453

นาย/นาง/นางสาว ปุณิศดา เวียงศิริ รหัสประจำตัว 62050463

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การดูดซับทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กทรงแท่งเหล็กทรงแท่ง

ชื่อภาษาอังกฤษ Adsorption of Copper from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by zero-Valent Iron

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 4.45% หรือโปรแกรม Turnitin %

ลงชื่อ ธีรพล สุวรรณราช

ลงชื่อ ศุภดิษฐ์ วัชรเมธา

ลงชื่อ สุพิชา เวียงศิริ

(นายธีรพล สุวรรณราช)

(นายศุภดิษฐ์ วัชรเมธา)

(นางสาวสุพิชา เวียงศิริ)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / (รศ.) / ผศ. / (ดร.) อ. ชมพูนุช ชาญวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษามีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน ยืนยัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ลงชื่อ ไม่ว่ากรณีอื่นอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม