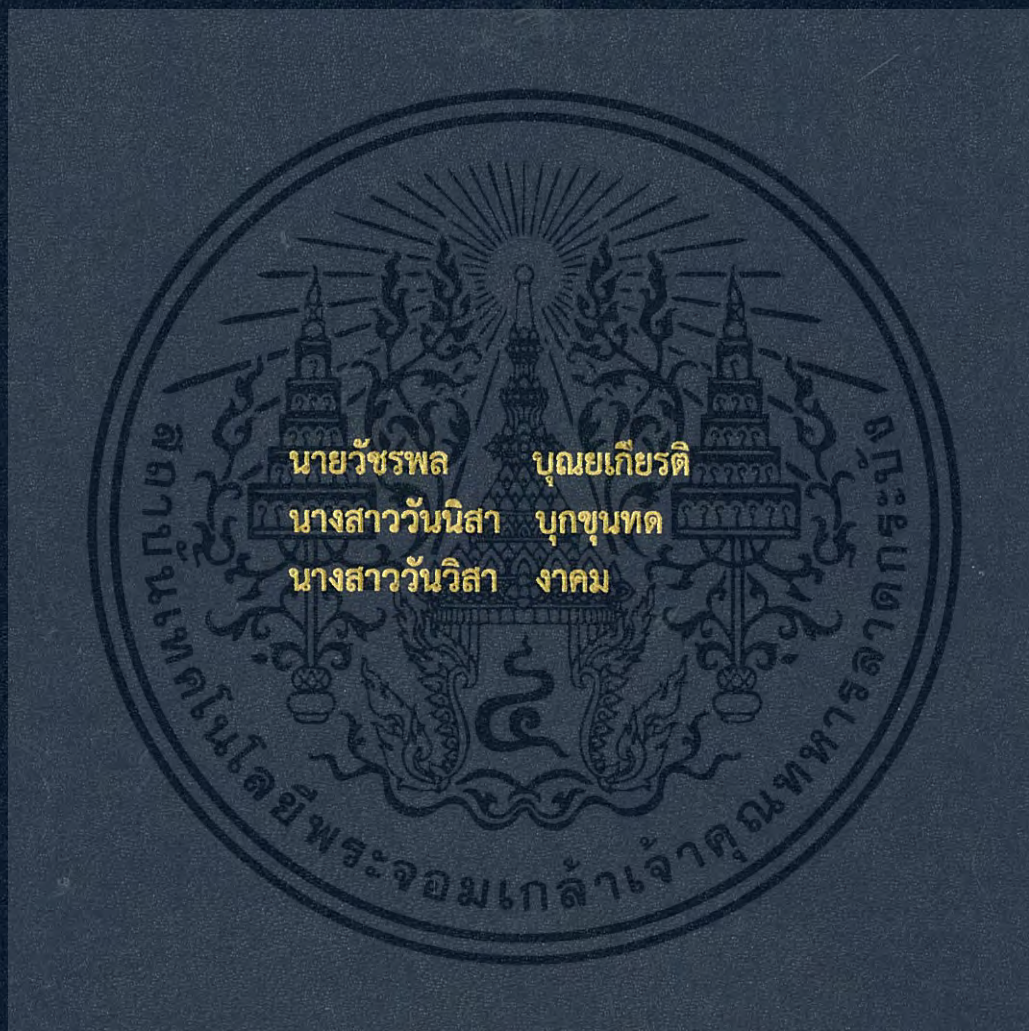


การดูดซับโลหะโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ที่ปรับปรุง
คุณภาพด้วยสารเคมี

ADSORPTION OF METALS BY CHEMICAL MODIFIED
MAGNETIC BIOCHAR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การดูดซับโลหะโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ที่ปรับปรุง
คุณภาพด้วยสารเคมี

ADSORPTION OF METALS BY CHEMICAL MODIFIED
MAGNETIC BIOCHAR



โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION OF METALS BY CHEMICAL MODIFIED MAGNETIC BIOCHAR



MR. WATCHARAPOL BOONYAKIAT

MISS WANNISA BUKKONTOD

MISS WANVISA NGAKOM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับโลหะโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี
Adsorption of Metals By Chemical Modified Magnetic Biochar

ชื่อนักศึกษา นายวัชรพล บุญเกียรติ รหัสนักศึกษา 57050638
นางสาววันนิสา บุกขุนทด รหัสนักศึกษา 57050639
นางสาววันวิสา งามคม รหัสนักศึกษา 57050640

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับโลหะโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี		
ชื่อนักศึกษา	นายวัชรพล บุญเกียรติ	รหัสนักศึกษา	57050638
	นางสาววันนิสา บุกขุนทด	รหัสนักศึกษา	57050639
	นางสาววันวิสา งามคม	รหัสนักศึกษา	57050640
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์		

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยใช้ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาผลกระทบของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนศาสตร์ อุณหพลศาสตร์และการนำตัวดูดซับกลับมาใช้อีกครั้ง จากการทดลองพบว่าการดูดซับจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH 6 เมื่อใช้ตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเติม NaCl, Na₂SO₄, Ca(NO₃)₂, CaCl₂ และ Na₂HPO₄ พบว่าเกลือของแคลเซียมมีผลในการขัดขวางการดูดซับมากกว่าเกลือของโซเดียม การดูดซับโลหะทั้งสองชนิดเป็นไปตามไอโซเทอร์มแลงเมียร์ การศึกษาจลนศาสตร์ของทองแดงและนิกเกิลเป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองและการแพร่ภายในอนุภาคตามลำดับ การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และการคายซับโดยใช้ EDTA จะแยกกว่าการใช้ HNO₃ และ NaNO₃

คำสำคัญ : การดูดซับ ไคโตซาน ถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ทองแดง นิกเกิล ผักตบชวา

Title	Adsorption of Metals By Chemical Modified Magnetic Biochar		
Students	Mr. Watcharapol Boonyakiat	Student ID	57050638
	Miss Wannisa Bukkontod	Student ID	57050639
	Miss Wanvisa Ngakom	Student ID	57050640
Degree	Bachelor of science (Environmental chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Choompunut Chaiyaraksa		

Abstract

The purpose of this research was to study the adsorption efficiency of copper and nickel by chitosan modified magnetic biochar. The study was also on the effect of electrolytes on the adsorption, adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and recycling of the adsorbents. The highest adsorption efficiency was found highest when using 100 mg of adsorbent and the solution pH 6. The increasing of the temperature resulted in a little increasing of adsorption efficiency. By adding of NaCl, Na₂SO₄, Ca(NO₃)₂, CaCl₂ และ Na₂HPO₄, it was found that calcium salt has more inhibitory effect on the adsorption than sodium salt. The adsorption of both metals followed Langmuir isotherm. The kinetic of copper and nickel adsorption was second-order model and intra particle model, respectively. The adsorption was endothermic process. A desorption of metals using EDTA was lower than using HNO₃ and NaNO₃.

Keywords : Adsorption , Biochar , Chitosan , copper , Magnetic biochar , Nickel , Water hyacinth

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ดร.ณลสิทธิ์ โชติแสง ที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง แนวทางในการแก้ปัญหา รวมไปถึงการตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษ เพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่ให้การอบรมสั่งสอน เลี้ยงดูตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้กำลังใจ แนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ออกมาสมบูรณ์

วัชรพล	บุญเกียรติ
วันนิสา	บุกขุนทด
วันวิสา	งามคม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมโลหะ.....	4
2.2 กระบวนการไพโรไลซิส.....	4
2.3 การดูดซับ.....	5
2.3.1 ประเภทของการดูดซับ.....	5
2.3.2 กลไกการดูดซับ.....	5
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	6
2.4 สารอิเล็กทรอนิกส์และนอนอิเล็กทรอนิกส์.....	7
2.4.1 อิเล็กทรอนิกส์.....	7
2.4.2 นอนอิเล็กทรอนิกส์.....	7
2.5 องค์ประกอบของเซลล์พีซ.....	7
2.6 โคโตซาน.....	9
2.7 ผักตบชวา.....	10
2.7.1 การสืบพันธุ์ของผักตบชวา.....	10
2.7.2 ประโยชน์ของผักตบชวา.....	10
2.7.3 ผลกระทบของผักตบชวา.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี.....	11
2.8.1 เอนทัลปี.....	11
2.8.2 เอนโทรปี.....	12
2.8.3 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี.....	12
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	17
3.1.1 อุปกรณ์.....	17
3.1.2 สารเคมี.....	17
3.2 วิธีการทดลอง.....	18
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล.....	18
3.2.2 วิธีการเตรียมถ่านชีวภาพ.....	18
3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ.....	19
3.2.4 การทำการดูดซับ.....	19
3.2.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อการดูดซับ.....	19
3.2.6 การคายซับและนำตัวดูดซับมาใช้ประโยชน์ใหม่.....	20
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย.....	21
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	21
4.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	22
4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer (XRD)	24
4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, PH_{PZC})	26
4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์.....	26
4.5.1 อิทธิพลของค่า pH.....	26
4.5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล.....	28
4.5.3 อิทธิพลของปริมาณถ่านผกตบขวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	29
4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.5 อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์.....	31
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับทองแดงและนิกเกิลโดยใช้วิธีการคายซับต่างๆ.....	32
4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพ.....	34
4.7.1 สมการการดูดซับของ Langmuir.....	34
4.7.2 สมการการดูดซับของ Freundlich.....	37
4.7.3 สมการการดูดซับของ Temkin.....	39
4.7.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich.....	41
4.8 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลด้วยถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	44
4.8.1 แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับทองแดงดังนี้ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส	46
4.8.2 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ดังนี้ 120, 160, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	47
4.8.3 แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับนิกเกิลดังนี้ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส.....	51
4.8.4 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลดังนี้ 120, 160, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	53
4.9 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี.....	57
4.9.1 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	57
4.9.2 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	59
4.10 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	61
4.10.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH_0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.10.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS_0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ทองแดงและนิกเกิล.....	63
4.10.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG_0) ของการดูดซับ.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	89
ภาคผนวก ง.....	92
ภาคผนวก จ.....	114



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ G ในทั้ง 4 กรณี.....	13
4.1 ความยาวคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	23
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลด้วยถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	43
4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความเข้มข้นและจุดตัดแกน y ของการดูดซับทองแดง.....	50
4.4 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความเข้มข้นและจุดตัดแกน y ของการดูดซับนิกเกิล.....	56
4.5 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับอนุภาคน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	58
4.6 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับอนุภาคน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	60
4.7 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	61
4.8 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	62
4.9 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	64
4.10 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	64
ก.1 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ไม่ได้ใส่ตัวดูดซับ, ค่า pH เริ่มต้น และ ค่า pH สุดท้ายของการทดลองหาค่าประจุพื้นที่ผิวที่เป็นศูนย์.....	71
ข.1 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 4 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	72
ข.2 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 5 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	73
ข.3 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	74
ข.4 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 7 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	75
ข.5 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	76
ข.6 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/l pH เท่ากับ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.7	78
ข.8	79
ข.9	80
ข.10	81
ข.11	82
ข.12	83
ข.13	84
ข.14	85
ข.15	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญัตราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับทองแดง.....	87
ค.2 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิล.....	87
ค.3 ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับทองแดง.....	87
ค.4 ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับนิกเกิล.....	88
ค.5 ไอโซเทอร์มเทมคินของการดูดซับทองแดง.....	88
ค.6 ไอโซเทอร์มเทมคินของการดูดซับนิกเกิล.....	88
ค.7 ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับทองแดง.....	89
ค.8 ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับนิกเกิล.....	89
ง.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....	90
ง.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	90
ง.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส.....	91
ง.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	91
ง.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	92
ง.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส.....	93
ง.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส.....	93
ง.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส.....	94
ง.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	94
ง.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	95
ง.12 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	95
ง.13 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส.....	96
ง.14 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส.....	96
ง.15 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส.....	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.16 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	97
ง.17 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	98
ง.18 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	98
ง.19 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส.....	99
ง.20 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส.....	99
ง.21 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส.....	100
ง.22 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	100
ง.23 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	101
ง.24 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.25 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....	102
จ.26 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	102
จ.27 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส.....	103
จ.28 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	103
จ.29 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	104
จ.30 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	104
จ.31 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....	105
จ.32 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	105
จ.33 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส.....	106
จ.34 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	106
จ.35 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	107
จ.36 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง.....	107
จ.37 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.38 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส.....	108
ง.39 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส.....	109
ง.40 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	109
ง.41 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	110
ง.42 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	110
ง.43 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส.....	111
ง.44 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส.....	111
ง.45 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส.....	112
ง.46 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.47 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	113
ง.48 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ 100 mg pH เท่ากับ 6 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	113
จ.1 ประสิทธิภาพในการคายซับทองแดง และการลดลงของประสิทธิภาพในการดูดซับ หลังจากคายซับ โดยใช้วิธีการคายซับโดย EDTA, คายซับโดย HNO ₃ และคายซับโดยใช้ NaNO ₃	114
จ.2 ประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิล และการลดลงของประสิทธิภาพในการดูดซับ หลังจากคายซับ โดยใช้วิธีการคายซับโดย EDTA, คายซับโดย HNO ₃ และคายซับโดยใช้ NaNO ₃	114

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเป็นอิเล็กโทรไลต์และนอนอิเล็กโทรไลต์.....	7
2.2 ภาพโครงสร้างของเซลล์พืช.....	7
2.3 โครงสร้างเอมิเซลลูโลส.....	8
2.4 โครงสร้างของแพคติน.....	8
2.5 โครงสร้างของลิกนิน.....	9
2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคติน.....	9
2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน.....	10
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน.....	11
4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา.....	22
4.2 เส้นสเปกตรัมของผักตบชวาที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	23
4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ...	24
4.4 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก.....	25
4.5 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กเคลือบไคโตซาน.....	25
4.6 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน.....	26
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดนิกเกิลกับเวลา ณ สภาวะ pH ที่ต่างกัน.....	27
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงกับเวลา ณ สภาวะ pH ที่ต่างกัน.....	27
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงกับเวลา ณ สภาวะ pH ที่ต่างกัน (ขยายช่วง pH 6-10)	28
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงและนิกเกิลกับความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น.....	29
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงและนิกเกิลกับปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้น.....	30
4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับและชนิดของอิเล็กโทรไลต์.....	32
4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับทองแดงโดยใช้วิธีต่างๆ.....	33
4.15 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับนิกเกิลโดยใช้วิธีต่างๆ.....	34
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับทองแดง.....	35
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับนิกเกิล.....	36
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับทองแดง.....	37
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับนิกเกิล.....	38
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับทองแดง.....	39
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับนิกเกิล.....	40
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ ϵ^2 ของการดูดซับทองแดง.....	41
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ ϵ^2 ของการดูดซับนิกเกิล.....	42
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับทองแดง ที่สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	46
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	46
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (q_t) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	47
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	47
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับทองแดง สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	48
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	48
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (q_t) กับล็อกการิทึมของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	49
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลา ต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลือกการitimของความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	52
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิล ที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	52
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิล ที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลือกการitimธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	53
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันอุณหภูมิ.....	53
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลือกการitimของความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	54
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อ ความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	54
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลือกการitimธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	55
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อ ความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันความเข้มข้น.....	55
4.40 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ ของทองแดง.....	57
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส ของทองแดง.....	58
4.42 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ ของนิกเกิล.....	59
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส ของนิกเกิล.....	60
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส ของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	แฟกเตอร์ความถี่
A	ค่าคงที่การสมดุลการยึดเกาะ
B	ถ่านชีวภาพ
b_0	ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ
CMB	ถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโคซาน
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
C_t	ความเข้มข้นที่เวลานั้น ๆ ของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
C_e	ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่ภาวะที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับ
E	พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ
E_a	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา
g	กรัม
H_1	เอนทัลปี ณ ภาวะเริ่มต้น
H_2	เอนทัลปี ณ ภาวะสุดท้าย
J	จูล
K	เคลวิน
K_{DR}	ค่าคงที่ของ Dubinin-Radushkevich
K_F	ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น
K_g	กิโกลกรัม
k_{id}	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน
KJ	กิโلاجูล
K_L	ค่าคงที่ของแลงเมียร์
K_1	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
K_2	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
L	ลิตร
log	ล็อกกาลีทึม
MB	ถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก
mg	มิลลิกรัม
min	นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

mol	โมล
pH	ค่าที่แสดงความเป็นกรดและด่าง
q_p	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของการดูดซับ
q_e	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
q_{max}	ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด
q_t	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่เวลานั้นๆ
R	ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J mol}^{-1}/\text{K}$)
R_L	ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล
S_1	เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น
S_2	เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
t	เวลา (นาท)
ln	ลอการิทึมธรรมชาติ
ΔG	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ
ΔH	การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี
ΔS	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี
$1/n$	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ
μg	ไมโครกรัม
α	อัตราเร็วในการดูดซับ
β	สัมประสิทธิ์ของการคายซับ
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการเติบโตทางเศรษฐกิจและมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการปล่อยของเสียออกสู่ธรรมชาติทั้งสิ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในแหล่งน้ำและดิน การปนเปื้อนเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลกระทบในด้านลบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของของเสีย นั้น โดยของเสียที่นับว่าเป็นปัญหารุนแรง คือ ของเสียจำพวกโลหะหนัก เช่น โครเมียม นิกเกิล ทองแดง แคดเมียม และเหล็ก เป็นต้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับนิกเกิลและทองแดง จากงานวิจัยเกี่ยวกับน้ำคลองและตะกอนก้นคลองสำโรงบริเวณใกล้กับแม่น้ำเจ้าพระยาพบว่า มีปริมาณทองแดงในน้ำคลอง 0.511 มิลลิกรัมต่อลิตร และตะกอนก้นคลอง 199 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นิกเกิลในน้ำคลองมีปริมาณ 0.797 มิลลิกรัมต่อลิตร และในตะกอนก้นคลอง 221 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (bridgen และคณะ, 2010) และเมื่อศึกษาปริมาณการเกิดโลหะหนักจากพฤติกรรมมนุษย์ พบว่า มนุษย์สามารถก่อให้เกิดทองแดงที่มีความเข้มข้นถึง 100 ไมโครกรัมต่อลิตร หรือมากกว่านั้น โดยความเข้มข้นของทองแดงสูงสุดที่พบจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่คือ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (USEPA, 2007) โดยผลกระทบของนิกเกิลเมื่อได้รับไปปริมาณมากจากการรับสารโดยตรงคือเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง ส่วนผลกระทบของโลหะทองแดงคือ เป็นพิษต่อพืชน้ำและสัตว์น้ำรวมถึงมนุษย์หากได้รับเข้าไปในร่างกายจะทำให้ร่างกายอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร ร่างกายซูบผอมและทำให้ตับแข็งหรือเกิดอาการคลื่นคลั่งได้ง่าย (Singare และคณะ, 2010) จากผลกระทบดังกล่าวเราจึงควรหาวิธีการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อการลงทุน

วิธีการหนึ่งในการลดปริมาณโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อการลงทุน คือ การใช้การดูดซับ โดยหลักของการดูดซับจำเป็นต้องมีตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งตัวถูกดูดซับในที่นี้คือ ทองแดงและนิกเกิล ส่วนตัวถูกดูดซับจะเป็นวัสดุที่หาง่ายในประเทศ วัสดุดูดซับที่ดีจะมีคุณสมบัติคือ มีพื้นที่ผิวมากและมีรูพรุนภายในมาก เช่น ฐูปฤชี และผักตบชวา เป็นต้น พืชเหล่านี้ถือว่าเป็นมลพิษทางน้ำ โดยเฉพาะผักตบชวาเนื่องจากผักตบชวามีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม จากการสำรวจข้อมูลของในเดือนกันยายน พ.ศ.2559 พบว่าผักตบชวามีปริมาณ 4 ล้านตัน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2559) อีกทั้งผักตบชวามีองค์ประกอบที่เหมาะสมในการนำมาทำตัวดูดซับ ซึ่งองค์ประกอบนั้น คือ มีปริมาณเซลลูโลส 58.74% และเฮมิเซลลูโลส 40.3% (Zhu และคณะ, 2007) และเมื่อถูกเผา ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะได้ซี้เถ้า 27.18%, O+N/C ratio 0.63%, O/C ratio 0.61%, H/C ratio 0.447%, surface area (S_{BET}) 6.7131 m^2/g (Feng Li และคณะ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2016) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ ในอดีตเคยมีการนำผักตบชวามาใช้ทำเป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่นักวิจัยได้ทำการทดลองนำเอาผักตบชวามาดูดซับโลหะปนเปื้อนในน้ำเสีย (Anzeze และคณะ, 2014) พบว่ายังมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ไม่ดีพอ ยังไม่สามารถเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในขณะนี้ จึงมีนักวิจัยอีกส่วนหนึ่ง นำเอาผักตบชวามาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสให้มีลักษณะเป็นถ่านชีวภาพพร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน แล้วนำถ่านชีวภาพนี้ไปดูดโลหะบางชนิดในแหล่งน้ำเสียประสิทธิภาพการดูดซับส่วนมากดีขึ้นกว่าที่ไม่ผ่านการไพโรไลซิส (Zhang และคณะ, 2015) และเรามีความสนใจในการทำถ่านชีวภาพให้อยู่ในสภาพแม่เหล็ก (Ahmed และคณะ, 2016) ซึ่งจากวิธีการดังกล่าวสามารถช่วยให้การดูดซับได้ดียิ่งขึ้น และการทำเป็นสถานะแม่เหล็กจะทำให้การที่สามารถแยกถ่านชีวภาพออกมาจากน้ำที่บำบัดได้ง่าย ส่งผลให้ไม่ก่อให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการวิจัยในเรื่องการดูดซับโลหะโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานมีผู้วิจัยไม่มากนัก จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้มีความสนใจในการศึกษาวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ biochar, biochar/ Fe_2O_3 และ chitosan-biochar/ Fe_2O_3 composite
- 2) เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับนิกเกิล และ ทองแดงของ chitosan-biochar/ Fe_2O_3 composite
- 3) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ในน้ำเสียที่อาจส่งผลต่อการดูดซับ
- 4) เพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสำหรับโลหะแต่ละชนิด
- 5) เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ
- 6) เพื่อศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาการดูดซับ
- 7) เพื่อศึกษาการนำกลับมาใช้ประโยชน์โดยการคายซับด้วยวิธีต่าง ๆ แล้วทำการดูดซับอีกครั้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) นำผักตบชวาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ 2 กระบวนการคือ ทำให้เป็น biochar/ Fe_2O_3 และ chitosan-biochar/ Fe_2O_3 composite
- 2) ถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วทั้ง 2 กระบวนการนำมาศึกษา ลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยใช้เครื่อง SEM, FTIR, XRD, และหาค่า zero point charge
- 3) ทำการดูดซับโลหะที่มีความเป็นพิษ 2 ชนิดคือ นิกเกิล และ ทองแดง
- 4) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ โดยแปรผันค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของน้ำเสียและอุณหภูมิของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ (NaCl , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCl_2 , Na_2HPO_4 , Na_2SO_4) ในน้ำเสียที่อาจส่งผลต่อการดูดซับ
- 6) ศึกษา 4 ไอโซเทอมการดูดซับสำหรับโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich
- 7) ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model และ Intra-particle diffusion model และหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส
- 8) ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาการดูดซับ คำนวณค่าเอนทัลปี (ΔH°) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ หาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) และหาค่าเอนโทรปี (ΔS°)
- 9) ศึกษาการนำกลับมาใช้ประโยชน์โดยการคายซับด้วยวิธี EDTA, HNO_3 และ NaNO_3 แล้วทำการดูดซับอีกครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำวัสดุธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการลดวัชพืชทางน้ำ
- 2) เป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนโลหะหนัก
- 3) เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมโลหะ

อุตสาหกรรมโลหะ เป็นอุตสาหกรรมที่ทำหน้าที่ผลิตวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ เช่น ทองแดงทำสายไฟฟ้า ตะกั่วทำโลหะบัดกรี สังกะสีตีบุกสำหรับเคลือบสนิม เหล็กทำเครื่องจักร ยานพาหนะ โดยในแต่ละปีการผลิตและการบริโภคโลหะของประเทศไทยมีมูลค่าหลายแสนล้านบาท ดังนั้นอุตสาหกรรมโลหะจึงเป็นกลไกหนึ่งในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ทำให้มีผลต่างๆ ตามมา คือ โลหะตกค้างในน้ำเสีย ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ

2.2 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศหรือ อับอากาศในช่วงอุณหภูมิสูง ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และอื่นๆ) ของเหลว (สารละลายอินทรีย์และน้ำมันดิน (Tar)) และของแข็ง (ถ่าน) โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และ สารประกอบในผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและวิธีการไพโรไลซิส ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับการเผาในเตาเผา เนื่องจากจะได้น้ำมัน ชีวมวลเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ซึ่งนับว่านอกจากเป็นการกำจัดของเสียแล้วยังได้พลังงานทดแทนเป็นผลพลอยได้อีกด้วย

หลักการของกระบวนการไพโรไลซิส

การทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มี ความชื้น ประมาณร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำโดยอาศัยกระบวนการทำแห้งที่ อุณหภูมิ ประมาณ 120 – 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ ประมาณ 500–600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของ กระบวนการ ไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้เช่น น้ำกรดอะซิติก กรดฟอร์มิกอะซิโตน เมธานอลเมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์ และถ่านหลังจากนั้น เมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900–1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ ระบบจะทำให้ทาร์และถ่านเกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่อไป ซึ่ง ขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการแกสซิฟิเคชันนั่นเอง

2.3 การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้เกาะจับและติดบนผิว เป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ ซึ่งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวมีตัวถูกดูดซับมาเกาะเรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและยังมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียง ขนาด เป็นต้น คุณสมบัติเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

2.3.1 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 มีลักษณะคล้ายการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีมีการสร้างพันธะของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวตัวดูดซับ มีการสร้างพันธะไอออนิกหรือโควาเลนต์ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูง เป็นผลให้การดูดซับส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้ เมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพที่ผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีเกิดบริเวณพื้นที่จำเพาะเจาะจงและเกิดที่อุณหภูมิสูง

2.3.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

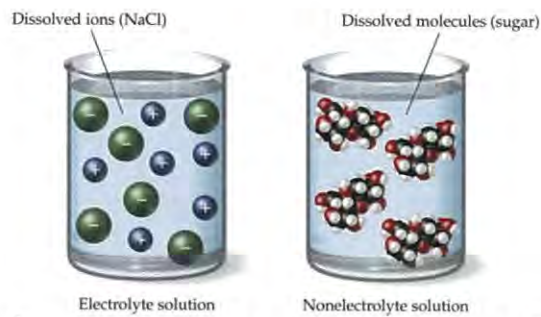
- 1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ
- 2) การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- 3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดติดพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2550)

- 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ดูดซับได้มากกว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ
- 2) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็น ปัจจัยสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถของตัวถูกละลายลดลง เพราะในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายน้ำได้น้อย จะสามารถถูกดูดซับได้ดี นอกจากนี้แล้ว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ คือ ถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นอัตราควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการ ดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับ คือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง
- 3) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผล ต่อการดูดซับด้วย โดยทั่วไปไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวของ ตัวดูดซับได้ดี
- 4) อุณหภูมิ กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงแต่การดูดซับของเหลวนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิมีค่าน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมีค่าความจุความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ (Alcoholic), คาร์บอนิก (Carbonylic) และ ฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมบางชนิด นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ สัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น
- 5) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเวลาที่สัมผัส มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย
- 6) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิด फिल्मบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถัง การดูดซับ คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจึงทำให้ อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สารอิเล็กโทรไลต์และนอนอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.1 การเป็นอิเล็กโทรไลต์และนอนอิเล็กโทรไลต์

<https://sites.google.com/site/acidsandbasestutorial/acid>

2.4.1 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

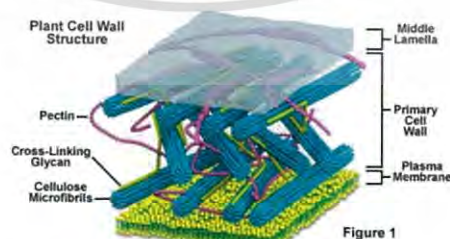
สารที่เมื่อละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกหรือไอออนลบได้ จึงทำให้สารอิเล็กโทรไลต์สามารถที่นำไฟฟ้าได้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

- 1) อิเล็กโทรไลต์แก่ (Strong Electrolyte) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วสามารถที่จะแตกตัวเป็นไอออนบวก หรือ ไอออนลบได้เป็นจำนวนมาก อาจจะแตกตัวได้ถึง 100% ดังนั้นสารอิเล็กโทรไลต์แก่จึงสามารถที่จะนำไฟฟ้าได้ดีมาก เช่น กรดแก่ เบสแก่ เกลือ
- 2) อิเล็กโทรไลต์อ่อน (Weak Electrolyte) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วสามารถที่จะแตกตัวเป็นไอออนบวก หรือ ไอออนลบได้บางส่วนเท่านั้น ดังนั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์อ่อนจะนำไฟฟ้าได้เล็กน้อย เช่น กรดอ่อน เบสอ่อน

2.4.2 นอนอิเล็กโทรไลต์ (Non-Electrolyte)

สารที่ละลายน้ำแล้วไม่สามารถที่จะแตกตัวเป็นไอออนบวกหรือไอออนลบได้ ดังนั้นสารจำพวกนี้ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น น้ำบริสุทธิ์ น้ำตาล แอลกอฮอล์

2.5 องค์ประกอบของเซลล์พืช



รูปที่ 2.2 ภาพโครงสร้างของเซลล์พืช

<https://sites.google.com/site/saifonsaen/khorngrang-laea-hnathi-khxng-sell-phuch-laea-e/cellwall.jpg?attredirects=0>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบที่พบเฉพาะในเซลล์พืช (ชุตिकाญ์ โภคินพลวัฒน์, 2554)

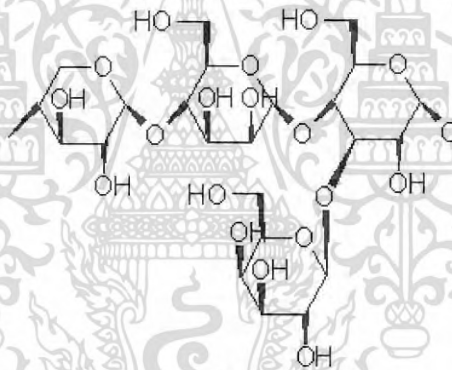
ผนังเซลล์ (Cell wall)

เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของเซลล์พืช มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตจำนวนมาก แรกๆผนังเซลล์จะบาง และจะหนาขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการสะสมของสารต่างๆ ซึ่งความหนาของผนังเซลล์จะเพิ่มจากข้างในแล้วดันชั้นเก่าออกห่างจากโปรโตพลาส ชั้นใหม่ที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Secondary cell wall) ผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นแต่ละชั้นจะมีความหนาแตกต่างกันทำให้เกิดเป็นช่องว่างเพื่อให้สารต่างๆ สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ เรียกว่า พิต (Pit) ซึ่งผนังเซลล์มีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

1) ไมโครไฟบิลลา โพลีแซคคาไรด์ (Microfibrillar Polysaccharides)

ส่วนที่พบได้มากที่สุดคือแมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์ (Matrix polysaccharides) เป็นของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ทำหน้าที่ห่อหุ้มไมโครไฟบิลลาโพลีแซคคาไรด์ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และแพคติน (Pectin)

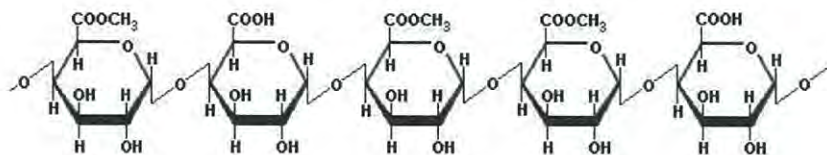
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประกอบไปด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ ที่เกาะกันแบบ β -1, 3-glycosidic bond จะพบบริเวณปลายเซลล์ท่ออาหาร (Sieve tubes)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/430/pectin>

แพคติน (Pectin) มีหน้าที่ทำให้เซลลูโลสติดกัน สามารถพบมากในมิดเดิลลามลลา (Middle lamelle)



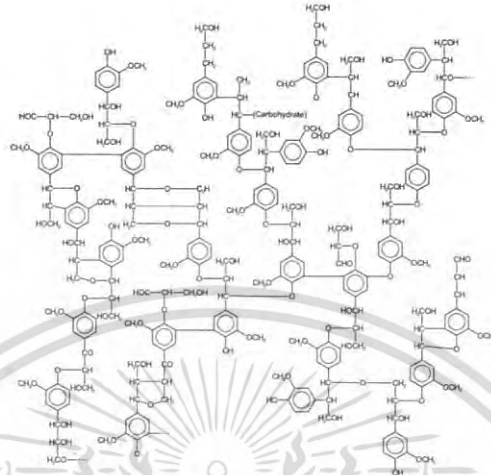
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแพคติน

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/430/pectin>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ลิกนิน (Lignins)

พบมากในผนังเซลล์ทุติยภูมิที่ตายแล้ว ประกอบไปด้วยสารเคมีที่มีโมเลกุล การเกิดลิกนินนั้น จะทำให้เซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้น ปกป้องไฟบริล ทำให้ไฟบริลไม่เคลื่อนที่

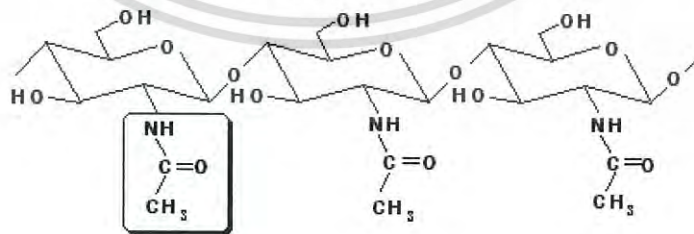


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน

[http : www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/lignin.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/lignin.htm)

2.6 ไคโตซาน

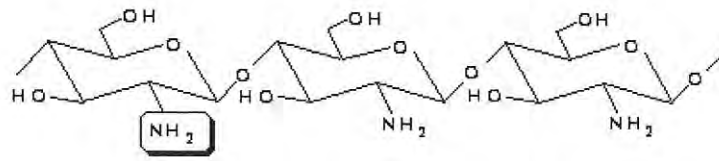
ไคโตซาน (chitosan) หรือ deacetylatedchitin เป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจาก glucosamine และ N-acetylglucosamine ประกอบด้วย glucosamine มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยากับด่างเข้มข้นเพื่อกำจัดหมู่อะซิติลออกทำให้โมเลกุลเล็กลง และมีคุณสมบัติอ่อนตัวสามารถขึ้นรูปเป็นเจล เม็ด เส้นใย หรือคอลลอยด์ รวมถึงการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ได้มากขึ้น นอกจากนี้ไคโตซานประกอบด้วยหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น เปลี่ยนเป็นสารอนุพันธ์อื่นๆ ได้หลากหลาย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคติน

[https : sites.google.com/site/dawpudaengthungthxngkarkestr/daowpoodeang/periyb-theiyb-kar-chi-puy-xinthriy-khemi/kar-chi-puy-khem/ru-reuxng-khi-tin-khi-to-san](https://sites.google.com/site/dawpudaengthungthxngkarkestr/daowpoodeang/periyb-theiyb-kar-chi-puy-xinthriy-khemi/kar-chi-puy-khem/ru-reuxng-khi-tin-khi-to-san)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

<https://sites.google.com/site/dawpudaengthungthxngkarkestr/daowpoodeang/periyb-theiyb-kar-chi-puy-xinthriy-khemi/kar-chi-puy-khem/ru-reuxng-khi-tin-khi-to-san>

ประโยชน์ของไคโตซานและไคตินทางด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยคุณสมบัติของไคติน และไคโตซานที่สามารถดูดซับ และจับกับสารอินทรีย์จำพวกไขมัน สี รวมถึงสารจำพวกโลหะหนักได้ดีจึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเป็นสารกรองหรือตัวดูดซับสารมลพิษในระบบบำบัดน้ำเสีย

2.7 ผักตบชวา (Water Hyacinth)

ผักตบชวามีลักษณะเป็นไม้ลอยน้ำ รูปร่างของใบค่อนข้างกลม สีเขียว ดอกของผักตบชวามีสีฟ้าอมม่วง จะสามารถออกดอกได้ช่วงปลายฤดูหนาวจนถึงต้นฤดูร้อน

2.7.1 การสืบพันธุ์ของผักตบชวา

1) การสืบพันธุ์โดยอาศัยเพศ

เกิดจากการผสมเกสรของดอกและหล่นลงไปใต้น้ำ อาจจะถูกน้ำพัดพาไป หรือว่าอาจจะฝังตัวอยู่ในโคลนตม ซึ่งเมล็ดของผักตบชวานั้นสามารถมีชีวิตอยู่ได้ 15 ปี หากสภาพแวดล้อมเหมาะสมจะสามารถงอกได้ทันที และเจริญเติบโตเป็นต้นใหม่ อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของผักตบชวาก็มีปัจจัยหลายอย่างคือ ต้องอาศัยอุณหภูมิมากกว่า 2 องศาเซลเซียส และต้องการแสงแดดที่เพียงพอที่จะสามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้

2) การสืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศ

เกิดจากการแตกไหลของต้นเก่าเป็นต้นใหม่มากมาย และสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งผักตบชวาเพียง 10 ต้น สามารถที่จะแตกไหลได้ถึง 600,000 ต้น ในเวลาเพียง 6 เดือนเท่านั้น อีกทั้งยังอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ จึงทำให้เกิดปัญหาการแพร่ระบาดของผักตบชวาจนต้องมีพระราชบัญญัติในการที่จะจัดการกับผักตบชวา อย่างไรก็ตามการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศนั้นจะสามารถสืบพันธุ์และเจริญเติบโตได้ดีก็ต่อเมื่อ pH ของแหล่งน้ำมีค่า 4-10 และมีอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 35 องศาเซลเซียส

2.7.2 ประโยชน์ของผักตบชวา

ในผักตบชวามีน้ำเฉลี่ยประมาณ 95% ผักตบชวาสามารถช่วยบำบัดน้ำเสียได้ โดยอาศัยคุณสมบัติการเป็นตัวกรองของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่จะผ่านผักตบชวา ส่วนในระบบรากยังช่วยกรองสารอินทรีย์ละลายได้ดี นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในรากก็เป็นตัวที่จะช่วยดูดสารอินทรีย์อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ระบบรากยังดูด ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำไปใช้ในการบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จึงช่วยให้สามารถลดปริมาณ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ผลกระทบของฝักตบขวา

เมื่อมีฝักตบขวาเป็นจำนวนมากจะเกิดผลเสียคือ จะบดบังแสงแดดที่จะส่งลงสู่แหล่งน้ำ ออกซิเจนละลายน้ำได้ไม่ได้ เพราะว่าถูกฝักตบขวาบดบังไว้ และยังสร้างปัญหาให้แก่ การประมง ขลประทาน การไฟฟ้าพลังน้ำ การคมนาคม การท่องเที่ยวและการสาธารณสุข

2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี

2.8.1 เอนทัลปี (enthalpy, H)

เป็นเทอร์มที่ใช้บอกถึงปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือถูกคายออกมาต่อโมลของสารที่ การเปลี่ยนแปลงสถานะ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ความดันคงที่และงานที่เกี่ยวข้องเป็นแบบขยายตัวหรือ หดตัวเท่านั้น ให้เอนทัลปี คือ H

การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี คือ $\Delta H = H_2 - H_1$ Δ อ่านว่า เดลต้า (Δ) H_2 และ H_1 เป็น สถานะสุดท้าย (Final state) และสถานะเริ่มต้น (Initial state) ตามลำดับ เครื่องหมายบวกของ เอนทัลปีบ่งบอกถึงการเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หรือ ดูดความร้อน

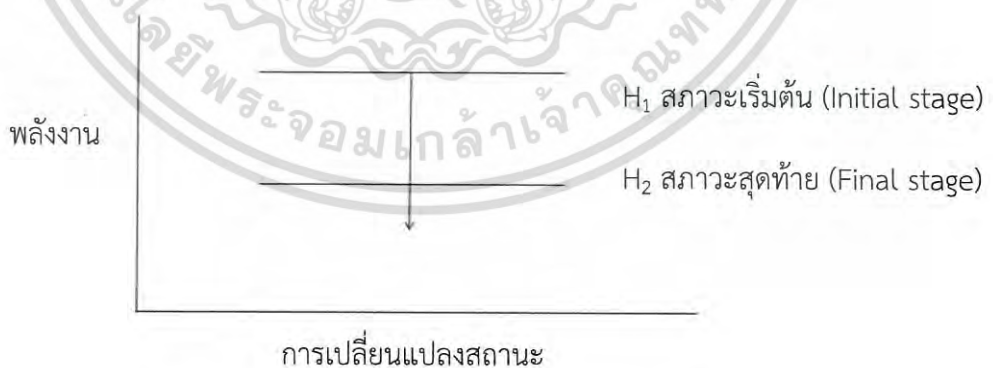
$$\Delta H = H_2 - H_1$$

(2.1)

H_2 = สถานะสุดท้าย (Final state)

H_1 = สถานะเริ่มต้น (Initial state)

ในกรณีที่ H_2 มีค่าน้อยกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพมากกว่า H_1 (ระบบที่มีเสถียรมากกว่า จะมีพลังงานน้อยกว่า) การเปลี่ยนแปลงสถานะนี้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสถานะกับพลังงาน

ΔH มีค่าเป็นลบ = ความร้อนคายออกมาจากระบบ (Exothermic) ตรงกันข้ามถ้า H_2 มี พลังงานมากกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพน้อยกว่า H_1 ความร้อนจะต้องถูกดูดเข้าไปในระบบ หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจกล่าวได้ว่าเราจะต้องให้ความร้อนแก่ระบบ ถ้าหาก ΔH มีค่าเป็นบวก = ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)

2.8.2 เอนโทรปี (Entropy, S)

คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบหรืออาจกล่าวได้ ว่าเอนโทรปีบอกให้ทราบว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนกระจายตัวอยู่ในระบบอย่างไม่เป็นระเบียบ มากน้อยเพียงใด ยิ่งระบบมีความเป็นระเบียบมากเพียงใด เอนโทรปีก็จะลดลงเพียงนั้น

$$S_1 = \text{เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น}$$

$$S_2 = \text{เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย}$$

$$\Delta S = \text{เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย}$$

ΔS เป็นปริมาณการวัดได้โดยให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบเริ่มลดลงหรือไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น เอนโทรปี S_2 มีค่าสูงขึ้น ($\Delta S > 0$) และถ้าเพิ่มความร้อนขึ้นไปอีก ความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ S_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ จะเห็นได้ว่า

$$\Delta S = \text{แปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นให้กับระบบ}$$

$$\text{ถ้า } \Delta S = \text{บวก (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)}$$

$$\text{ถ้า } \Delta S = \text{ลบ (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหรือความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)}$$

การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์

จากสมการของกิบส์และเฮลโมทซ์ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล (K) ตามสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งนี้ คือ

$$\ln K = \left(-\frac{\Delta H}{R} \right) d \left(\frac{1}{T} \right) + \text{ค่าคงที่} \quad (2.2)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูป และจากค่าความชันของกราฟ สามารถนำไปคำนวณหา ΔH_0 ได้

2.8.3 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี (Thermodynamic and equilibrium)

กิบส์ (Josiah W. Gibbs) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้นำฟังก์ชันทางเทอร์โมไดนามิกส์อีกฟังก์ชันหนึ่งมาใช้ คือ G เรียกว่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) หรือ เรียกสั้นลงว่า พลังงานอิสระ มีนิยามดังนี้

$$G = H - TS \quad (2.3)$$

สังเกตว่าปริมาณทั้งหมดในสมการ เป็นสมบัติของระบบ รวมทั้งอุณหภูมิ T ด้วยและจะเห็นว่า G มีหน่วยเป็นพลังงาน (ทั้ง H และ TS ก็มีหน่วยเป็นพลังงาน) และเป็นฟังก์ชันสถานะเช่นเดียวกับ H และ S การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (ΔG) ของระบบในกระบวนการที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่ คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

สรุปสภาวะการเกิดปฏิกิริยาและสภาวะที่ระบบจะอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิและความดันคงที่ โดยอาศัยค่าของ ΔG ได้ดังนี้

- $\Delta G < 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางที่ไปข้างหน้า
- $\Delta G > 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ
- $\Delta G = 0$ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในสมการ (2.4) ทำนายเครื่องหมายของ ΔG นั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าของ ΔH และ ΔS ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) และ ΔS มีค่าเป็นบวก (ปฏิกิริยาทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น) ΔG มีแนวโน้มที่จะเป็นลบ แต่อุณหภูมิก็อาจมีผลต่อทิศทางของปฏิกิริยาด้วยว่าจะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางใด ความสัมพันธ์ที่เป็นได้ 4 แบบดังนี้

- 1) ถ้าทั้ง ΔH และ ΔS มีค่าเป็นบวก ΔG จะเป็นลบก็ต่อเมื่อ ΔS มีค่ามากกว่า ΔH นั่นคือเมื่อ T มีค่าสูงขึ้น
- 2) ถ้าทั้ง ΔH เป็นบวก และ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นบวกเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- 3) ถ้าทั้ง ΔH เป็นลบ และ ΔS เป็นบวก ΔG จะเป็นลบเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- 4) ถ้าทั้ง ΔH เป็นลบ และ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นลบเฉพาะเมื่อ ΔS มีค่าน้อยกว่า ΔH นั่นคือ T มีค่าต่ำ

ในกรณีแรกและกรณีสุดท้าย อุณหภูมิที่จะทำให้ ΔG มีค่าเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ ΔH และ ΔS

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ G ในทั้ง 4 กรณี

H	S	G
+	+	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงกันข้าม
+	-	G มีค่าเป็นบวกเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองใน ทิศทางตรงกันข้ามที่ทุกอุณหภูมิ
-	+	G มีค่าเป็นลบเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่ทุกอุณหภูมิ
-	-	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นได้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาคือ

$$\Delta G^0 = G^0 (\text{สำหรับผลิตภัณฑ์}) - G^0 (\text{สารตั้งต้น}) \quad (2.5)$$

ΔG^0 ในสมการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นในสภาวะมาตรฐาน กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ในสภาวะมาตรฐานเช่นกัน สมมติว่าเมื่อเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายโดยให้สารตั้งต้นทุกชนิดอยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือความเข้มข้นเท่ากับ 1 M) ทันทีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะไม่อยู่ในมาตรฐานอีกต่อไป เพราะต่างก็มีความเข้มข้นไม่เท่ากับ 1 M ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช่มาตรฐาน จะต้องทำนายทิศทางของปฏิกิริยาจาก ΔG ไม่ใช่จากความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG และ ΔG^0 คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (2.6)$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/Kmol) T เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ของปฏิกิริยา และ Q เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา จากสมการนี้จะเห็นว่า ΔG มีค่าขึ้นอยู่กับ ΔG^0 และ $RT \ln Q$ สำหรับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T ใดๆ ΔG^0 จะมีค่าที่แน่นอนแต่ค่าของ $RT \ln Q$ มีค่าที่ไม่แน่นอน เพราะ Q อาจเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบของสารในปฏิกิริยา จะมีการพิจารณากรณีพิเศษ 2 วิธี ดังนี้ คือ

- 1) ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นลบมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นบวกมากพอที่จะหักล้างกับพจน์ G^0 ได้ จนกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมากพอ
- 2) ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นบวกมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นลบมากกว่าความเป็นบวกของ G^0 เฉพาะเมื่อมีสารผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อยและสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ โดยนิยามแล้วที่สมดุล $\Delta G = 0$ และ $Q = K$ เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลดังนั้นจะได้

$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (2.7)$$

เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งเพราะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ดังนั้น ถ้าทราบค่าของ K เราจะคำนวณ ค่า ΔG^0 ได้ หรือถ้าทราบค่าของ ΔG^0 ก็จะคำนวณหา K ได้เช่นกัน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yitong Han และคณะ, (2015) ถ่ายชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก ทำมาจากเปลือกถั่วโดยใช้เพอริคลอไรด์ในการแปลงสภาพในรูปสารละลายและนำไปเผาในอุณหภูมิที่หลากหลาย (450-650 องศาเซลเซียส) ทานสภาวะแม่เหล็กแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์จากสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ไม่เป็นสภาวะแม่เหล็ก การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามอุณหภูมิในการเผาสูงสุดอยู่ที่ 77.5 กรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่างที่เผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสในทางตรงกันข้ามกับถ่านสภาวะแม่เหล็ก ถ่านธรรมชาติจะมีการดูดซับที่ต่ำ เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดอนุภาคของถ่านชีวภาพและ ค่า pH ในสารละลายมีความสำคัญในการดูดซับ พื้นผิวของผลิตภัณฑ์จากการดูดซับในแต่ละ การทดลองถูกวัดค่าโดยเครื่อง SEM และ การวิเคราะห์โดยใช้รังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction X-ray photoelectron spectroscopy และ VTM ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า Fe_2O_3 มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพกลไกในการกำจัดโครเมียมขึ้นอยู่กับโปรโตเนท OH บน Fe_2O_3 และมันสามารถละลายซับโดยสารละลายอัลคาไลน์

Jingge Shang และคณะ (2016) การศึกษาได้กำหนดการเตรียมและการสร้างลักษณะของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่เผา ณ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียสในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายที่เป็นน้ำกระบวนการการดูดซับได้มีความสนใจในกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวที่ไม่ปกติกล่าวคือกระบวนการเอสเทอร์ลิฟิเคชัน นอกจากนี้ที่องค์ประกอบในถ่านชีวภาพยังมีส่วนเกี่ยวข้องในการดูดซับแคดเมียมโดยการตกตะกอนพารามิเตอร์เช่น ผลของค่า pH ในสารละลาย เวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นก็ถูกศึกษา ค่า pH คือ 5 ซึ่งสามารถกำจัดแคดเมียมได้ถึง 90% ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมที่สูงที่สุดที่ขึ้นกับไอโซเทอมแลงเมียร์ คือ 49.837, 36.899 และ 25.826 มิลลิกรัมต่อกกรัม กระบวนการการดูดซับของถ่านชีวภาพเป็นไปตาม จลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับที่สองเสมือนโดยสมมูลอยู่ที่ 5 ชั่วโมงโดยประมาณ ถ่านชีวภาพจากผักตบชวามีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียซึ่งสามารถกำจัดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมได้ใกล้เคียงกับเทคโนโลยีทำความสะอาดรูปแบบใหม่

Shang และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำรากสมุนไพร Astragalus mongholicus มาเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในสภาพไร้อากาศ จะได้ถ่านชีวภาพนำไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลลาร์ เพื่อล้างขี้เถ้าออก จากนั้นเทสารละลายผสมเฟอร์ริกและเฟอร์รัส (ในสารละลายประกอบด้วย $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 30 กรัม และ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 16.7 กรัม ละลายในน้ำ 900 มิลลิลิตร) แล้วนำน้ำ 300 มิลลิลิตรที่มีถ่านชีวภาพอยู่ 30 กรัม ปรับ pH ปรับเพื่อของของผสมให้เป็น 10.5 ด้วย 10 โมลลาร์ NaOH เขย่าที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน ไปให้ความร้อนต่ออีก 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ 1 คืนที่อุณหภูมิห้องกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลหลายครั้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส จนแห้ง จะได้ biochar/ Fe_2O_3 นำไปดูดซับโครเมียม (VI) ได้ค่า q_m เท่ากับ 23.85 มิลลิกรัมต่อกกรัมที่ pH เท่ากับ 2 การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับสอง

Trakal และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำเปลือกถั่ว ฟางข้าวฟ่าง ก้านองุ่น กากองุ่น และเมล็ดลูกพลัม ไปล้างและอบแห้ง นำไปเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ตั้งทิ้งไว้ 1 คืนภายใต้ก๊าซไนโตรเจน จะได้ถ่านชีวภาพ นำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25–0.50 มิลลิเมตร ล้างและอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักที่คงที่ นำไปปรับปรุงคุณภาพต่อ โดยนำถ่านชีวภาพ ใส่ลงในสารละลายที่มี 1 กรัมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ละลายอยู่ในน้ำ 100 มิลลิลิตร เขย่าในเข้ก้น เติม 1 โมลลาร์ NaOH ลงไปจน สารละลายมี pH เป็น 12 ระหว่างนี้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จะตกตะกอน เจือจางสารละลายจนมีปริมาตรเป็น 200 มิลลิลิตร ใส่เข้าไมโครเวฟตามบ้าน ขนาดกำลัง 700 วัตต์, 2450 เมกกะเฮิรตซ์ เป็นเวลา 10 นาที จะ ได้ แม่เหล็กที่เป็นเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดนาโนเมตร โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 25-100 นาโนเมตร ล้างน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง อบให้แห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปดูดซับ แคดเมียม (II) และ ตะกั่ว (II) ผลการทดลองคือ สำหรับเปลือกถั่วและเมล็ดพลัม ตัวดูดซับที่ปรับปรุง คุณภาพนี้จะดูดซับ แคดเมียม (II) ได้ดีขึ้นกว่าเดิม 10-16 เท่า แต่สำหรับกำนอ์งุ่น ดูดซับตะกั่ว (II) ได้น้อยลง

Zhang และคณะ (2015) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำผักตบชวาที่บดแล้วไปแช่ใน สารละลาย FeCl_3 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่ 80 องศาเซลเซียส จนแห้ง นำไปเผาที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสภาพไร้อากาศ ล้างและอบจนแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส จะได้ biochar/ Fe_2O_3 จากนั้นนำ biochar/ Fe_2O_3 ไปซัง 6 กรัมแช่ลงในสารละลายโคโตซาน (ในสารละลาย ประกอบด้วยโคโตซาน 6 กรัมละลายอยู่ใน 1,000 มิลลิลิตรของ 2% กรดอะซิติก) เขย่า 30 นาทีที่ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเติม กลูตาอัลดีไฮด์ 1% ปริมาตรต่อปริมาตร ลงไปโดยยังคงเขย่าต่ออีก 30 นาทีที่ 40 องศาเซลเซียส เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายจนมี pH เป็น 9 เขย่าต่ออีก 1 ชั่วโมง จะได้ chitosan-biochar/ Fe_2O_3 จากงานวิจัยพบว่า biochar/ Fe_2O_3 สามารถดูดโครเมียม (VI) ได้ค่า q_m เท่ากับ 167.31 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ 40 องศาเซลเซียส ส่วนถ่านชีวภาพที่ไม่ได้พัฒนาต่อ (biochar) สามารถดูดโครเมียม (VI) ได้ 30 มิลลิกรัมต่อกรัม pH 2 เป็น pH ที่ดีที่สุด การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ เป็นการดูดความร้อน เกิดขึ้นได้เอง และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับสอง ในการศึกษาผลของไอออนอื่นที่มีต่อการดูดโครเมียม (VI) พบว่า PO_4^{3-} and SO_4^{2-} ชัดขวางการดูดซับมากที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo
- 2) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer
- 3) เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
- 4) เครื่องกวนสาร รุ่น MR Hei-Tec ยี่ห้อ Heiolph
- 5) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ Atomic absorption spectrometer (AAS) รุ่น AAnalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
- 6) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ X-ray diffractometer (XRD) รุ่น X'Pert Pro MPD ยี่ห้อ PANalytical
- 7) ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo
- 9) กระดาษกรอง (Filter papers) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
- 10) ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11
- 11) กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- 12) ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
- 13) เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 สารเคมี

- 1) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 2) ไคโตซาน (Chitosan) เกรดการค้า บริษัท Italmar (Thailand)
- 3) กลูตาอัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Italmar (Thailand)
- 4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie
- 5) คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 6) นิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 7) กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Itamer (Thailand)
- 8) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท European Distribution Center

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) แคลเซียมไนเตรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท European Distribution Center
- 10) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 11) โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 12) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagenti
- 13) กรดอะซิติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent
- 14) ผักตบชวา (Water Hyacinth)
- 15) น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

- 1) ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) มา 3.9291 กรัม และนิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) มา 4.4783 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น
- 2) รักษาสภาพตัวอย่างด้วยการเติมกรดไนตริก (HNO_3) 65% จน pH < 2 และปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดงและนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) จากนั้นเก็บรักษาโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส

3.2.2 วิธีการเตรียมถ่านชีวภาพ

- 1) นำผักตบชวามาทำความสะอาด
- 2) ตากแดดให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักแห้งแยกแต่ละส่วน ได้แก่ ราก ใบ และลำต้น เก็บตัวอย่างไปหาความชื้น
- 3) บดผักตบชวาทั้งราก ใบ และลำต้นให้ละเอียด จากนั้นนำไปร่อนในตะแกรงร่อนขนาด 35 mesh
- 4) นำส่วนของ ราก ใบ และลำต้น มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1.5 แล้วแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้
 - ส่วนที่ 1 นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้เป็นถ่านชีวภาพ
 - ส่วนที่ 2
 - นำไปแช่สารละลาย 2.5 M FeCl_3 ในอัตราส่วนผักตบชวาต่อ FeCl_3 เป็น 10 กรัม/ปริมาตร 80 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - แล้วให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 - ผลผลิตที่ได้คือ ถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก

5) การเคลือบไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็กแช่ลงในสารละลายโคโคซาน ซึ่งประกอบด้วยโคโคซาน 6 กรัม ละลายใน 1 ลิตรกรดอะซิติกเข้มข้น 2% (v/v) อัตราส่วนถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก 1 กรัม ต่อสารละลายโคโคซาน 100 มิลลิลิตร
- เขย่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เติมกลูต้าอัลดีไฮด์เข้มข้น 1% (v/v) อัตราส่วนถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก 1 กรัม ต่อกลูต้าอัลดีไฮด์ 25 มิลลิลิตร เขย่าที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นเติม 1 โมลาร์ NaOH ที่ละน้อย จนมีค่า pH เป็น 9 เขย่าต่อที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ผลผลิตที่ได้คือตัวดูดซับที่มีสภาพแม่เหล็กและเคลือบด้วยโคโคซาน นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์

3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ

- 1) วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 2) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในตัวดูดซับโดยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy
- 3) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยวิธี X-ray Diffraction (XRD)
- 4) ศึกษาค่า zero point charge โดยใช้วิธี pH drift method

3.2.4 การทำการดูดซับ

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโลหะไอออนที่แน่นอน (C_0) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ให้ได้ค่าที่ต้องการทดลอง
- 2) เติมตัวดูดซับลงไปปริมาณหนึ่ง (m) เขย่าด้วยเครื่องเขย่า ตามระยะเวลา (t) ที่กำหนดไว้ โดยควบคุมอุณหภูมิ (T) ให้คงที่
- 3) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำส่วนใสไปวัดความเข้มข้นของโลหะไอออนด้วยเครื่อง AAS

3.2.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการดูดซับ

- 1) ปัจจัย pH แปรผันค่า pH 4-10 สภาวะทดลองดังนี้คือ C_0 40 มิลลิกรัมต่อลิตร, m 25 มิลลิกรัม อุณหภูมิห้อง ในช่วง 4 ชั่วโมงแรก เก็บตัวอย่าง 5 มิลลิลิตรทุกๆ ครึ่งชั่วโมง จากนั้นเก็บทุก 2 ชั่วโมงจนครบ 16 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะในน้ำเสียที่เหลือจากการดูดซับในช่วงเวลาต่างๆ โดยเครื่อง AAS
- 2) ปัจจัยปริมาณตัวดูดซับ แปรผันค่า m เท่ากับ 25, 50, 100, 150, 200 มิลลิกรัม สภาวะทดลองดังนี้คือ C_0 40 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH ที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า, เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ในข้อ 3.2.5 ณ อุณหภูมิห้อง
- 3) ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย แปรผันค่า C_0 40, 80, 120, 160, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะทดลองดังนี้คือ m และ pH ที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า, เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ในข้อ 3.2.5 ณ อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ปัจจัยอุณหภูมิของระบบ แปรผันค่า T 35, 45, 55 องศาเซลเซียส สภาวะทดลองดังนี้คือ m และ pH ที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า, C_0 100 มิลลิกรัมต่อลิตร, เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ในข้อ 3.2.5 ณ อุณหภูมิห้อง

ศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ต่างๆในน้ำเสีย

เติมตัวอิเล็กโทรไลต์ต่างๆลงในน้ำเสียดังนี้ 0.01 โมล/ลิตร NaCl, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCl_2 , Na_2HPO_4 , Na_2SO_4 สภาวะทดลองดังนี้คือ m และ pH ที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า, C_0 160 มิลลิกรัมต่อลิตร, t 1 ชั่วโมง, T อุณหภูมิห้อง

ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

โดยใช้ 4 ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model และหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส

ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์

คำนวณค่าเอนทัลปี (ΔH°) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ หาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) และหาค่าเอนโทรปี (ΔS°)

3.2.6 การคายซับและนำตัวดูดซับกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

- 1) นำตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วไปคายซับโดยแช่ใน 0.01 โมลาร์ HNO_3 ปริมาณ 150 มิลลิตร, 0.01 โมลาร์ EDTA ปริมาณ 150 มิลลิตร และ 0.01 โมลาร์ NaNO_3 ปริมาณ 20 มิลลิตร
- 2) เขย่าด้วยความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรอง
- 3) นำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ถูกคายซับออกมาโดยใช้เครื่อง AAS
- 4) ตัวดูดซับที่กรองได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำกลับไปดูดซับน้ำเสียอีกครั้งด้วยวิธีการเช่นเดิม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับทั้ง 2 ครั้ง

บทที่ 4

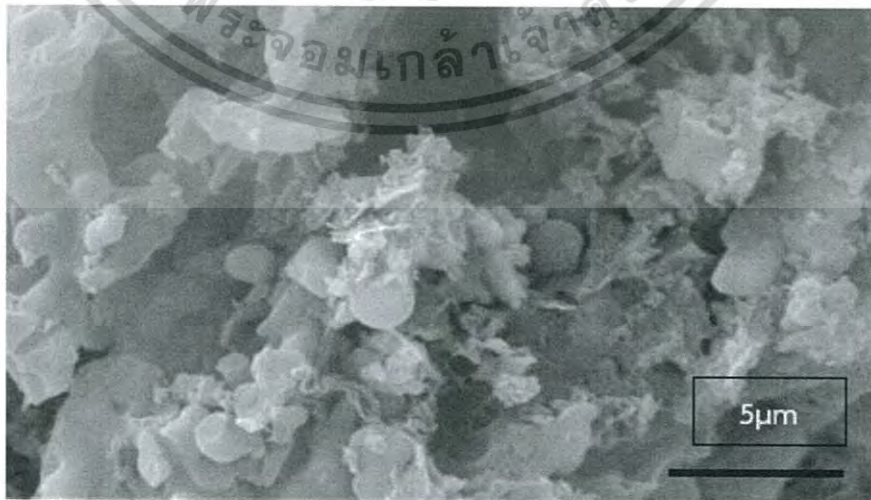
ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

นำผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานไปบดให้ละเอียดเป็นผงมีขนาด 35 mesh จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการถ่ายภาพพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ, ถ่านชีวภาพปรับปรุงให้มีสภาวะแม่เหล็กและถ่านชีวภาพปรับปรุงที่สภาวะแม่เหล็กเคลือบโคโตซาน แสดงดังในรูปที่ 4.1



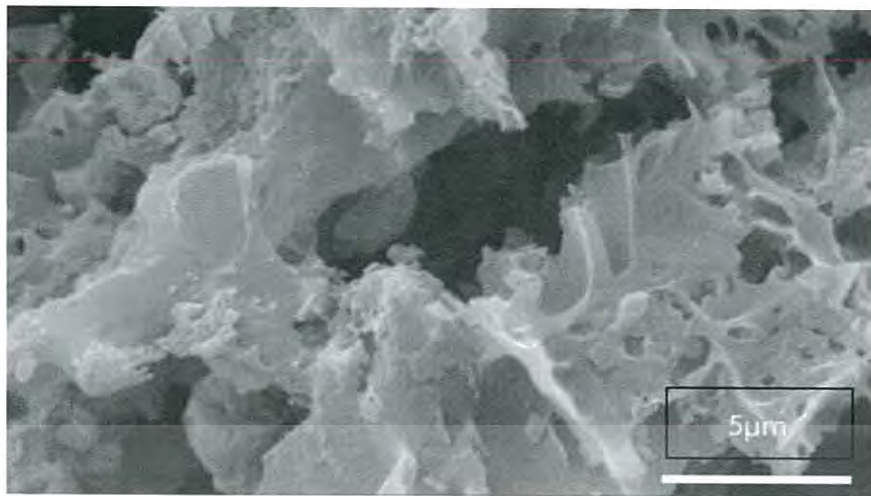
(a)



(b)

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

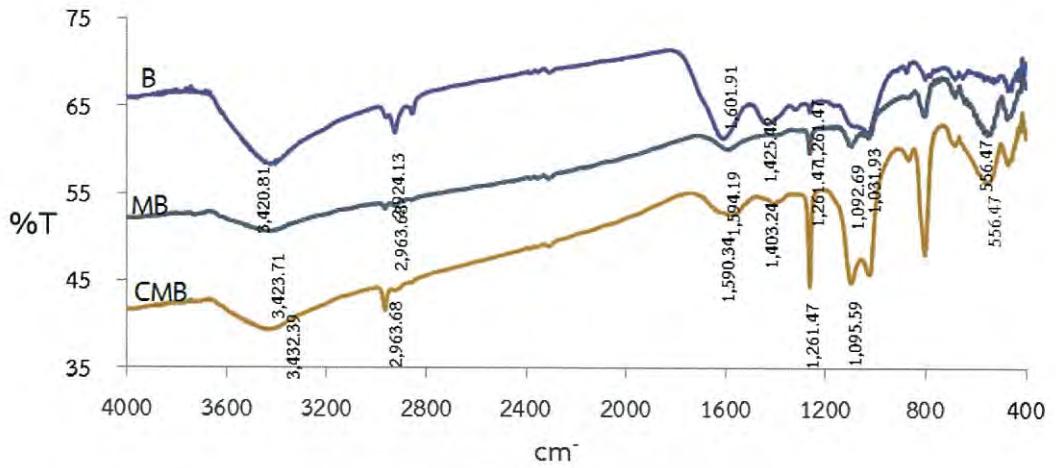
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา (ต่อ)

- (a) ถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 9000 เท่า
- (b) ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก กำลังขยาย 9000 เท่า
- (c) ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน กำลังขยาย 9000 เท่า

จากรูปที่ 4.1 พบว่าถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระน้อย เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพให้มีสภาวะแม่เหล็กจะพบรูพรุนและลักษณะพื้นผิวขรุขระมากขึ้นเนื่องจากเหล็กไปเคลือบบนผิวของถ่าน และเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานจะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่เรียบมากขึ้น

4.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

นำถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก และ ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบสารโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นสเปกตรัมของผักตบชวาที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

กำหนดให้ B = ถ่านชีวภาพ
 MB = ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก
 CMB = ถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน

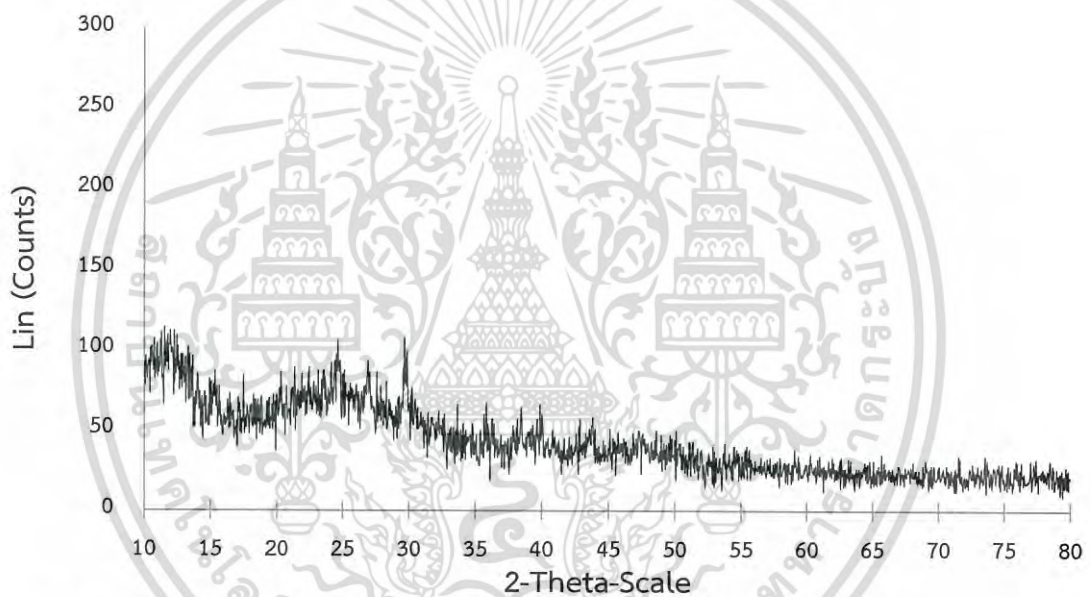
ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	Wavenumber (cm ⁻¹)		หมู่ฟังก์ชัน
	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบไคโตซาน	
3420.81	3423.71	3432.39	O-H
2924.13	2963.68	2963.68	C-H
1601.91	-	-	C=C
-	-	1590.34	C=O
1425.42	-	1403.24	C-O (cellulose)
1261.47	1261.47	1261.47	C-N (Amine)
1092.69	1092.69	1095.59	C-O
-	556.47	556.47	Fe-O

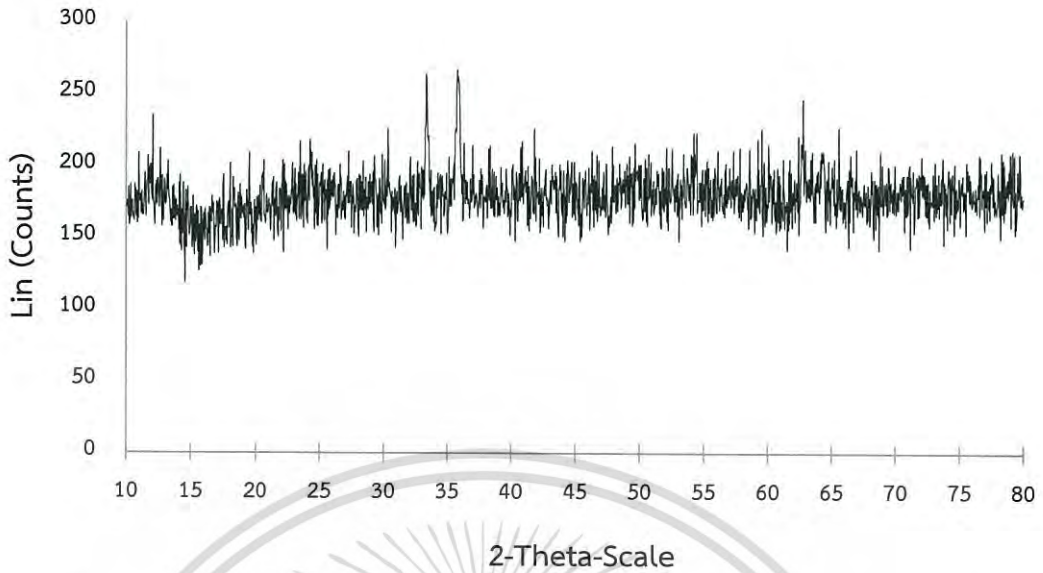
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อนำถ่านชีวภาพทั้งสามชนิดมาวิเคราะห์สเปกตรัมจะพบพีคที่ความยาวคลื่น 3420.81 cm^{-1} , 2924.13 cm^{-1} , 1601.91 cm^{-1} และ 1425.42 cm^{-1} บ่งบอกว่าถ่านชีวภาพมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำทำให้เซลลูโลสยังคงเหลืออยู่ เมื่อพิจารณาพีคของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กและถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความยาวคลื่น 556.47 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ Fe-O (Song และคณะ, 2016) เมื่อพิจารณาถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานจะเห็นว่ามีความยาวคลื่น 1261.47 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกว่ามี C-N ที่เป็นองค์ประกอบของโคโตซานหรือเกิดจากการตรึงไนโตรเจนของพืช (Zhang และคณะ, 2015)

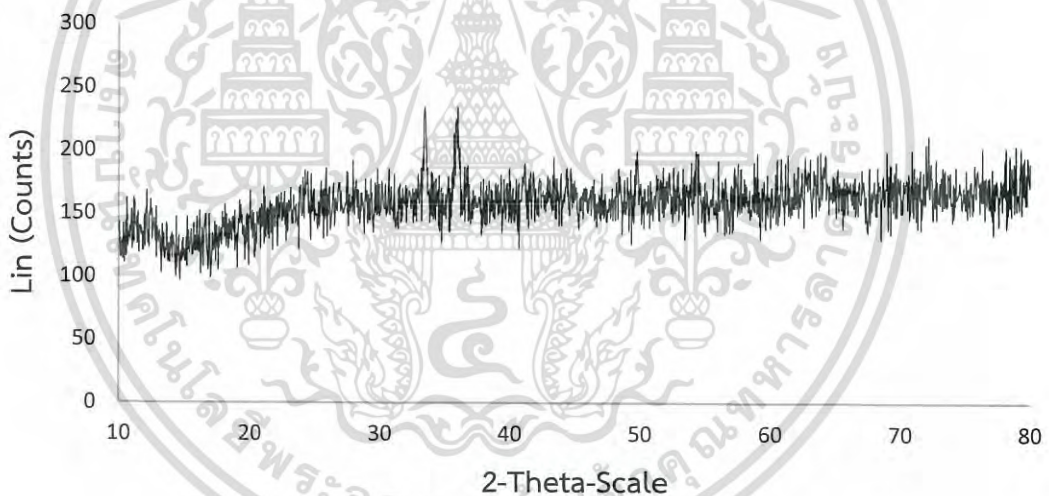
4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer (XRD)



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก

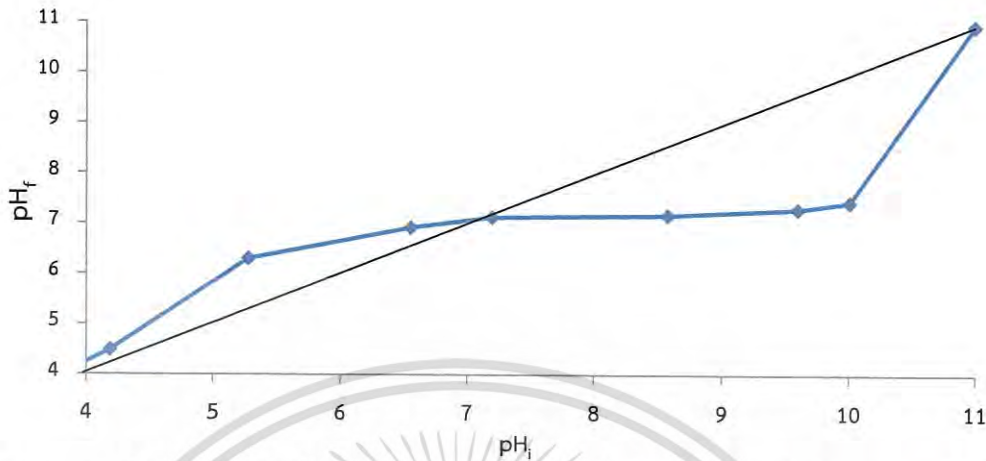


รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กเคลือบไคโตซาน

จากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD) ของถ่านชีวภาพไม่ปรับปรุงคุณภาพ, ถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก, ถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าถ่านผักตบชวาจะไม่ขึ้นพีคเหมือนถ่านผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กและเมื่อนำรูปที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5 พบว่าพีคที่แสดงไม่แตกต่างกันทำให้เห็นว่าเมื่อเคลือบไคโตซานแล้ว พีคดังกล่าวไม่หายไป ซึ่งพีคดังกล่าวได้แก่ พีคที่ 30.16, 35.5, 43.16, 54.3, 56.4, 62.78, ซึ่งแสดงพีคที่แสดงลักษณะของเหล็กออกไซด์ (Shang และ คณ, 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, PH_{PZC})



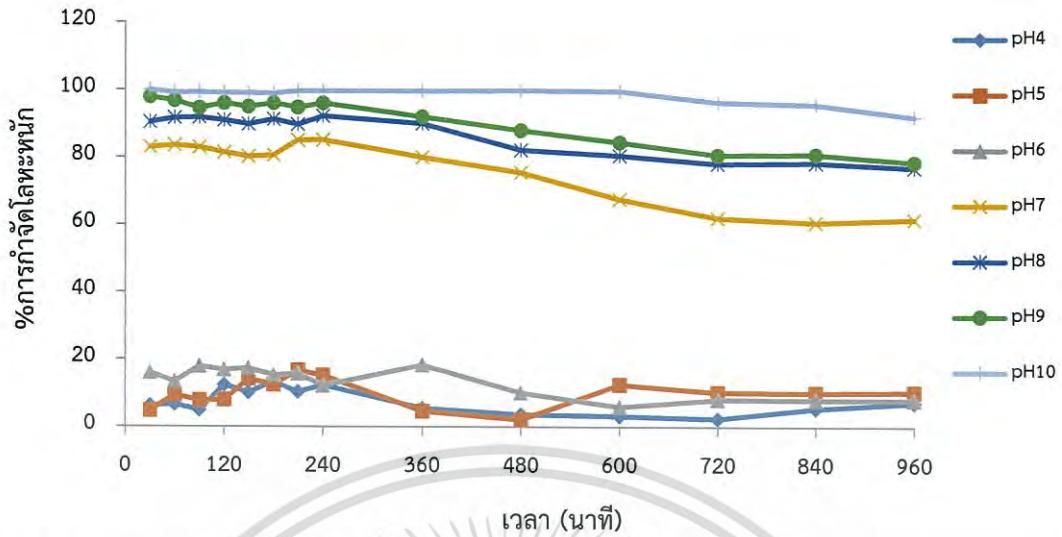
รูปที่ 4.6 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{PZC}) ของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) พบว่าประจุพื้นผิวของถ่านชีวภาพปรับปรุงมีสภาวะแม่เหล็กเคลือบโคโตซานจะเป็นศูนย์เมื่อมีค่า pH เท่ากับ 7.03 เมื่อตัวดูดซับนี้อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูงกว่านี้พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นลบและในทางตรงข้ามถ้าหากในสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่าพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นบวก

4.5 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

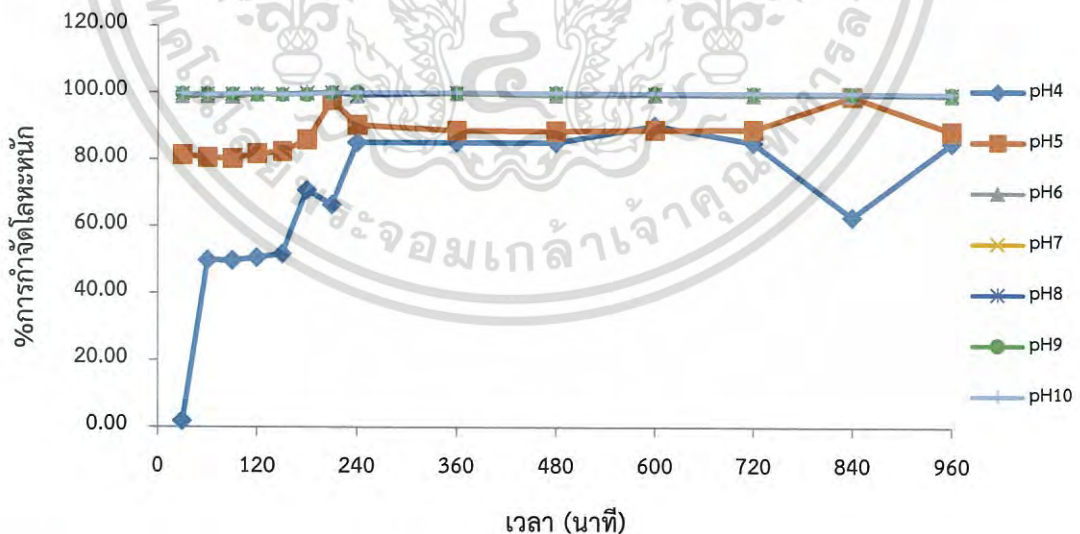
4.5.1 อิทธิพลของค่า pH

การศึกษาค่าผลของ pH ของสารละลายเริ่มต้นในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu และ Ni โดยใช้ปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 25 มิลลิกรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นตั้งแต่ pH 4-10 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะที่เวลาต่างๆ กับค่า pH ของน้ำเสีย ได้ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ รูปที่ 4.9



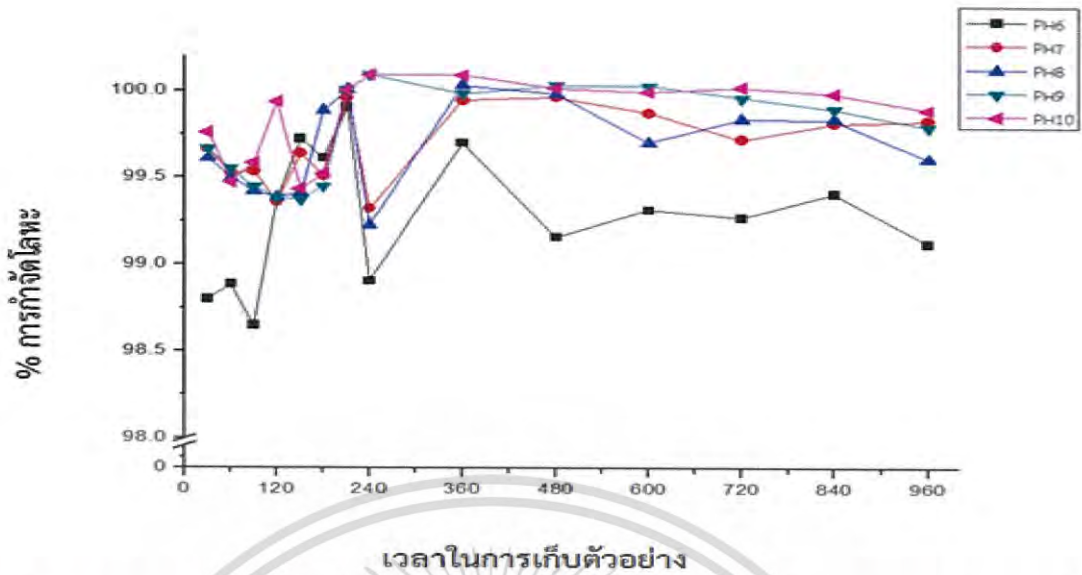
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดนิกเกิลกับเวลา ณ สภาพ pH ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการดูดซับนิกเกิล จะมีประสิทธิภาพสูงที่ pH 7 ขึ้นไป แต่จากการคำนวณค่าการตกตะกอนพบว่าที่ pH 7 ขึ้นไปเกิดการตกตะกอนของนิกเกิลไปบางส่วน เนื่องจากสารละลายเกินสถานะอิ่มตัวทำให้ประจุบวกและประจุลบบางส่วนรวมกันเกิดการตกตะกอนของนิกเกิล ($Q > K_{sp}$)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงกับเวลา ณ สภาพ pH ที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



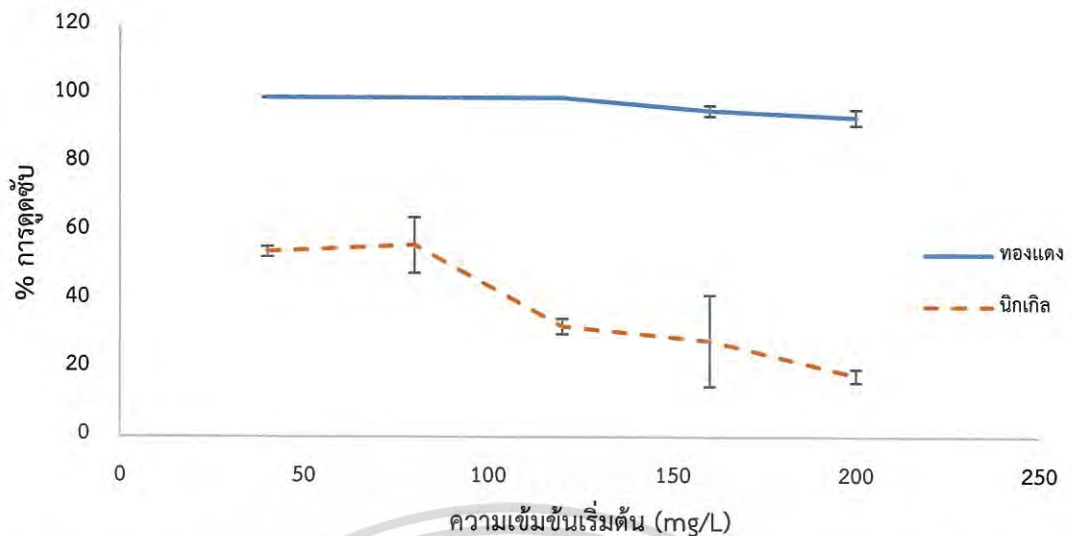
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงกับเวลา ณ สภาวะ pH ที่ต่างกัน (ขยายช่วง pH 6-10)

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นได้ว่าการดูดซับทองแดง จะมีประสิทธิภาพสูงที่ pH 6 ขึ้นไป แต่จากการคำนวณค่าการตกตะกอนพบว่าที่ pH 7 ขึ้นไปเกิดการตกตะกอนของทองแดง เนื่องจากสารละลายเกินสถานะอิ่มตัวทำให้ประจุบวกและประจุลบบางส่วนรวมกันเกิดการตกตะกอนของทองแดง ($Q > K_{sp}$)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือก pH 6 เพื่อทำการทดสอบการดูดซับในขั้นต่อไป เนื่องจากเป็น pH ที่ไม่ทำให้โลหะตกตะกอนและไม่ทำให้ประจุผิวของตัวดูดซับเป็นบวกมากเกินไป ($pH_{pzc} \sim 7$)

4.5.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้ปริมาณถ่านผกตบขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลเป็นดังนี้ 40, 80, 120, 160 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นของทองแดง และเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นของนิกเกิล ดังรูปที่ 4.10

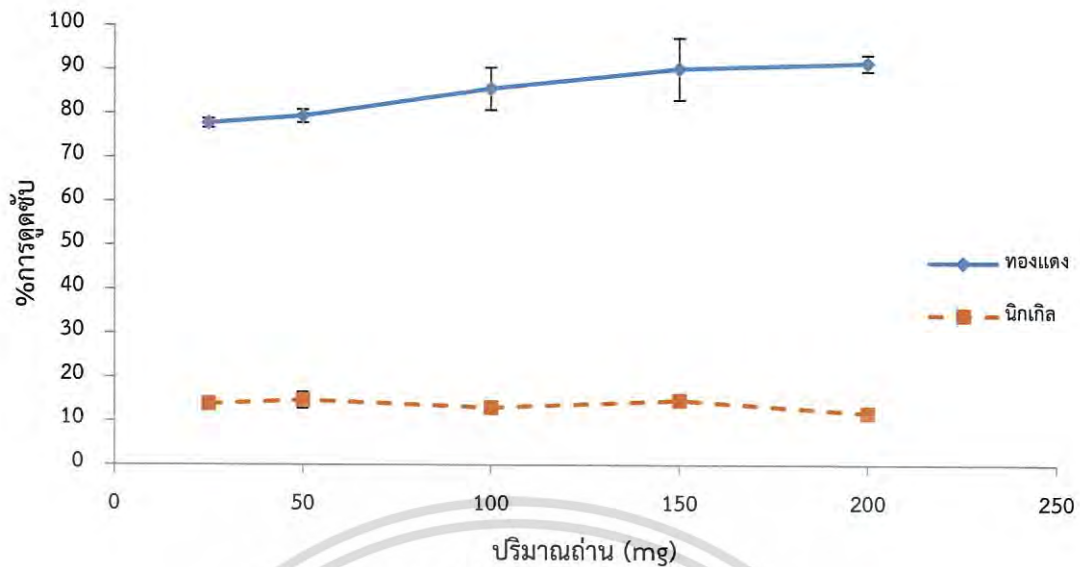


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงและนิกเกิลกับความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับจะลดลง ดังรูปที่ 4.10

4.5.3 อิทธิพลของปริมาณถ่านผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน

การศึกษาผลของปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของถ่านผักตบชวาดังนี้คือ 25, 50, 100, 150, 200 มิลลิกรัม สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่เวลาต่างๆ กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.11



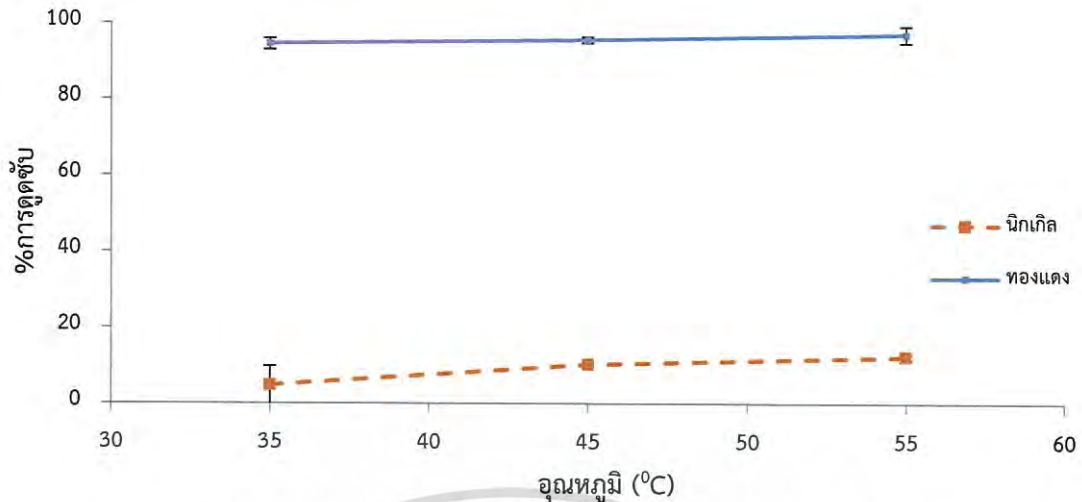
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงและนิกเกิลกับปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับในการดูดซับทองแดงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านชีวภาพปริมาณ 100, 150 และ 200 มิลลิกรัม ให้ผลเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังนั้นปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมในการนำมาดูดซับเท่ากับ 100 มิลลิกรัม ซึ่งนำมาใช้ในการทดลองถัดไป ในขณะที่การดูดซับนิกเกิลเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

4.5.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล โดยใช้ปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเสียดังนี้ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับ กับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 4.12

เมื่อใช้น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 100 มิลลิกรัม, ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิตร, ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 6 และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

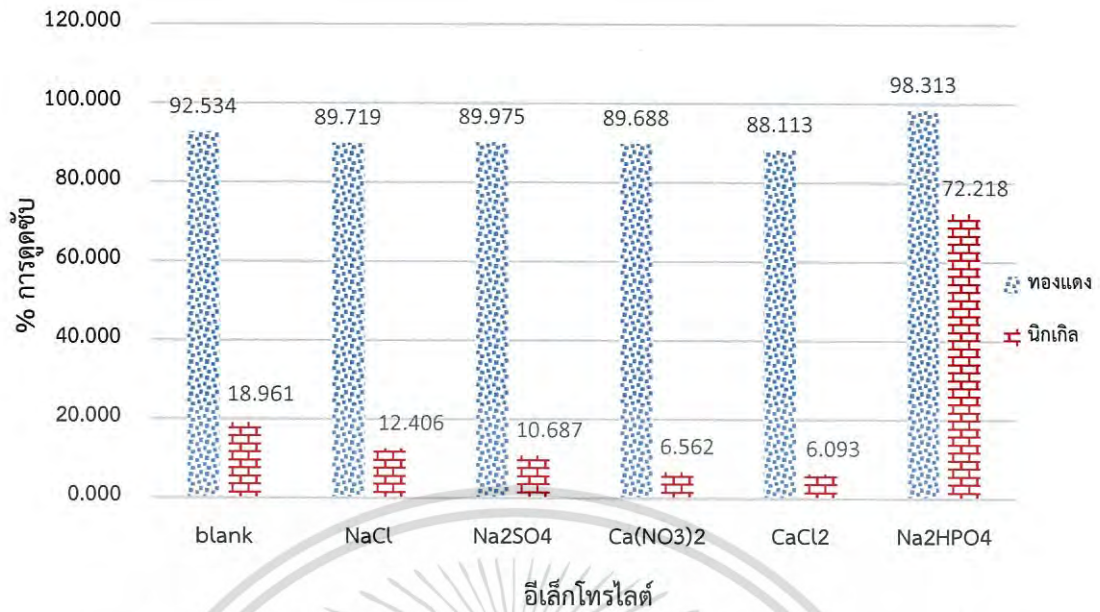


รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์การดูดซับนิกเกิลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สภาวะ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งต้องศึกษาอุณหพลศาสตร์ต่อไป เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เร็วขึ้น ชนกันมากขึ้นและปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.12

4.5.5 อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาค่าผลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ปริมาณถ่านผัดบดขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียเท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใส่อิเล็กโทรไลต์ในสารละลายน้ำเสียความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ดังนี้ NaCl , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCl_2 , Na_2HPO_4 และ Na_2SO_4 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์การดูดซับกับชนิดของอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับและชนิดของอิเล็กโทรไลต์

จากอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อเติมอิเล็กโทรไลต์ลงไปพบว่า CaCl₂ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงมากที่สุด เนื่องจากเกลือของ Ca มีอิทธิพลในการขัดขวางการดูดซับมากกว่าเกลือของ Na (Maurya และคณะ, 2006) และ Na₂HPO₄ จะเกิดการแตกตัวเป็น HPO₄²⁻ + Na⁺ และ HPO₄²⁻ ทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้สมการดังนี้



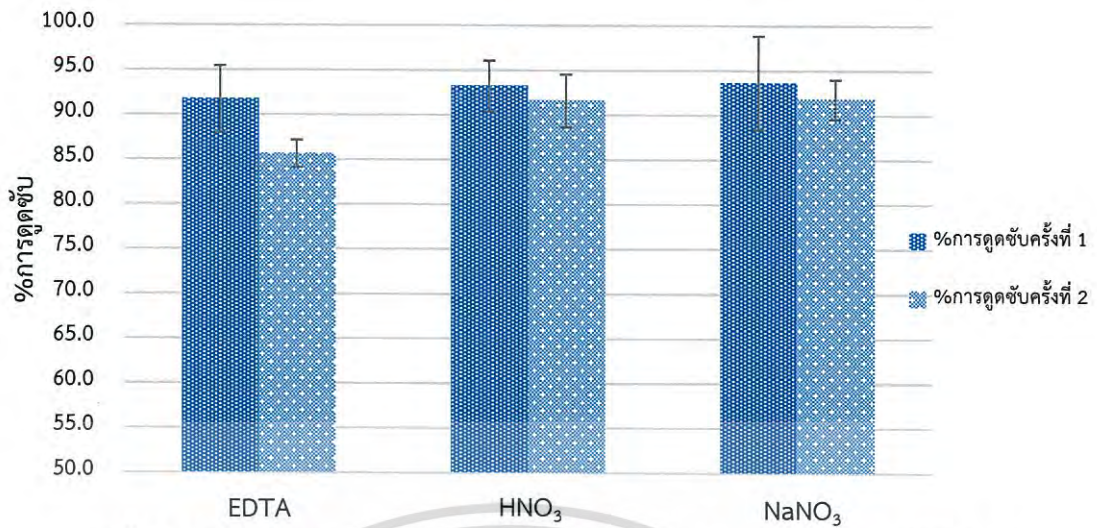
จากนั้น OH⁻ จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักได้ดังสมการต่อไปนี้



จึงสามารถสรุปได้ว่า Na₂HPO₄ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกตะกอน

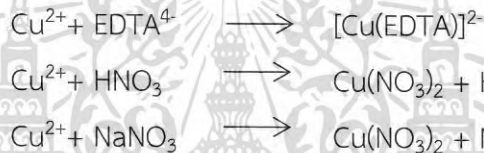
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับทองแดงและนิกเกิลโดยใช้วิธีการคายซับต่างๆ

จากการทดลองต้องการที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับครั้งที่ 1 และประสิทธิภาพการดูดซับครั้งที่ 2 หลังจากทำการคายซับทองแดงและนิกเกิล โดยใช้วิธีการคายซับที่แตกต่างกัน ดังนี้ คายซับโดยใช้ EDTA, HNO₃ และ NaNO₃ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.14

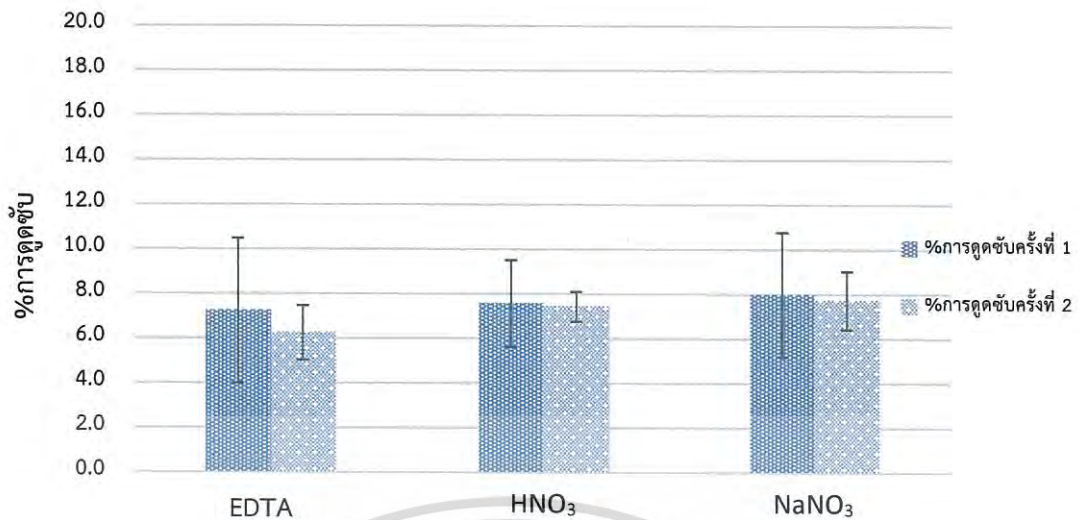


รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับทองแดงโดยใช้วิธีต่างๆ

กลไกการคายซับมีดังนี้



จากสมการพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคายซับเป็น $[\text{Cu}(\text{EDTA})]^{2-}$ และ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ซึ่งจากงานวิจัยของ (Hu และ Sorensen, 1995) มีการเปรียบเทียบการคายซับของเพปไทด์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน พบว่ายิ่งเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบที่มีขนาดใหญ่มากเท่าใด จะส่งผลให้การคายซับเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารประกอบที่มีขนาดเล็กซึ่ง $[\text{Cu}(\text{EDTA})]^{2-}$ มีขนาดใหญ่กว่า $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ จึงเป็นเหตุผลให้วิธีการคายซับด้วย EDTA มีประสิทธิภาพในการดูดซับครั้งที่สองน้อยมากที่สุด



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการดูดซับหลังจากทำการคายซับนิกเกิลโดยใช้วิธีต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่าวิธีการคายซับโดยใช้ EDTA ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับในครั้งที่ 2 น้อยที่สุดเช่นเดียวกับทองแดง

4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพ

ทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลที่มีความเข้มข้นตั้งต้นคือ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการดูดซับทองแดงใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย โคโตซาน 25, 100, 150 มิลลิกรัม และ การดูดซับนิกเกิลใช้ปริมาณถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน 25, 100, 200 มิลลิกรัม pH ของน้ำเสียเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich ผลการคำนวณแสดงได้ดังนี้

4.7.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่มีผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

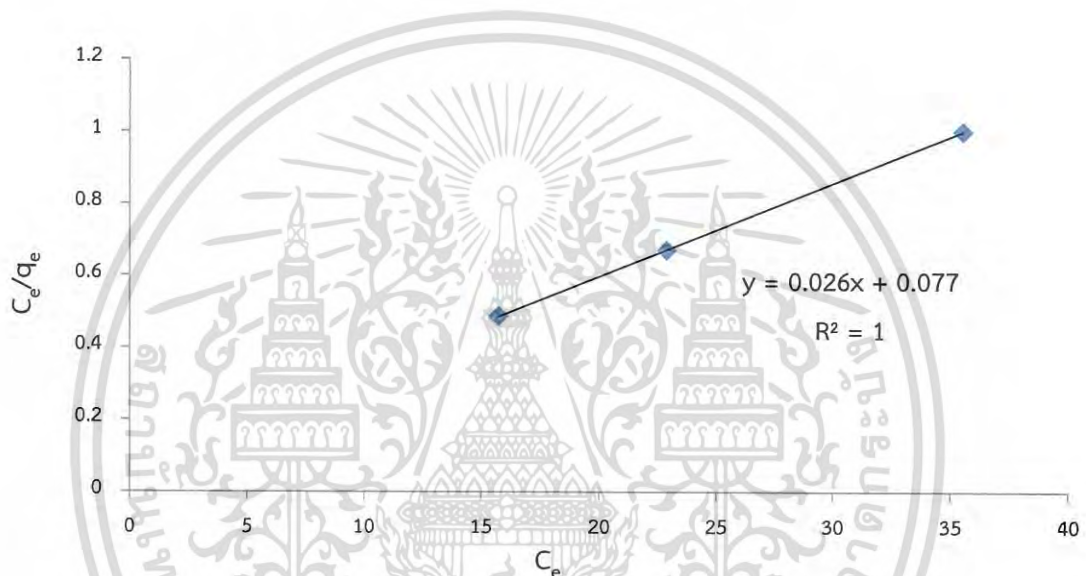
โดย C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดังที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับทองแดง

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.026 และจุดตัดแกน $y = 0.077$ สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_m) ค่าคงที่สมการ Langmuir (K_L) และค่า R_L ได้ดังนี้

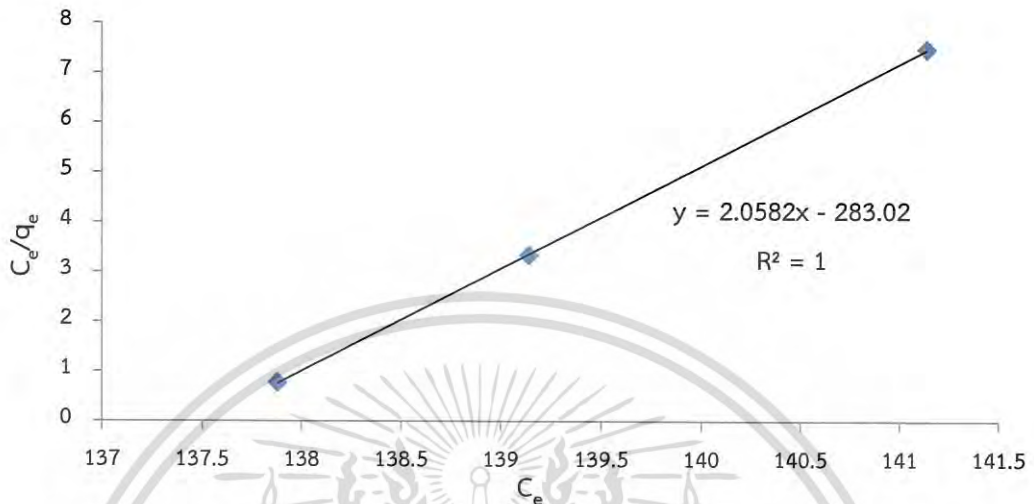
$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{K_L C_o} \\ 0.026 &= \frac{q_m}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1 + (0.3376L/mg)(40mg/L)} \\ q_m &= 38.4615 \text{ mg/g} & R_L &= 0.0689 \end{aligned}$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{1}{K_L q_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.077 = \frac{1}{K_L (38.4615 \text{ mg/g})}$$

$$K_L = 0.3376 \text{ L/mg}$$



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ของการดูดซับนิกเกิล

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 2.0582 และจุดตัดแกน $y = 283.02$ สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_m) ค่าคงที่สมการ Langmuir (K_L) และค่า R_L ค่า R_L ได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{q_m} \quad R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o}$$

$$2.0582 = \frac{1}{q_m} \quad R_L = \frac{1}{1 + (0.3376 \text{ L/mg})(160 \text{ mg/L})}$$

$$q_m = 0.4858 \text{ mg/g} \quad R_L = 0.9357$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{1}{K_L q_m}$$

$$283.02 = \frac{1}{K_L (0.4858 \text{ mg/g})}$$

$$K_L = 0.0017 \text{ L/mg}$$

ค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอรั่มว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir หรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับจะไม่เป็นแบบ Langmuir (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 > R_L < 1$ การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (Favorable) และเมื่อ $R_L = 0$ การดูดซับจะเกิดการผันกลับได้ (Irreversible) ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่า R_L ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ผู้อื่นใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น 0.0689 และ 0.9357 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับทองแดงและนิกเกิลนี้เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับ Langmuir และในการดูดซับนิกเกิลมีความใกล้เคียงกับการดูดซับเป็นเส้นตรงมากกว่าการดูดซับทองแดง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Song และคณะ, 2016) ที่นำถ่านผัดคบชาวสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตะซานมาดูดซับทองแดงและแคดเมียมที่เผา ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir เช่นกัน q_m ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิล มีค่าเท่ากับ 38.4615 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.4858 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

4.7.2 สมการการดูดซับของ Freundlich

สมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) พื้นผิวตัวดูดซับขรุขระ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้ง กลไกทางกายภาพและเคมี การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Hameed และคณะ, 2007) พื้นผิวและพลังงานในการดูดซับจะมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียที่สถานะสมดุล

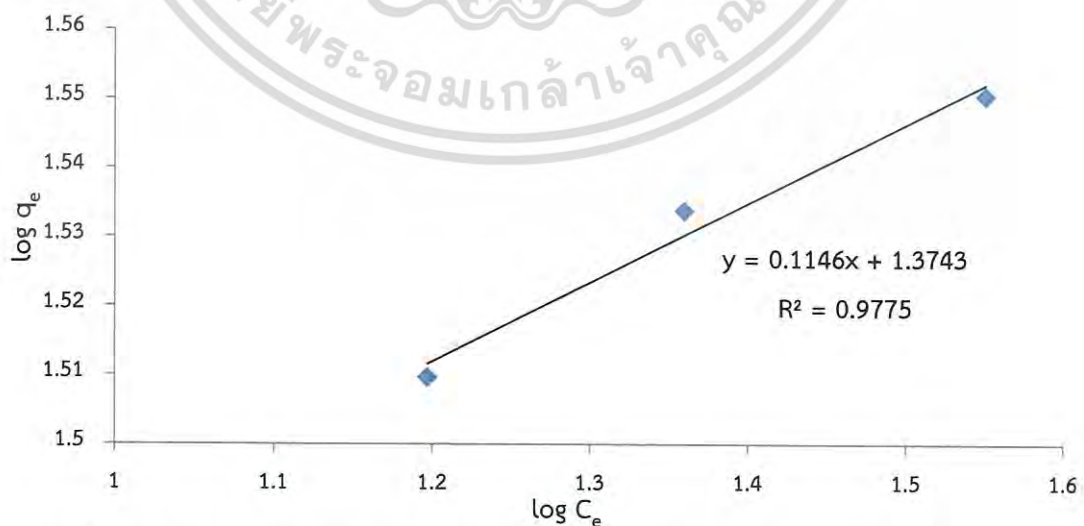
สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

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

โดย K_f = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (ลิตรต่อกรัม)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้รูปที่ 4.18 และ 4.19

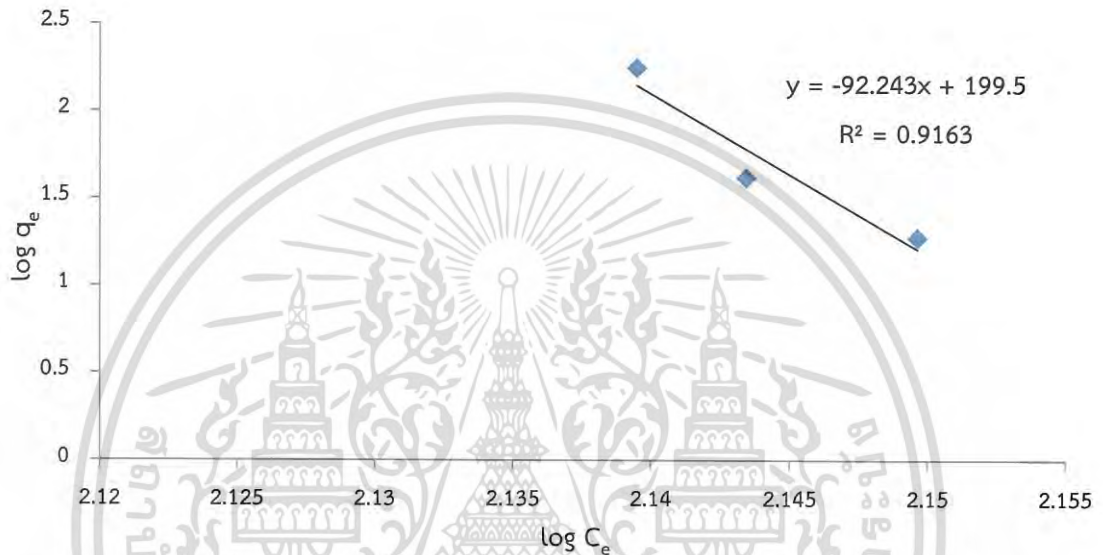


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.01146 และจุดตัดแกน $y = 1.3743$ สามารถหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_F ได้ดังนี้

$$\begin{array}{lcl} \text{ความชัน} & = & \frac{1}{n} \\ 0.1146 & = & \frac{1}{n} \\ & & \text{จุดตัดแกน } Y = \log K_F \\ & & 1.3743 = \log K_F \\ & & K_F = 23.6755 \text{ L/mg} \end{array}$$



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับนิกเกิล

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 92.243 และจุดตัดแกน $y = 199.5$ สามารถหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_F ได้ดังนี้ ความชัน = $1/n$ และจุดตัดแกน $y = \log K_F$

$$\begin{array}{lcl} \text{ความชัน} & = & \frac{1}{n} \\ -92.243 & = & \frac{1}{n} \\ & & \text{จุดตัดแกน } Y = \log K_F \\ & & 1.3743 = \log K_F \\ & & K_F = 10^{199.5} \text{ L/mg} \end{array}$$

ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (K_F) ของการดูดซับของทองแดงและนิกเกิลเท่ากับ 23.6755 ลิตรต่อมิลลิกรัม และ $10^{199.5}$ ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ นิพจน์และคณิตา, 2550 อธิบายความชันไว้ 3 แนวทางคือ $1/n = 1$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า $1/n > 1$ อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และ $1/n < 1$ อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ ดังนั้นจากผลการคำนวณจากการทดลอง ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1/n) ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิล เป็น 0.1146 และ -92.243 แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโคซานมีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับที่จำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ โดยค่า 1/n ของการดูดซับทองแดงจะมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Adeyemo และคณะ, (2014) ที่ทำการดูดซับทองแดงโดยถ่ายชีวภาพจากลูกสนที่เผา ณ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

4.7.3 สมการการดูดซับของ Temkin

สมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอมนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (adsorbent-adsorbate interactions)

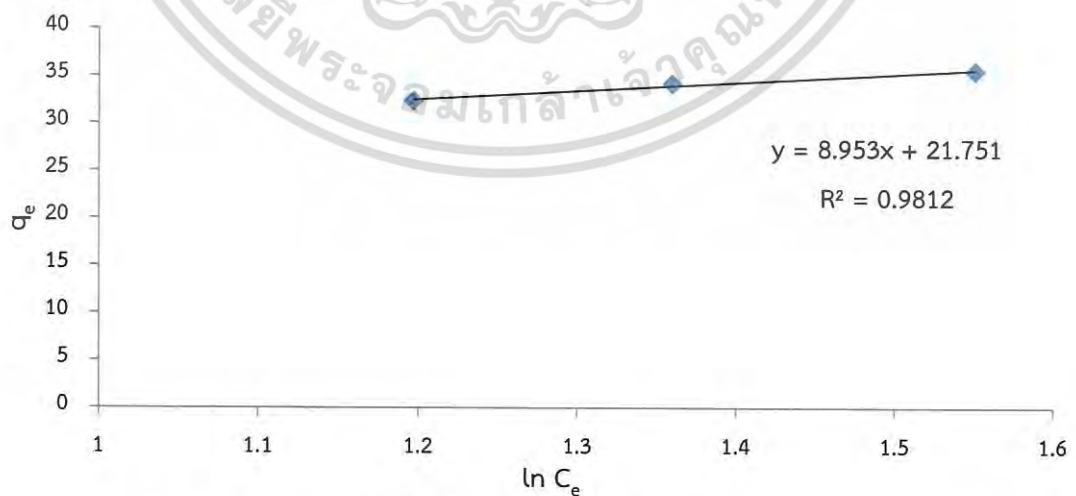
สมการการดูดซับของ Temkin คือ

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

โดย b_0 = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (จูลต่อโมล)

A = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (ลิตรต่อกรัม) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (maximum binding energy)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Temkin และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21

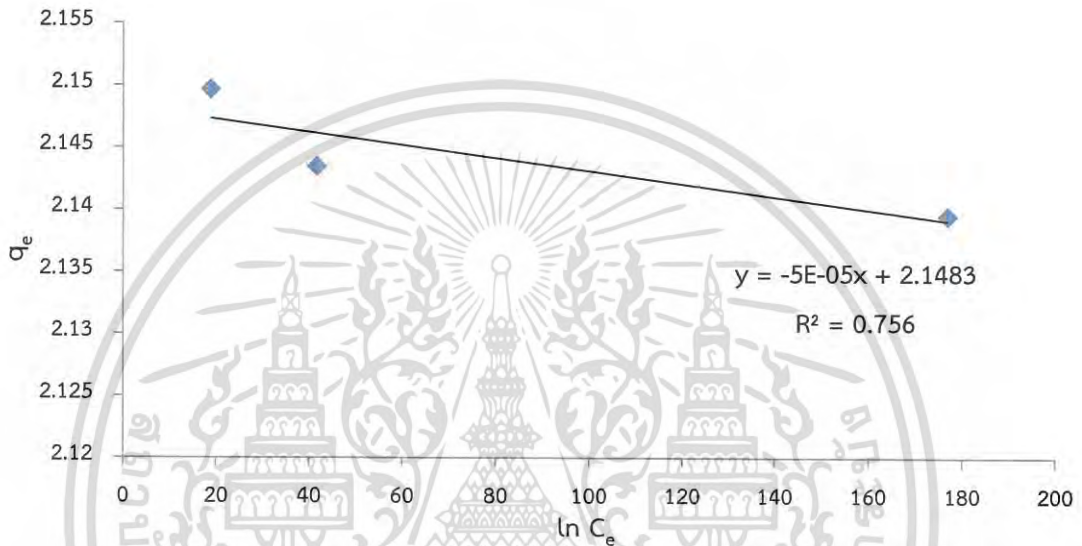


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 8.953 และจุดตัดแกน $y = 21.751$ สามารถหาค่าคงที่ b_0 และ A ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } Y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ 8.953 &= \frac{RT}{b_0} & 21.751 &= 8.953 \ln A \\ b_0 &= 0.2816 \text{ KJ/mol} & A &= 11.3528 \text{ L/mg} \end{aligned}$$



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับนิกเกิล

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 5×10^{-5} และจุดตัดแกน $y = 2.1483$ สามารถหาค่าคงที่ b_0 และ A ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } Y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ 5 \times 10^{-5} &= \frac{RT}{b_0} & A &= - \\ b_0 &= 50423 \text{ KJ/mol} \end{aligned}$$

สมการ Temkin สามารถนำอธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับได้ โดยที่หาก b_0 มากกว่า 80 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมี จากการคำนวณพบว่า ค่า b_0 ของการดูดซับทองแดง = 0.2816 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นการดูดซับทองแดงโดยถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพโดยโคโคซานจึงเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taiwo และคณะ, 2016 ที่ทำการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยถ่านชีวภาพจากไผ่ไนจีเรีย

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับนิกเกิลมีค่าต่ำจึงไม่นำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอร์มได้เสนอการดูดซับเพื่อ ประเมิน กลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่ เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

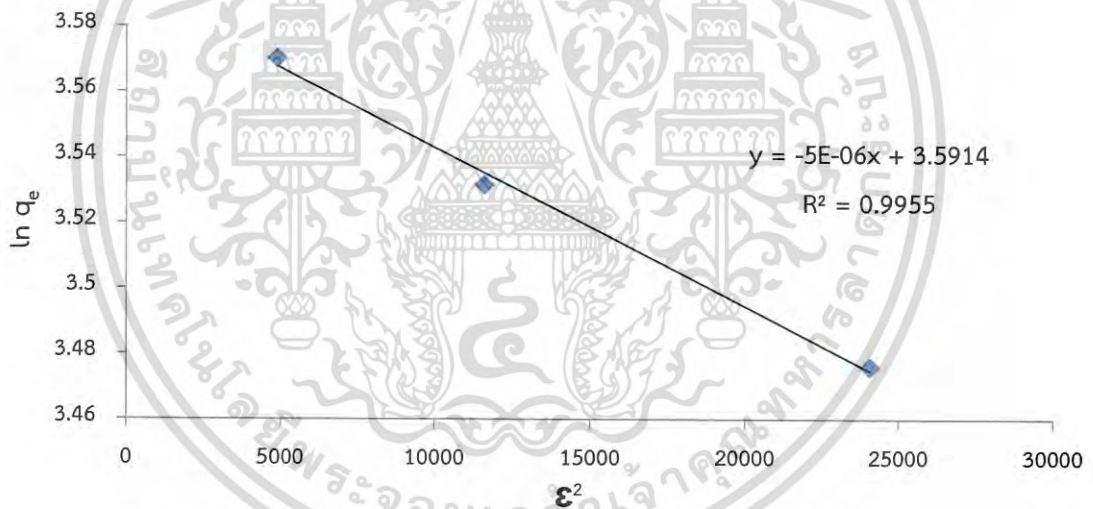
สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich คือ

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

โดย q_D = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_{DR} = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (โมลกำลังสองต่อกิโลจูลกำลังสอง) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23

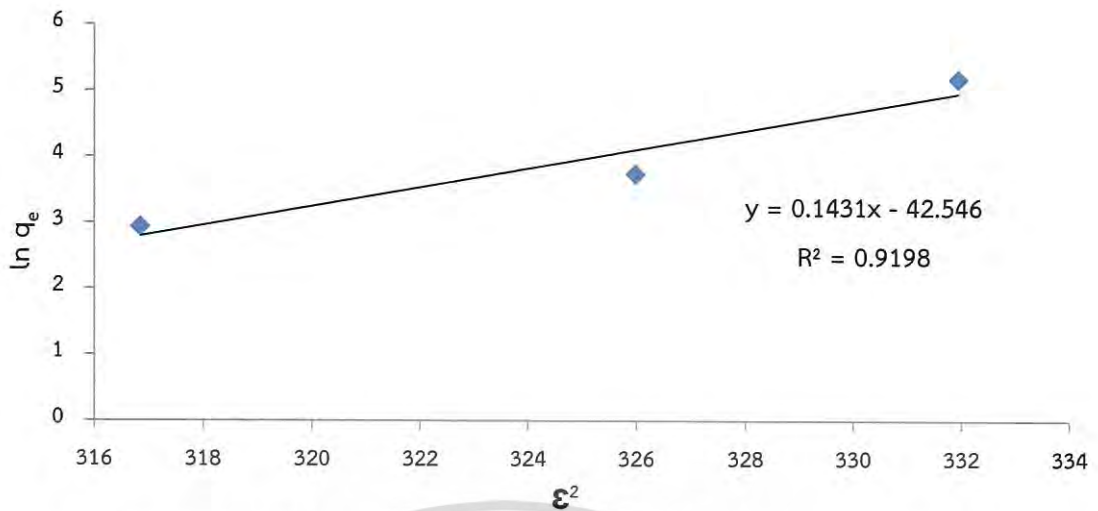


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับทองแดง

จากกราฟจะได้ความชัน $= K_{DR} = 5 \times 10^{-6}$ หาค่า $E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$ และ จุดตัดแกน $y = \ln q_D = 3.5914$ mg/g

E	$= 1/(2K_{DR})^{1/2}$	จุดตัดแกน Y	$= \ln q_D$
	$= 0.316$ KJ/mol	$\ln q_D$	$= 3.5914$
		q_D	$= 36.2848$ mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ E^2 ของการดูดซับนิกเกิล

จากกราฟจะได้ความชัน $= K_{DR} = 0.1431$ ค่า $E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$ และ จุดตัดแกน $y = \ln q_D$

$$E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \ln q_D$$

$$E = 1.8962 \text{ KJ/mol}$$

$$\ln q_D = -42.546$$

$$q_D = 3 \cdot 10^{-19} \text{ mg/g}$$

ในการคำนวณพลังงานอิสระจากไอโซเทอร์มการดูดซับของ D-R เมื่อได้ค่า E ระหว่าง 8-16 กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน, $E < 8$ กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อ $E > 16$ กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับ Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลมีค่าเท่า 0.9955 และ 0.9198 ตามลำดับ ค่า E ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลมีค่า 0.316 กิโลจูลต่อโมล และ 1.8962 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 8 กิโลจูลต่อโมล ค่าดังกล่าวบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งสอดคล้องกับสมการ Temkin ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taiwo และคณะ, 2016 ที่ทำการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยถ่านชีวภาพจากไผ่ไนจีเรีย และค่า q_D ของการดูดซับทองแดงเท่ากับ 36.2848 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับค่า q_{max} จากสมการ Langmuir

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลด้วยถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน

Cu		Ni	
Langmuir isotherm		Langmuir isotherm	
q_{\max} (mg/g)	38.4615	q_{\max} (mg/g)	0.4858
K_L (L/mg)	0.3376	K_L (L/mg)	0.0017
R_L	0.0689	R_L	0.9357
R^2	1	R^2	1
Freundlich isotherm		Freundlich isotherm	
K_F (L/mg)	23.6755	K_F (L/mg)	3.1623E+199
1/n	0.1146	1/n	-92.243
R^2	0.9775	R^2	0.9163
Dubinin-Radushkevich isotherm		Dubinin-Radushkevich isotherm	
K_{Dr}	2.00E-06	K_{Dr}	0.1431
q_D (mg/g)	36.2848	q_D (mg/g)	3.33048E-19
E (kJ/mol)	0.316	E (kJ/mol)	1.8962
R^2	0.9955	R^2	0.9198
Temkin isotherm		Temkin isotherm	
b_o (kJ/mol)	0.2816	b_o (kJ/mol)	50423
A (L/mg)	11.3528	A (L/mg)	-
R^2	0.9812	R^2	0.756

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และสมการการดูดซับของ Freundlich จากตารางที่ 4.2 พบว่าจากสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 1 ในทั้งการดูดซับทองแดงและนิกเกิล แสดงว่าการดูดซับทองแดงและนิกเกิลด้วยถ่านฟักตบขาวสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานเป็นการดูดซับแบบ Langmuir ซึ่งแบบจำลองการดูดซับนี้มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของสารดูดซับแต่ละโมเลกุลจะดูดซับสารได้เพียงโมเลกุลเดียว โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจะไม่มีแรงกระทำระหว่างกันเองหรือไม่มีปฏิกิริยาต่อกันเอง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับแล้วจะไม่สามารถเกิดการย้ายตำแหน่งการดูดซับได้ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจึงมีจำนวนแน่นอน และการดูดซับจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่แน่นอน ค่าความร้อนและพลังงานของการดูดซับในแต่ละตำแหน่งเท่ากัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดและมีค่าคงที่ สมมติฐานดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการดูดซับขึ้นเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ความสามารถในการดูดซับของแดงสูงสุดอยู่ที่ 38.4615 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถในการดูดซับนิกเกิลสูงสุดอยู่ที่ 0.4859 มิลลิกรัมต่อกรัม

นอกจากนี้ไอโซเทอร์ม Freundlich ยังมีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับของแดงและนิกเกิลเท่ากับ 0.9775 และ 0.9163 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูง อาจตั้งสมมติฐานได้ว่าการดูดซับของแดงและนิกเกิลก็เกิดการดูดซับแบบหลายชั้นได้เช่นกัน จากค่า $1/n$ เท่ากับ 0.1146 และ -92.243 ตามลำดับ บ่งบอกว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับของแดงและนิกเกิลมีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ที่สูง คือ 0.9955 และ 0.9198 ตามลำดับ ค่า E ของการดูดซับของแดงและนิกเกิลเท่ากับ 0.316 และ 1.8962 กิโลจูลต่อโมล สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์ม Temkin ของการดูดซับของแดงพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9812 ค่า b_0 ของการดูดซับของแดงเท่ากับ 0.2816 กิโลจูลต่อโมล สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับนิกเกิลมีค่าน้อยไม่เหมาะสมในการนำมาอธิบายไอโซเทอร์มการเกิดปฏิกิริยา

4.8 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแดงและนิกเกิลด้วยถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน

แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) อธิบายในกรณีทีสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งในปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินพอจะถือว่าความเข้มข้นของสารนั้นคงที่ตลอดเวลา แสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวภายนอกมีขอบเขตอย่างจำกัด สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right) t$$

โดย k_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (หนึ่งส่วนนาที)

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

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี ที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นที่ผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเป็นดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(K_2 q_e^2)^2} + t q_e$$

โดย K_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมนาที)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $[1/q_e]$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $[1/k_2 q_e^2]$

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งสมการนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาการดูดซับที่พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

สมการแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich เป็นดังนี้

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$$

โดย α = อัตราเร็วในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมนาที)

β = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ (กรัมต่อมิลลิกรัม)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $1/\beta$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/\beta \ln(\alpha\beta)$

แบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) อธิบายอัตราเร็วของการแพร่ของสารเข้าไปในรูพรุน

สมการแบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับเป็นดังนี้

$$q_t = k_{id} (t)^{\frac{1}{2}} + C$$

โดย k_{id} = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (มิลลิกรัมต่อกรัมนาที)

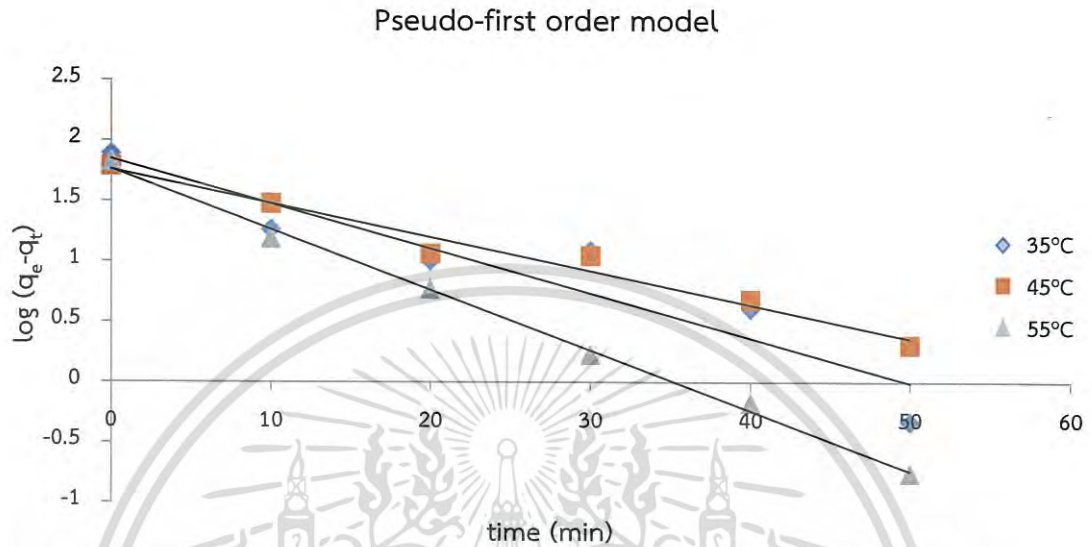
เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ k_{id} และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ C

จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลด้วยถ่านผักตบชวา สภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน โดยมีการแปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลและอุณหภูมิในการดูดซับ โดบแบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณามี 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order model) แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) ผลการศึกษาแสดงได้ดังนี้

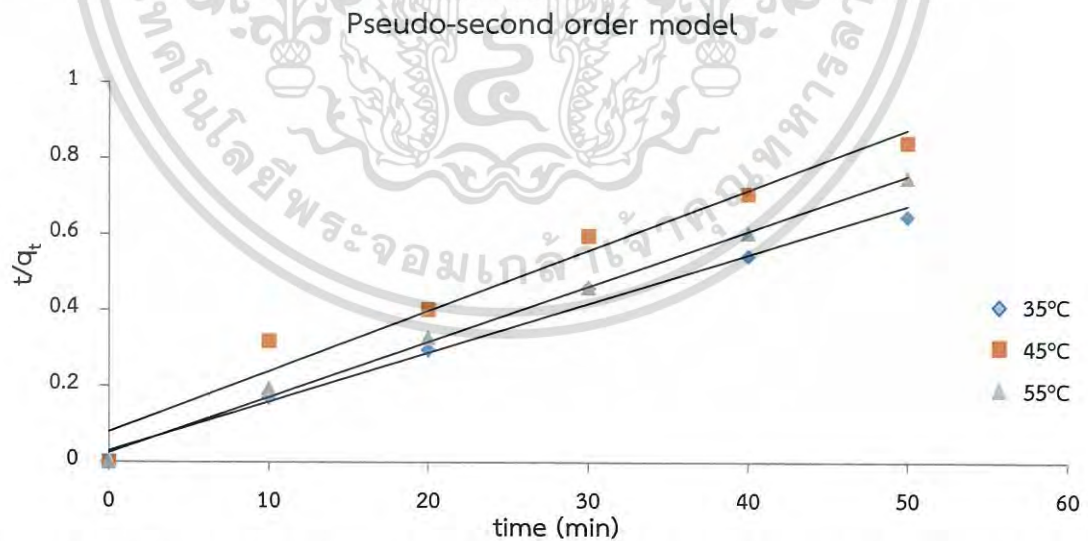
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับทองแดงดังนี้ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันอุณหภูมิในการดูดซับทองแดง นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27

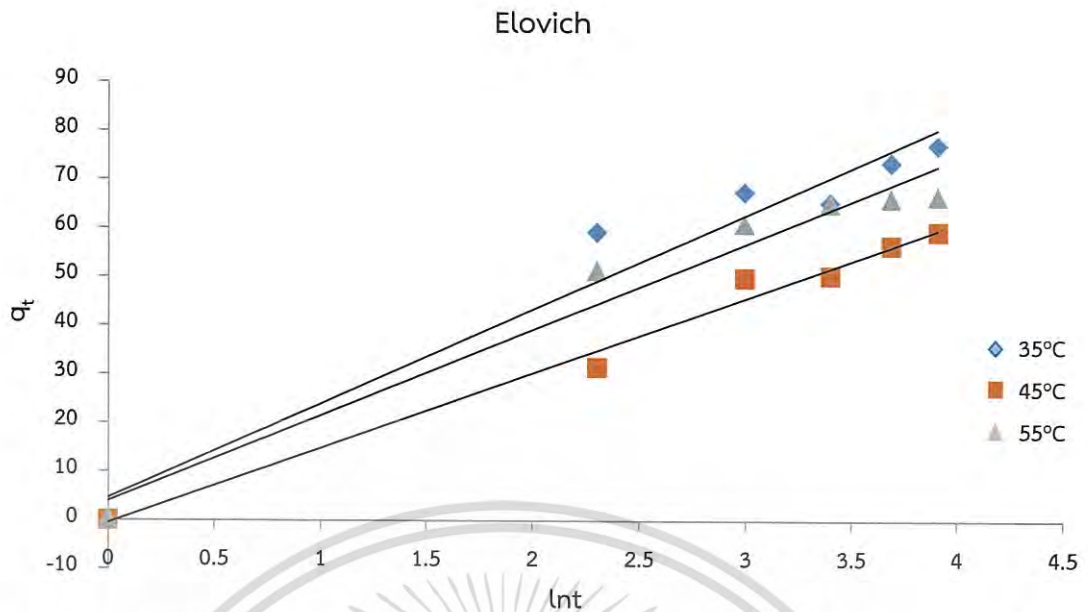


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับทองแดงที่สถานะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ

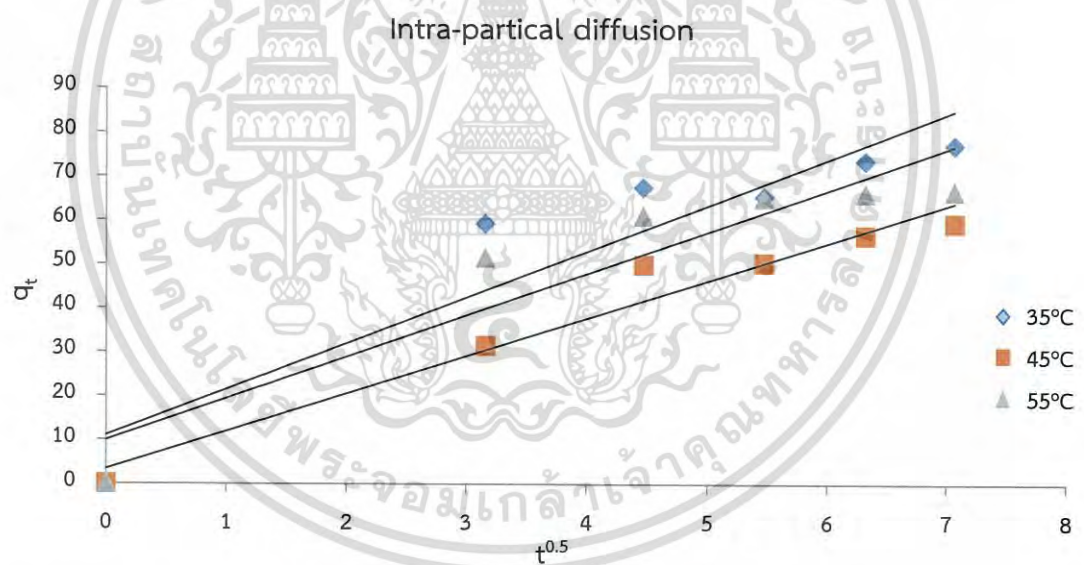


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลอการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันอุณหภูมิ

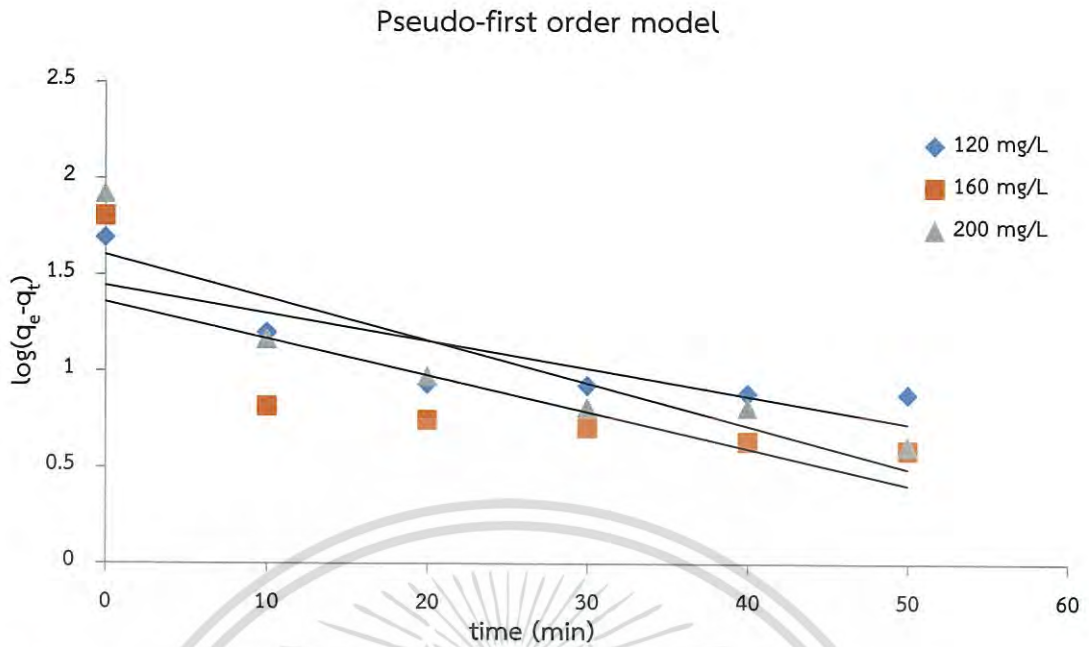


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันอุณหภูมิ

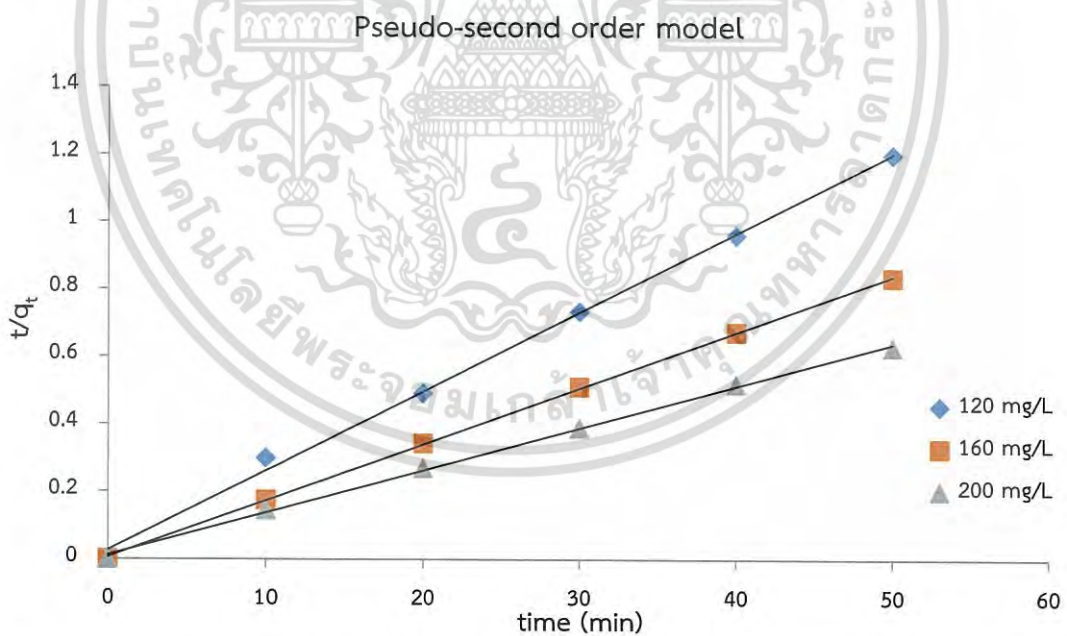
4.8.2 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ดังนี้ 120, 160, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักทองแดงและนิกเกิล นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

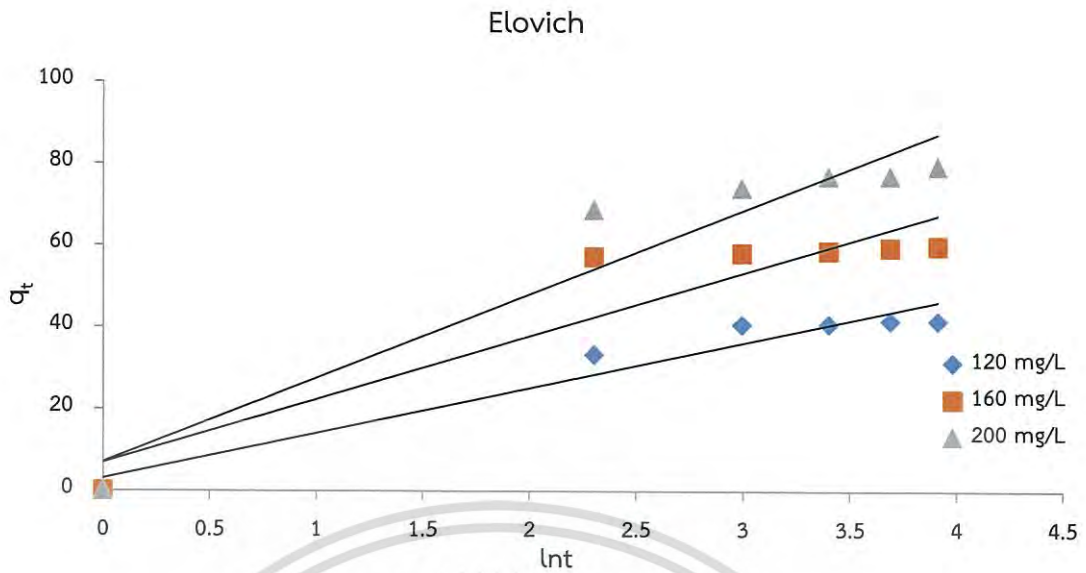


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับของแตรสถานะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log(q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น

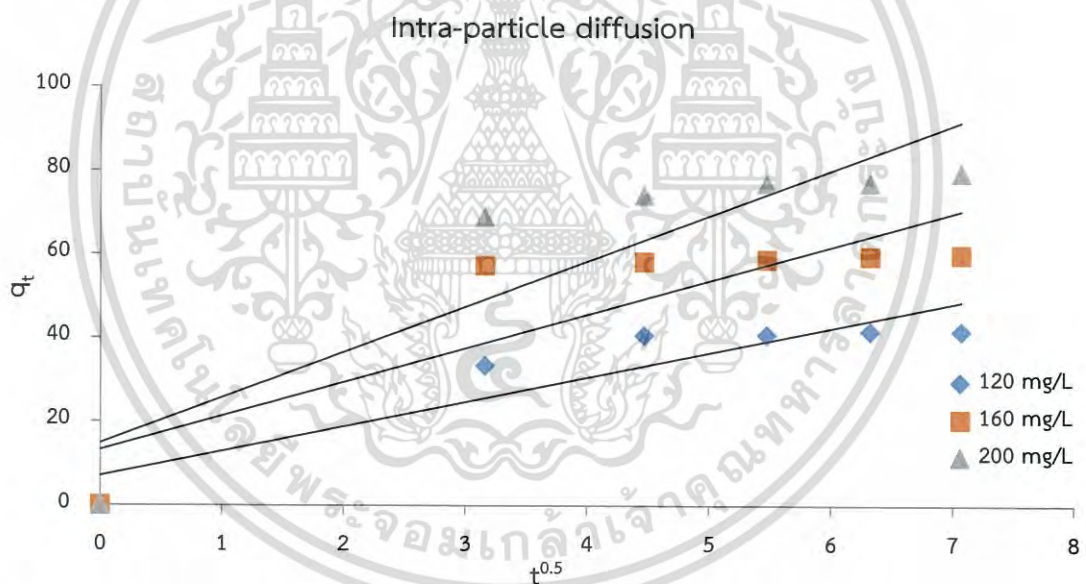


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความสามารถในการดูดซับของแตรที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลอการิทึมของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันความเข้มข้น



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับทองแดงที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความชื้นและจุดตัดแกน y ของการดูดซับทองแดง

Copper	ความเข้มข้น (mg/L)			อุณหภูมิ (°C)		
	120	160	200	35	45	55
Pseudo-first order						
k_1 (1/min)	0.0143	0.0088	0.0096	0.0161	0.0121	0.0217
q_e (mg/g)	20.6918	20.6585	33.9078	70.3720	57.5439	58.2371
R^2	0.7493	0.6135	0.8594	0.8746	0.9717	0.9965
Pseudo-second order						
k_2 (g/mg min)	0.0189	0.0493	0.0184	0.0057	0.0031	0.0087
q_e (mg/g)	40.1606	57.1428	75.1879	77.5193	62.893	68.4931
R^2	0.9969	0.9998	0.9992	0.9964	0.9667	0.988
Elovich						
α (mg/g min)	69.2871	468.5286	379.2732	120.5314	20.5654	99.4094
β (mg/g)	0.0957	0.0678	0.0516	0.0516	0.0649	0.0568
R^2	0.9018	0.8719	0.9493	0.9617	0.9869	0.9539
Intra-particle diffusion						
K_{id} (mg/g min)	5.5739	7.6866	10.187	10.4369	8.5631	9.4471
R^2	0.7845	0.7456	0.8501	0.8704	0.9598	0.8712

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับทองแดงโดยถ่านผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order model) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า อธิบายการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับทองแดงที่เกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมีหรือการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันระหว่างโมเลกุลของทองแดงและพื้นที่ผิว ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตรกับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรจะพบว่ามีค่า k_2 ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่า ค่า k_2 ที่ 55 องศาเซลเซียส จะสูงที่สุดแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน (Endothermic) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักน้ำเสียสังเคราะห์จะพบว่าค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

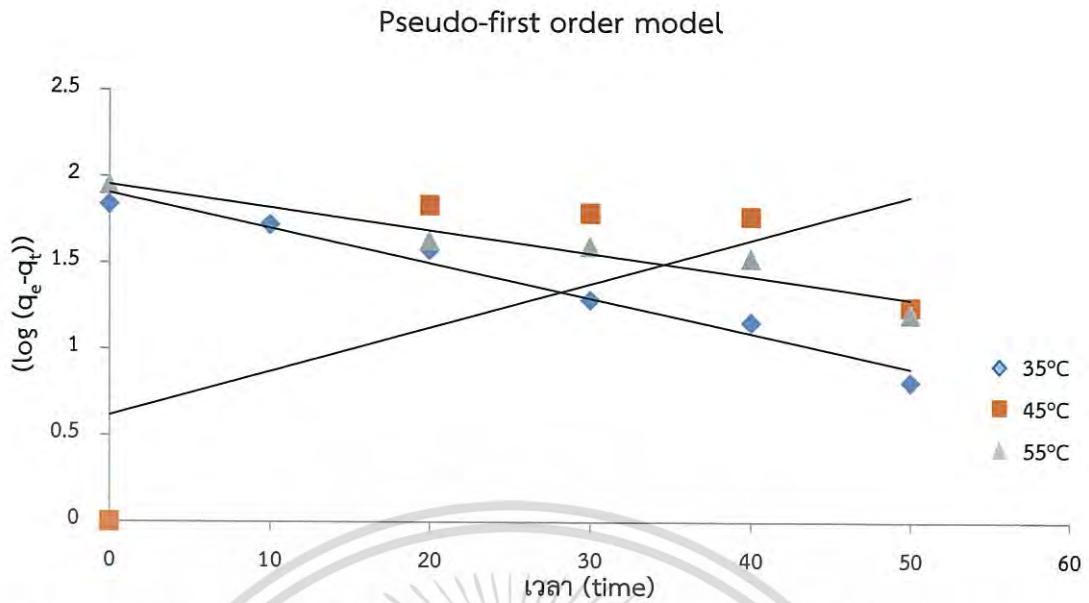
ความสามารถสูงสุดในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ (q_e) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับจะไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Song และคณะ, (2016) ในการดูดซับทองแดงและแคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานที่เผา ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ก็เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2)

จากสมการ Elovich ค่าคงที่ที่ได้จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9869 ซึ่งมีค่าสูงสุด อัตราเร็วในการดูดซับ (α) จะมีค่าเท่ากับ 20.5654 มิลลิกรัมต่อกรัม นาที และสัมประสิทธิ์การคายซับ (β) มีค่าเท่ากับ 0.0649 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการดูดซับทองแดงพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) ของสมการ Elovich มีค่าสูง สามารถอธิบายได้ว่าในขั้นกำหนดอัตรา (RDS) ของปฏิกิริยานี้จะเป็นการแพร่ และสามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี (Li และคณะ, 2015)

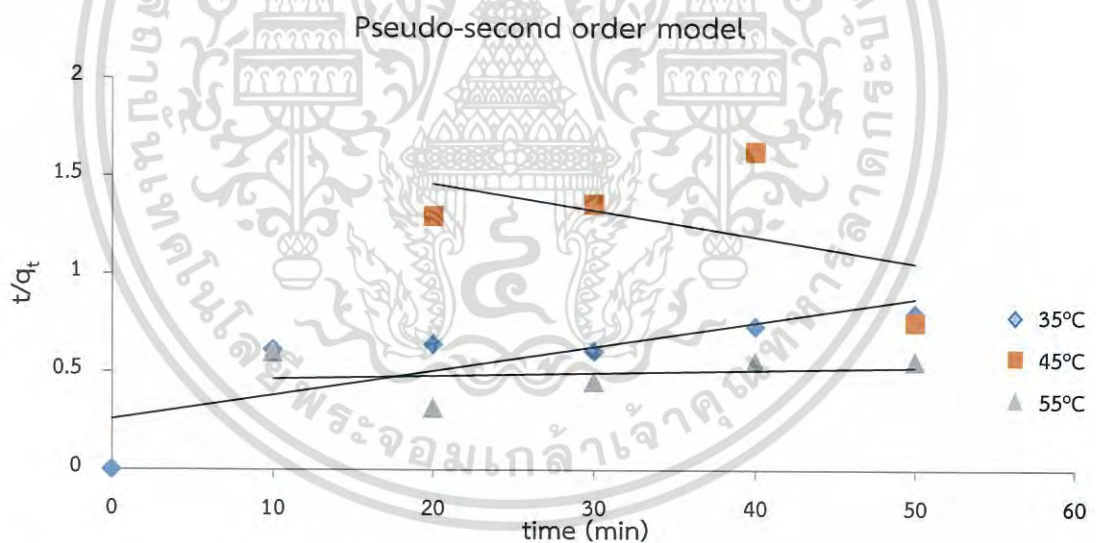
ในส่วนของสมการ Intra-particle order พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (K_{id}) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ของกราฟที่มีค่าสูงสุด ณ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส $R^2 = 0.9598$ พบว่ากลไกในการดูดซับทั้งสามช่วง ได้แก่ ช่วงการถ่ายโอนมวลทั่วฟิล์มภายนอกของของเหลวรอบอนุภาค ช่วงการดูดซับบนพื้นผิวของรูพรุน และช่วงการแพร่ภายในอนุภาค เป็นไปอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ 1 และ 2 และจะเริ่มเกิดขึ้นซ้ำในช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดสมดุลในการดูดซับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Thilagan และคณะ, 2013) ที่นำเม็ดเซลลูโลส-ไคโตซานมาดูดซับทองแดง

4.8.3 แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับนิกเกิลตั้งนี้ 35, 45, 55 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันอุณหภูมิในการดูดซับทองแดง นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.32, 4.33, 4.34 และ 4.35

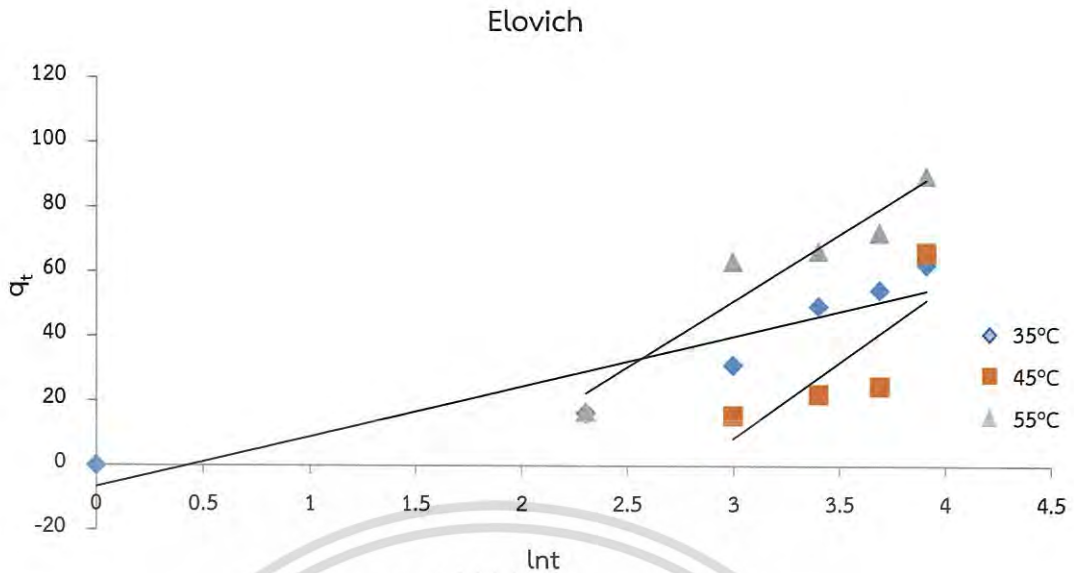


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่สถานะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log (q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ

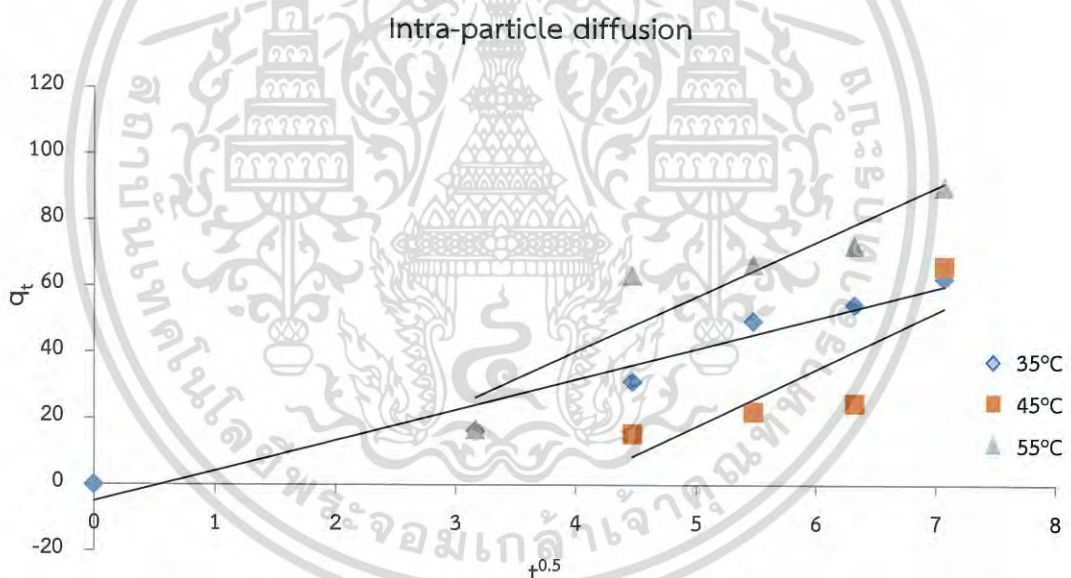


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิล ที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



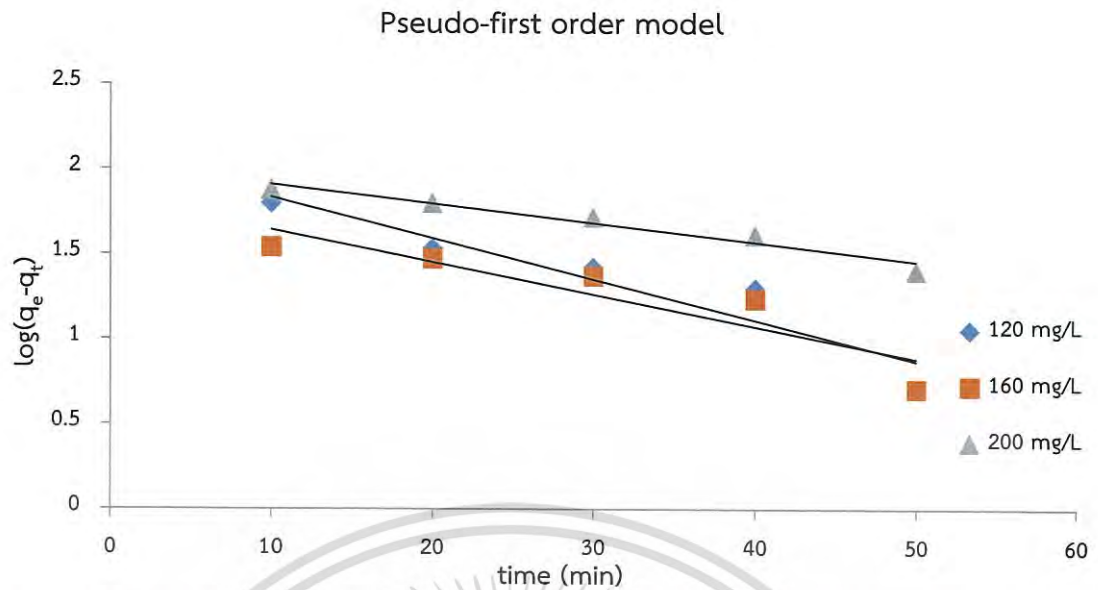
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิล ที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลอการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันอุณหภูมิ



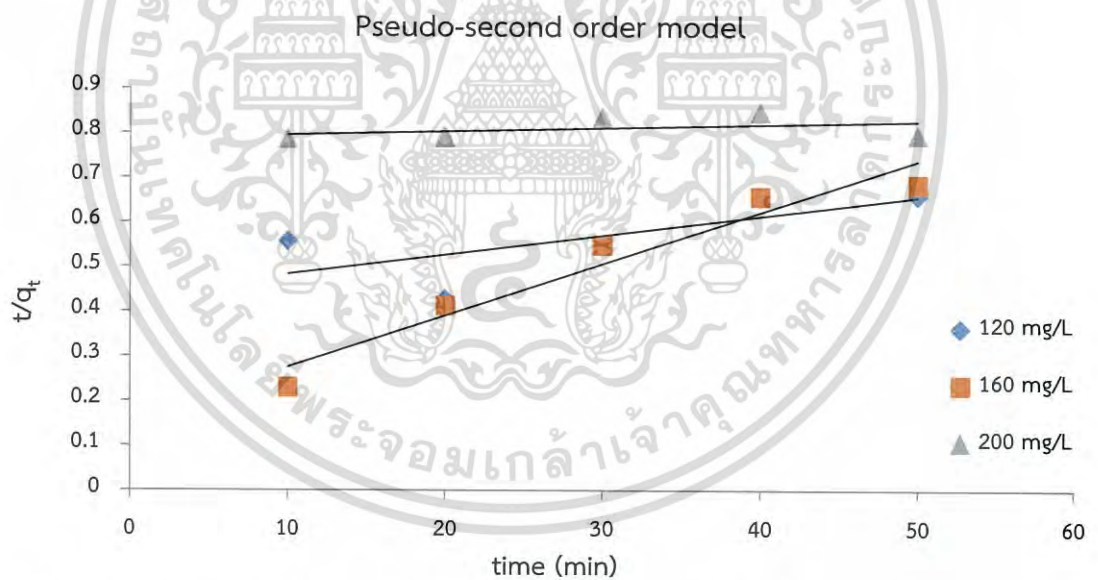
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันอุณหภูมิ

4.8.4 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ดังนี้ 120, 160, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

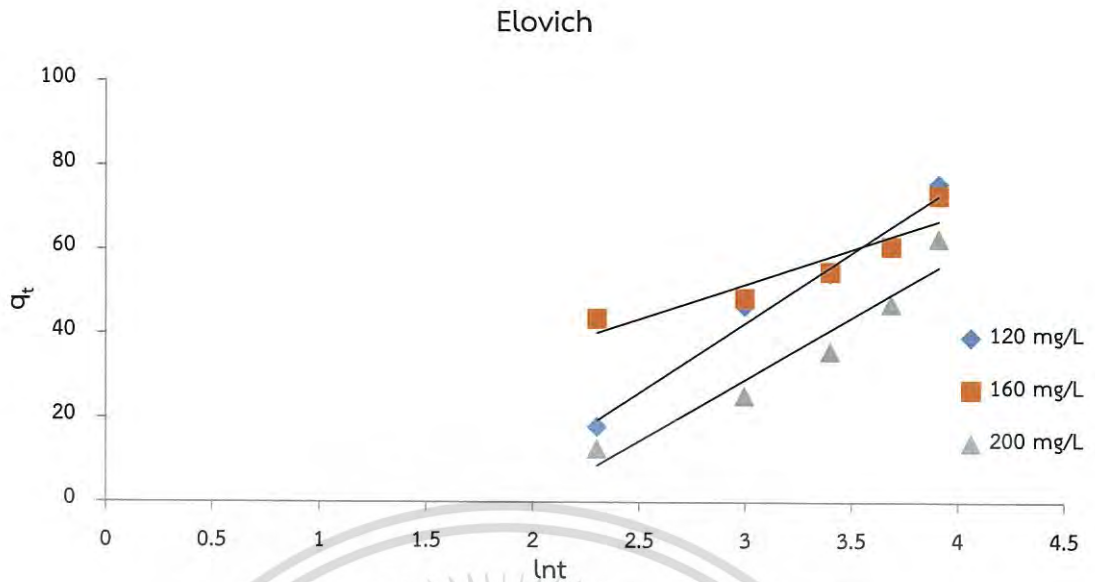
เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันความเข้มข้นเริ่มของน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักนิกเกิล นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูป 4.36, 4.37, 4.38 และ 4.39



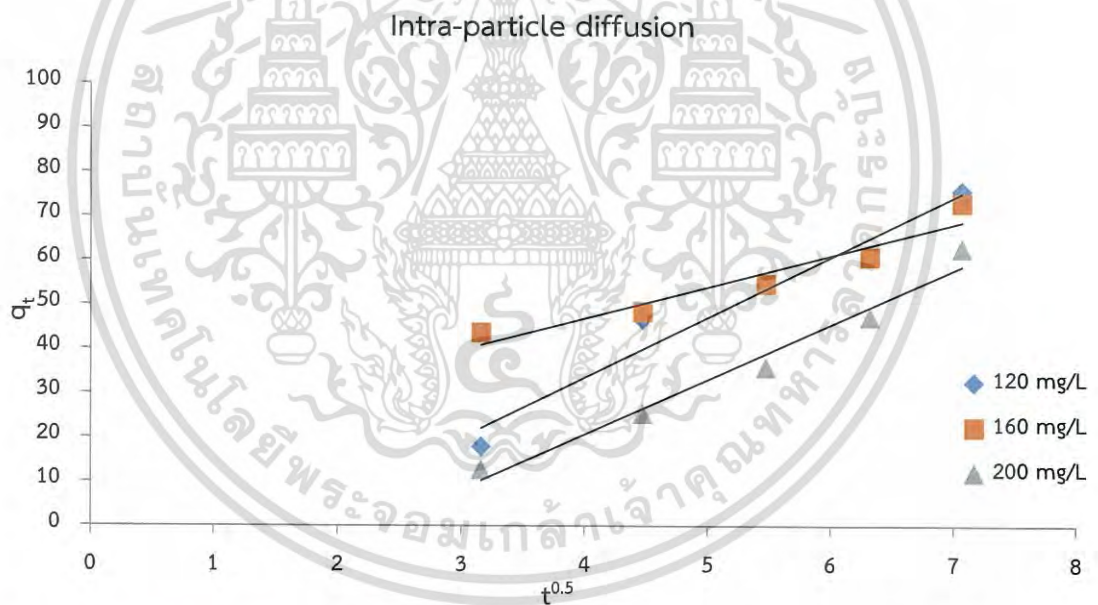
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่สถานะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ($\log(q_e - q_t)$) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (time) โดยการแปรผันความเข้มข้น



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับลอการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$) โดยการแปรผันความเข้มข้น



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อ ความสามารถในการดูดซับนิกเกิลที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$ โดยการแปรผันความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการคำนวณระหว่างความเข้มข้นและจุดตัดแกน y ของการดูดซับนิกเกิล

Nickel	ความเข้มข้น (mg/L)			อุณหภูมิ (C)		
	120	160	200	35	45	55
Pseudo-first order						
k_1 (1/min)	0.0094	0.0085	0.0044	0.0052	0.0057	0.0069
q_e (mg/g)	97.1628	73.097	95.9842	95.8296	159.0011	115.0006
R^2	0.9091	0.893	0.9505	0.9716	0.8623	0.9332
Pseudo-second order						
k_2 (g/mg min)	0.0005	0.0025	0.0003	0.0005	-0.0377	0.0003
q_e (mg/g)	94.3396	72.4637	83.3333	80.6451	32.8947	126.5823
R^2	0.642	0.941	0.459	0.4307	0.2925	0.6487
Elovich						
α (mg/g min)	449.3394	655.9337	562.5252	411.7742	19.3168	921.4248
β (mg/g)	0.0543	0.0584	0.0710	0.0640	0.0235	0.0446
R^2	0.8828	0.9748	0.7896	0.8523	0.8358	0.8708
Intra-particle diffusion						
K_{id} (mg/g min)	10.797	9.5877	8.5153	9.2155	17.85	13.069
R^2	0.9534	0.9607	0.9085	0.9134	0.8627	0.9541

การดูดซับนิกเกิลเป็นไปตามสมการ Intra-particle diffusion เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) สูง พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (K_{id}) จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อากาศภายในรูพรุนบนน้ำเสียสังเคราะห์จะเข้าไปถูกดูดซับในรูพรุนได้ดีขึ้น สมการ Intra-particle diffusion สามารถอธิบายความเร็วของช่วงของการดูดซับบนพื้นผิวของรูพรุน เมื่อสังเกตจากกราฟที่มีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์สูงสุด ($R^2 = 0.9607$) กลไกในการดูดซับทั้งสามช่วง ได้แก่ ช่วงการถ่ายโอนมวลทั่วฟิล์มภายนอกของของเหลวรอบอนุภาค ช่วงการดูดซับบนพื้นผิวของรูพรุน และช่วงการแพร่ภายในอนุภาคเป็นไปอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ 1 และ 2 และจะเริ่มเกิดได้รวดเร็วในช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดสมดุลในการดูดซับ แสดงให้เห็น

ว่าการดูดซับนิกเกิลโดยถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานเป็นการแพร่เข้าสู่อนุภาคของตัวดูดซับ

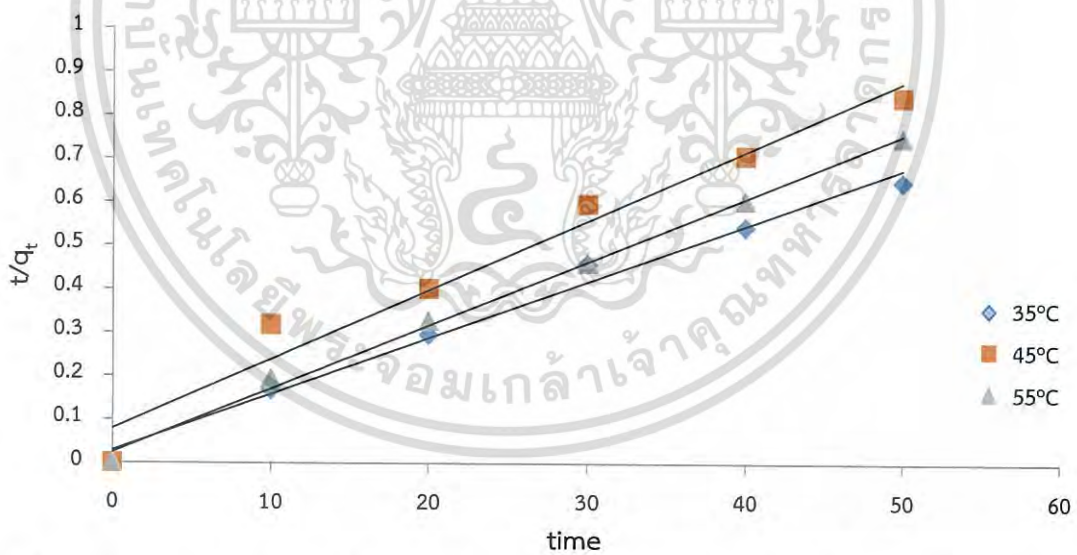
จากสมการแบบจำลองอัตราการการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order model) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) สูง จากค่า k_1 ของอุณหภูมิ จากตาราง 4.4 พบว่ามีแนวโน้มที่สูงขึ้น บ่งบอกว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งผลเป็นไปในทางเดียวกับ สมการ Intra-particle order

จากสมการ Elovich และ Pseudo-second order เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ (R^2) มีค่าต่ำจึงไม่เหมาะสมในการนำมาพิจารณาอัตราการการเกิดปฏิกิริยา

4.9 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแดงและนิกเกิล โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี

4.9.1 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแดง ด้วยฝักตบขวาสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน

จากแบบจำลองอัตราการการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสได้ดังรูปที่ 4.40 และตารางที่ 4.5



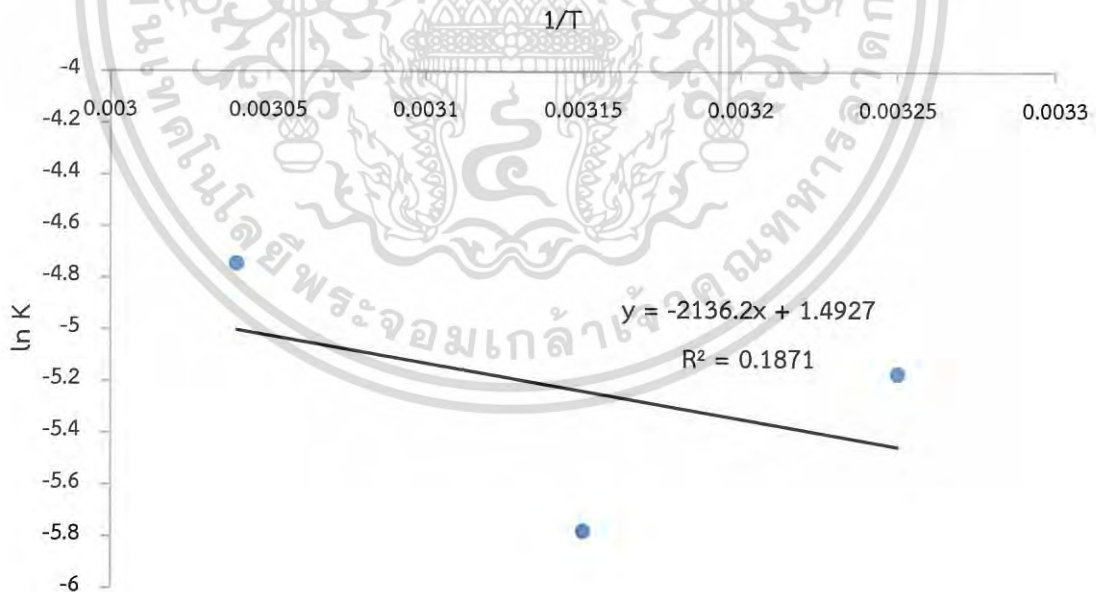
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ ของทองแดง

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับอนุกรมต่างๆของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

อนุกรม (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (k_2) (g/mg min)	R^2
35	0.0057	0.9964
45	0.0031	0.9667
55	0.0087	0.9880

จากตารางที่ 4.5 เมื่ออนุกรมในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 35 องศาเซลเซียสไปเป็น 45 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับได้เท่ากับ 0.0057, 0.0031 และ 0.0087 กรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอนุกรมมีผลทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (Endothermic)

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ความชันของกราฟคือ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$ เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว ($\ln k$) และ $1/T$ ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ (E_a)

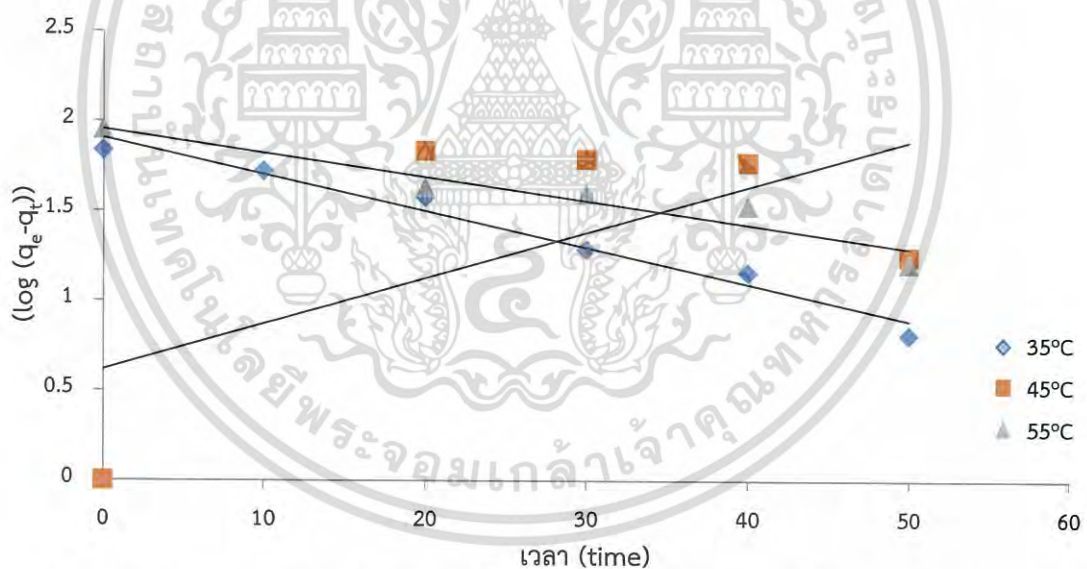


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อนุกรม 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ของทองแดง

พลังงานกระตุ้นคือพลังงานที่น้อยที่สุดที่อนุภาคของสารต้องการเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งพลังงานกระตุ้นจะส่งผลให้อนุภาคของสารชนกันตำแหน่งที่เหมาะสมมากขึ้น จึงมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปฏิกิริยาเคมีที่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ยาก ส่วนปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานกระตุ้นน้อยจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถบ่งบอกถึงกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากว่า E_a อยู่ในช่วง 5-50 กิโลจูลต่อโมล เป็นการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า E_a อยู่ในช่วง 60-800 กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี (ศรีธัญญา และคณะ, 2016) จากรูปที่ 4.41 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ของแดง ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน มีค่าเท่ากับ 17.76 กิโลจูลต่อโมล เป็นการดูดซับทางกายภาพ

4.9.2 พลังงานกระตุ้นการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสได้ดังรูปที่ 4.42 และตารางที่ 4.6



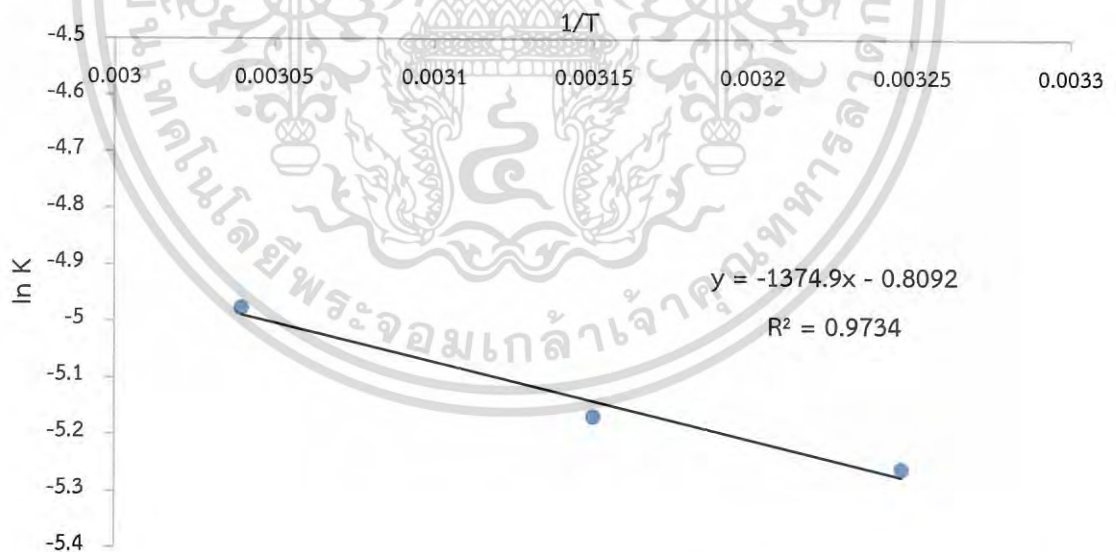
รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิต่างๆ ของนิกเกิล

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับอนุกรมต่างๆของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (k_1) (1/ min)	R^2
35	0.0052	0.9716
45	0.0057	0.8623
55	0.0069	0.9332

จากตารางที่ 4.6 เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 35 องศาเซลเซียสไปเป็น 45 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับได้เท่ากับ 0.0052, 0.0057, 0.0069 กรัมต่อมิลลิกรัมนาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (Endothermic)

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) โดยความชันของกราฟคือ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$ เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว ($\ln k$) และ $1/T$ ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ (E_a)



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 องศาเซลเซียสของนิกเกิล

จากรูปที่ 4.43 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล ด้วยผักตบชวา สภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน มีค่าเท่ากับ 11.43 กิโลจูลต่อโมล เป็นการดูดซับทางกายภาพ

4.10 อุณหพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล ด้วยผักตบชวา สภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน

การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล ด้วยผักตบชวา สภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซาน เมื่อใช้น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH เท่ากับ 6 ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0)

4.10.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_c) จำนวนได้จากสมการ (นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์, 2550)

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

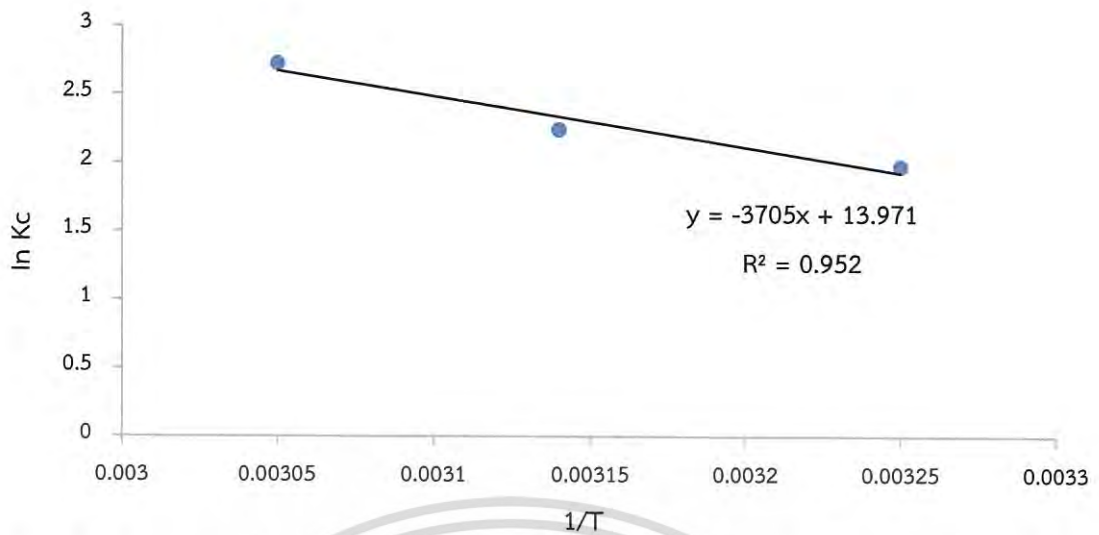
$$\ln K_c = -\left(\frac{\Delta H^0}{RT}\right) + \left(\frac{\Delta S^0}{R}\right)$$

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_c)
35	7.1954
45	9.4090
55	15.2414

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 35, 45, 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง ความเข้มข้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟที่มีค่าความชัน เท่ากับ $-\Delta H^0/RT$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $\Delta S^0/R$



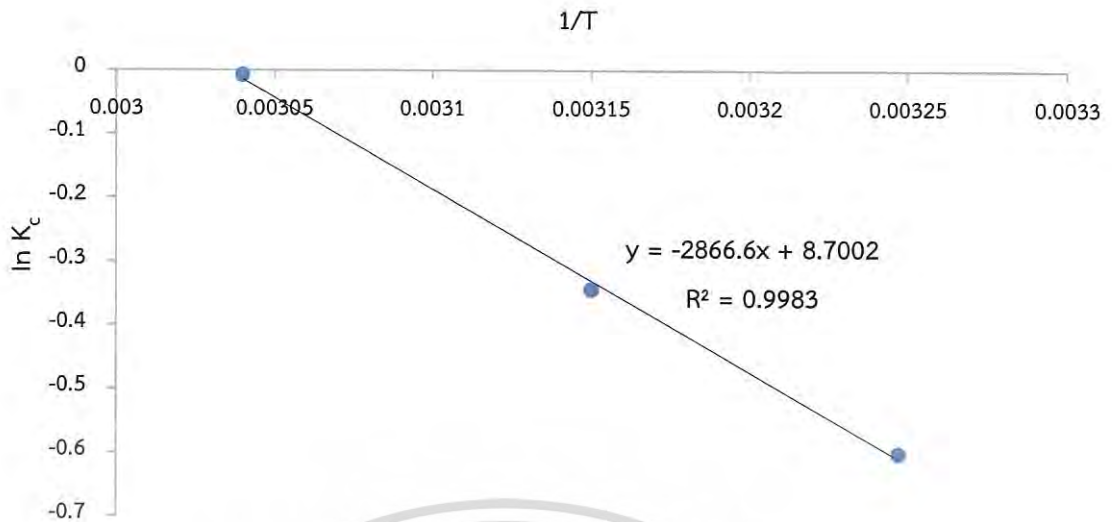
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ทองแดง

จากความชันที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์จากรูปที่ 4.44 สามารถคำนวณค่าเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) เท่ากับ 30.8034 กิโลจูลต่อโมล ค่าเอนทาลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ($\Delta H^0 =$ บวก) แสดงว่าการดูดซับน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ทองแดง ด้วยผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น (ศรีัญญา และคณะ, 2016)

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์นิกเกิล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_c)
35	0.1002
45	0.2289
55	0.2808

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 35 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับน้ำเสี้ยวสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟที่มีค่าความชัน เท่ากับ $-\Delta H^0/RT$ และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\Delta S^0/R$



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียสของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

จากความชันที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์จากรูปที่ 4.45 สามารถคำนวณค่าเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) เท่ากับ 23.83 กิโลจูลต่อโมล ค่าเอนทาลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ($\Delta H^0 =$ บวก) เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน

4.10.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

จากจุดตัดแกน y ที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์เท่ากับ $\Delta S^0/R$ ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล เท่ากับ 116.16 จูลต่อโมลเคลวิน และ 72.33 จูลต่อโมลเคลวิน ตามลำดับ ซึ่งค่าเอนโทรปีของการดูดซับบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) และตัวถูกดูดซับ (Absorbate) โดยถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta S^0 =$ บวก) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอกลังถึงการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้ามีค่าเป็นลบ ($\Delta S^0 =$ ลบ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอกลังไม่มีการเกิดพันธะหรือไม่มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ศรีัญญา และคณะ, 2016) จากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่า โมเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลเกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับนั้นมีความติดแน่นมาก

4.10.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ของการดูดซับ

จากค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) นำมาแทนค่าในสมการ $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลด้วย ผักตบชวาสถานะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซาน ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -5.0036, -6.1656, -7.3276 กิโลจูลต่อโมล และ 1.1008, 0.3778, -0.3452 กิโลจูลต่อโมล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมล ตามลำดับ โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานอยู่ในช่วง -80 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล (ศรัณญา และคณะ, 2016) ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของทองแดงที่ได้มีค่าเท่ากับลบ แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงด้วยผักตบชวาสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้า แสดงว่า ณ สภาวะสมดุลจะมีผลิตภัณฑ์มากกว่าสารตั้งต้น ส่วนค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของนิกเกิลที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส จะมีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลด้วยผักตบชวาสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ ณ สภาวะสมดุลจะเกิดสารตั้งต้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 55 องศาเซลเซียส จะมีค่าติดลบ แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้าเช่นเดียวกับทองแดง

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)		
		35°C	45°C	55°C
30.8034	116.1549	-5.0036	-6.1656	-7.3276

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)		
		35°C	45°C	55°C
23.8329	72.3334	1.1008	0.3778	-0.3452

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 1) ถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีพื้นผิวขรุขระเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กที่จะพบว่ามีลักษณะพื้นผิวขรุขระมากและมีรูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโตซานพื้นผิวจะมีลักษณะเรียบขึ้นและปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้น
- 2) สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ คือ pH 6 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 100 มิลลิกรัม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- 3) เมื่อใส่ไอเล็กโทรไลต์ชนิด NaCl , Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCl_2 และ Na_2HPO_4 ในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร พบว่าเกลือของแคลเซียมมีอิทธิพลในการขัดขวางการดูดซับมากกว่าเกลือของโซเดียมและ Na_2HPO_4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ pH ของสารละลายสูงขึ้น
- 4) การดูดซับทองแดงและนิกเกิลจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ หมายความว่า การดูดซับจะเป็นแบบโมนอเลเยอร์ และเมื่อพิจารณาจากไอโซเทอร์ม Temkin และ Dubinin Radushkevich จะพบว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ
- 5) การคายซับด้วยวิธี EDTA, HNO_3 , NaNO_3 พบว่าวิธีการด้วย EDTA มีประสิทธิภาพในการคายซับน้อยที่สุด
- 6) การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) และการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลเป็นไปตามแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion)
- 7) ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงมีค่าเท่ากับ 17.76 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน เป็นการดูดซับทางกายภาพ และในการดูดซับนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 11.43 กิโลจูลต่อโมลเคลวินเป็นการดูดซับทางกายภาพ
- 8) ΔH° ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 30.80 กิโลจูลต่อโมลเคลวินและ 23.83 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน ตามลำดับ ซึ่งเป็นการดูดแบบดูดความร้อน
- 9) ΔS° ของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 116.16 จูลต่อโมลเคลวินและ 72.33 จูลต่อโมลเคลวิน ตามลำดับ แสดงว่าโมเลกุลของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิลเกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีความตึงแน่นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) ΔG° เมื่อดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล ที่สภาวะอุณหภูมิ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับทองแดงมีค่าเท่ากับ -5.0036, -6.1656 และ -7.3276 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน แสดงว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้า ส่วนการดูดซับนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 1.1008, 0.3778, -0.3452 กิโลจูลต่อโมลเคลวิน แสดงให้เห็นว่าเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรนำไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
- 2) ควรศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดอื่นๆ ด้วยถ่านชีวภาพปรับปรุงมีสภาวะแม่เหล็กปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโคซาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ชุติกานุญ โภคินพลวัฒน์. 2554. ส่วนประกอบของเซลล์ที่พบเฉพาะในพืช. [Online]. Available : <https://chutikan134.wordpress.com/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2560
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2550. “ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำที่ โรงงานย้อมผ้าดอยตุงโดย ใช้ตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสีย.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชา สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรสวรรค์ อิศวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์. 2543. “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจาก ธรรมชาติ.” *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 27(4) : 61-66.
- ศรัณญา จำปาโท, สุทธิกานต์ เผ่าพืชพันธุ์ และ อرنัดดา จำปา. 2016. “การดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบร ไมด์.” *ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*
- Adeyemo, A.O. Adebawale, K.O. and Olu-Owolabi, B.I. 2014. “Adsorption of Copper by Biochar.” *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*. 4(6) : 727-736.
- Anzeze, D.A. Onyari, J.M. Shiundu, P.M. and Gichuki, J.W. 2014. “Adsorption of Pb (II) Ions from Aqueous Solutions by Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) : Equilibrium and Kinetic Studies.” *International Journal of Environmental Pollution and Remediation*. 2014(2) : 89-95.
- Brigden, K. Labunska, I. and Santillo, D. 2013. “การตรวจสอบสารเคมีอันตรายในน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสองแห่งและการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณใกล้เคียง ซึ่งเชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553.” *Greenpeace Research Laboratories Technical Note*. 2010(6) : 1-34.
- Erhayem, M. Al-Tohami, F. Mohamed, R. and Ahmida, K. 2014. “ Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies for the Sorption of Mercury (II) onto Activated Carbon from *Rosmarinus officinalis* Leaves American.” *Journal of Analytical Chemistry*. 2015(6) : 1-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Hu, P. and Sorensen, C. 1995 “Influences of Peptide Side Chains on the Metal Ion Binding Site in Metal Ion-Cationized Peptides: Participation of Aromatic Rings in Metal Chelation.” *1 Am Soc Mass Spectrom.* 1995(6) : 1079-1085
- Li, F. Shen, K. Long, X. Wen, J. Xie, X. Zeng, X. Liang, Y. Wei, Y. Lin, Z. Huang, W. and Zhong, R. “Preparation and Characterization of Biochars from *Eichornia crassipes* for Cadmium Removal in Aqueous Solutions.” *Plos One* 11(2) : 1-13
- Li, G. Zhu, W. Zhang, C. Zhang, S. Liu, L. Zhu, L. and Zhao, W. 2016. “Effect of a magnetic field on the adsorptive removal of methylene blue onto wheat straw biochar.” *Bioresource Technology* 2016(206) : 16-22.
- Shang, J. Pi, J. Zong, M. Wang, Y. Li, W. and Liao, Q. 2016. “Chromium Removal Using Magnetic Biochar Derived from Herb-residue.” *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers.* 2016(68) : 289-294.
- Singare, P.U. Lokhande, R.U. and Pathak, P.P. 2010. “Soil Pollution along Kalwa Bridge at Thane Creek of Maharashtra, India,” *Journal of Environmental Protection.* 2010(1) : 121-128.
- Soco, E. and Kalemekiewicz, J. 2013. 2010. “Adsorption of Nickel(II) and Copper(II) ions from Aqueous Solution by Coal Fly Ash.” *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2013(1) : 581-588.
- Song, Q. Yang, B. Wang, H. Xu, S. and Cao, Y. 2016. “Effective Removal of Copper (II) and Cadmium (II) by Adsorbent Prepared from Chitosan-modified Magnetic Biochar.” *Journal of Residuals Science & Technology.* 3(13) : 197-205.
- Taiwo, A.F and Chinyere, N.J. 2016. “Sorption Characteristics for Multiple Adsorption of Heavy Metal Ions Using Activated Carbon from Nigerian Bamboo.” *Journal of Materials Science and Chemical Engineering.* 2016(4) : 39-48.
- Thilagan, J. Gopalakrishnan, S. and Kannadasan, T. 2013. “A Comparative Study on Adsorption of Copper (II) Ions in Aqueous Solution BY ; (A) Chitosan Blended with Cellulose and Cross Linked BY Formaldehyde, (B) Chitosan Immobilized on Red Soil, (C) Chitosan Reinforced BY Banana Stem Fibre.” *International Journal of Applied Engineering and Technology.* 3(1) : 35-60.
- Zhang, F. Wang, X. Yin, D. Peng, B. Tan, C. Liu, Y. Tan, X. and Wu, S. 2015. “Efficiency and Mechanisms of Cd Removal from Aqueous Solution by Biochar Derived from Water Hyacinth (*Eichornia crassipes*).” *Journal of Environmental Management.* 2015(153) : 68-73.

- Zhang, M. Liu, Y. Li, T. Xu, W. Zheng, B. Tan, X. Wang, H Guo, Y. Guo, F. and Wang. S. 2015. "Chitosan Modification of Magnetic Biocharproduced from Eichhornia Crassipes for Enhancedsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution." *RSC Advances*.
- Zheng, J. Liu, H. Feng, H. Li, W. Lam, M.H. Lam, P.K. and Yu, H. 2016. "Competitive Sorption of Heavy Metals by Water Hyacinth Roots." *Environmental Pollution*. 2016(219) : 837-845
- Zhou, Y. Gao, B. Zimmerman , A.R. Fang, J. Sun. Y. and Cao, X. 2016. "Sorption of Heavy Metals on Chitosan-Modified Biochars and its Biological Effects." *Chemical Engineering Journal*. 2013(231) : 512-518.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์ (pH_{pzc})

ตารางที่ ก.1 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ไม่ได้ใส่ตัวดูดซับ, ค่า pH เริ่มต้น และ ค่า pH สุดท้ายของการทดลองหาค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์

Blank	Initial pH	Final pH
3	2.28	2.28
4	3.09	3.06
5	4.19	4.48
6	5.28	6.3
7	6.56	6.92
8	7.20	7.12
9	8.58	7.17
10	9.60	7.29
11	10.01	7.43
12	11	10.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสารละลาย

ข.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 4 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาท)	ความเข้มข้นของ ทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การ กำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของ นิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การ กำจัดโลหะ นิกเกิล
30	3.93	1.80	7.50	6.25
60	4.01	49.84	7.48	6.56
90	4.02	49.73	7.61	4.85
120	3.95	50.64	7.02	12.29
150	1.17	51.79	7.19	10.09
180	1.34	70.83	6.94	13.23
210	1.34	66.48	5.58	30.28
240	5.97	85.08	3.01	62.33
360	5.97	85.07	7.57	5.41
480	5.96	85.10	7.71	3.64
600	3.89	90.27	7.75	3.11
720	5.97	85.08	8.19	-2.37
840	1.48	62.93	7.57	5.40
960	5.96	85.11	7.43	7.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 5 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาท)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	1.50	81.24	7.63	4.64
60	1.56	80.50	7.25	9.40
90	1.58	80.23	7.39	7.69
120	1.47	81.64	7.36	7.95
150	1.13	82.29	6.87	14.10
180	4.23	85.90	7.01	12.36
210	4.23	97.68	5.07	36.65
240	3.90	90.26	2.79	65.16
360	4.54	88.66	7.64	4.55
480	4.55	88.62	7.83	2.08
600	4.41	88.97	7.00	12.49
720	4.36	89.10	8.10	-1.20
840	0.38	99.05	7.19	10.10
960	4.56	88.61	7.58	5.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาท)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	0.10	98.80	6.72	16.06
60	0.09	98.89	6.93	13.40
90	0.11	98.65	6.56	17.95
120	0.05	99.38	6.65	16.85
150	0.03	99.73	6.61	17.40
180	0.29	99.61	5.97	25.34
210	0.29	99.91	5.14	35.78
240	0.44	98.91	2.22	72.23
360	0.12	99.70	5.74	28.29
480	0.34	99.16	7.19	10.10
600	0.27	99.32	7.53	5.90
720	0.29	99.27	7.35	8.14
840	0.24	99.41	2.90	63.71
960	0.35	99.12	5.36	32.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 7 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	0.03	99.66	1.37	82.90
60	0.04	99.53	1.32	83.48
90	0.04	99.54	1.37	82.90
120	0.05	99.36	1.49	81.39
150	0.04	99.64	1.59	80.13
180	0.13	99.51	1.55	80.58
210	0.13	99.96	6.00	84.99
240	0.27	99.33	5.96	85.10
360	0.02	99.95	0.90	97.75
480	0.02	99.96	0.00	75.50
600	0.05	99.87	2.59	67.60
720	0.11	99.72	3.04	62.01
840	0.07	99.82	3.15	60.69
960	0.07	99.83	3.07	61.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	0.03	99.61	0.78	90.31
60	0.04	99.50	0.67	91.64
90	0.05	99.43	0.66	91.81
120	0.05	99.39	0.72	90.95
150	0.01	99.41	0.82	89.79
180	0.02	99.89	0.70	91.21
210	0.02	100.01	4.13	89.68
240	0.31	99.23	3.12	92.19
360	0.01	100.03	0.78	98.06
480	0.01	99.98	7.13	82.19
600	0.12	99.70	7.79	80.53
720	0.07	99.84	8.74	78.16
840	0.07	99.84	8.61	78.48
960	0.16	99.61	9.21	76.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 9 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาที)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	0.03	99.66	0.18	97.79
60	0.04	99.55	0.26	96.79
90	0.04	99.45	0.44	94.51
120	0.05	99.39	0.32	95.99
150	0.04	99.38	0.41	94.93
180	0.01	99.45	0.32	96.01
210	0.01	100.01	2.09	94.78
240	0.04	100.09	1.60	96.00
360	0.01	99.98	0.71	98.24
480	0.01	100.03	4.82	87.95
600	0.01	100.03	6.22	84.46
720	0.02	99.96	7.71	80.74
840	0.04	99.90	7.62	80.94
960	0.08	99.79	8.56	78.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 น้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล (w/v) เท่ากับ 25 mg ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 40 mg/L pH เท่ากับ 10 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เวลา(นาท)	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
30	0.02	99.76	0.01	99.94
60	0.04	99.48	0.07	99.13
90	0.03	99.59	0.06	99.26
120	0.01	99.94	0.08	99.04
150	0.04	99.44	0.75	90.58
180	0.02	99.53	0.09	98.88
210	0.02	100.01	0.15	99.63
240	0.04	100.09	0.14	99.65
360	0.04	100.09	0.16	99.60
480	0.01	100.02	0.06	99.85
600	0.00	100.00	0.16	99.60
720	0.01	100.02	1.44	96.41
840	0.01	99.99	1.72	95.71
960	0.04	99.89	3.16	92.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ ข.8 ปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นดังนี้ 40, 80, 120, 160 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ (mg/L)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของทองแดง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง
40	1	0.378	0.378	0.298	99.255
	2	0.285	0.285		
	3	0.231	0.231		
80	1	0.306	0.306	0.565	99.294
	2	0.582	0.582		
	3	0.807	0.807		
120	1	1.011	1.011	0.946	99.212
	2	1.062	1.062		
	3	0.675	0.675		
160	1	1.1652	5.826	7.28	99.45
	2	1.7886	8.943		
	3	1.4142	7.071		
200	1	1.128	11.28	12.89	93.555
	2	1.5555	15.555		
	3	1.1835	11.835		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลเป็นดังนี้ 40, 80, 120, 160 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ (mg/L)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
40	1	3.6678	18.339	18.34	54.15
	2	3.3678	16.839		
	3	3.9684	19.842		
80	1	6.93	34.65	35.1	56.125
	2	5.4378	27.189		
	3	8.6922	43.461		
120	1	7.911	79.11	81.16	32.367
	2	8.361	83.61		
	3	8.091	80.91		
160	1	2.1108	105.54	114.99	28.131
	2	2.815	140.75		
	3	2.4888	124.44		
200	1	3.2388	161.94	164.15	17.925
	2	3.2976	164.88		
	3	3.3126	165.63		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของถ่านผักตบชวาที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ ข.10 ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นของทองแดง 40 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อปริมาณของถ่านผักตบชวาเท่ากับ 25, 50, 100, 150, 200 มิลลิกรัม

ปริมาณตัวดูดซับ (mg)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของทองแดง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง
25	1	1.849	36.98	35.56	77.775
	2	1.8	36		
	3	1.687	33.74		
50	1	1.54	30.8	33	79.375
	2	1.635	32.7		
	3	1.777	35.54		
100	1	3.099	30.99	22.91	85.6813
	2	2.208	22.08		
	3	1.565	15.65		
150	1	0.706	7.06	15.75	90.156
	2	2.854	28.54		
	3	1.165	11.65		
200	1	3.006	15.03	13.53	91.543
	2	2.628	13.14		
	3	3.8	19		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นของนิกเกิล 40 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของสารละลาย เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อปริมาณของถ่านผักตบชวาเท่ากับ 25, 50, 100, 150, 200 มิลลิกรัม

ปริมาณ ตัวดูดซับ (mg)	ซ้ำ ที่	ความเข้มข้นของ นิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้น ของนิกเกิล (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การ กำจัดโลหะนิกเกิล
25	1	7.048	140.96	137.88	13.825
	2	7.064	141.28		
	3	7.158	143.16		
50	1	6.967	139.34	136.48	14.7
	2	6.94	138.8		
	3	6.991	139.82		
100	1	6.804	136.08	139.14	13.038
	2	6.878	137.56		
	3	6.876	137.52		
150	1	6.711	134.22	136.64	14.6
	2	6.77	135.4		
	3	6.992	139.84		
200	1	6.896	137.92	141.14	11.788
	2	6.91	138.2		
	3	6.875	137.5		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ ข.12 ปริมาณถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของ น้ำเสียทองแดงเริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6 เมื่ออุณหภูมิของ น้ำเสียดังนี้ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ซ้ำ ที่	ความเข้มข้นของ ทองแดงที่วัดได้ จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้น ของทองแดง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัด โลหะทองแดง
35	1	0.57	11.4	8.7	94.56
	2	0.36	7.2		
	3	0.375	7.5		
45	1	0.281	5.62	7.01	95.61
	2	0.374	7.48		
	3	0.397	7.94		
55	1	0.031	0.62	4.64	97.1
	2	0.325	6.5		
	3	0.34	6.8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ปริมาณถ่านฟักตบขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียนิกเกิลเริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 6 เมื่ออุณหภูมิของน้ำเสียดังนี้ 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะนิกเกิล
35	1	2.468	123.4	125.55	21.53
	2	3.162	158.10		
	3	2.554	127.70		
45	1	2.300	115.00	118.10	26.19
	2	2.875	143.75		
	3	2.424	121.20		
55	1	2.264	113.20	106.96	33.18
	2	2.794	139.70		
	3	2.014	100.72		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ ข.14 ปริมาณถ่านผัดบดขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียทองแดงสังเคราะห์เริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียเท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใส่อิเล็กทรอนิกส์ในสารละลายน้ำเสียความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ดังนี้ NaCl, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, CaCl_2 , Na_3HPO_4 และ Na_2SO_4

ชนิดของอิเล็กทรอนิกส์	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของทองแดงที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของทองแดง (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง
NaCl	1	0.042	2.1	14.41	4.77
	2	0.4	20		
	3	0.4225	21.125		
Na_2SO_4	1	0.3645	18.225	20.88	10.27
	2	0.417	20.85		
	3	0.4715	23.575		
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	1	0.324	16.2	16.51	12.31
	2	0.3285	16.425		
	3	0.338	16.9		
CaCl_2	1	1.23875	24.775	23.775	14.6
	2	1.26875	25.375		
	3	1.05875	21.175		
Na_2HPO_4	1	0.04625	0.925	3.375	11.788
	2	0.225	4.5		
	3	0.235	4.7		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ปริมาณถ่านฟักตบขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำเสียนิกเกิลสังเคราะห์เริ่มต้น 160 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำเสียเท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใส่อิเล็กโทรไลต์ในสารละลายน้ำเสียความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ดังนี้ NaCl, Ca(NO₃)₂, CaCl₂, Na₃HPO₄ และ Na₂SO₄

ชนิดของอิเล็กโทรไลต์	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่วัดได้จาก AAS (mg/L)	ความเข้มข้นของนิกเกิล (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะทองแดง
NaCl	1	2.541	127.05	140.13	12.41
	2	3.05	152.5		
	3	2.817	140.85		
Na ₂ SO ₄	1	2.766	138.3	142.91	10.69
	2	3.086	154.3		
	3	2.723	136.15		
Ca(NO ₃) ₂	1	3.01	150.5	151.48	6.56
	2	2.973	148.65		
	3	3.106	155.3		
CaCl ₂	1	2.9	145	151.9	6.09
	2	3.1	155		
	3	3.114	155.7		
Na ₂ HPO ₄	1	0.996	49.8	44.47	72.22
	2	0.717	35.85		
	3	0.955	47.75		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับที่
สภาวะเหมาะสม

ตาราง ค.1 ไอโซเทอรัมแลงเมียร์ของการดูดซับทองแดง

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสียสังเคราะห์ (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_e/q_e
0.15	0.2	40	15.75	32.3333	0.4871
0.1	0.2	40	22.91	34.18	0.6702
0.025	0.2	40	35.56	35.52	1.0011

ตาราง ค.2 ไอโซเทอรัมแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิล

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสีย สังเคราะห์(L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	C_e/q_e
0.025	0.2	160	137.88	176.96	0.7791
0.1	0.2	160	139.14	41.72	3.3350
0.2	0.2	160	141.14	18.86	7.4835

ตาราง ค.3 ไอโซเทอรัมฟรุนดิชของการดูดซับทองแดง

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสีย สังเคราะห์(L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	Log C_e	log q_e
0.15	0.2	40	15.75	32.3333	1.1972	1.5096
0.1	0.2	40	22.91	34.18	1.3600	1.5337
0.025	0.2	40	35.56	35.52	1.5509	1.5504

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.4 ไอโซเทอร์มฟรอนดิชของการดูดซับนิกเกิล

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสีย สังเคราะห์(L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\text{Log } C_e$	$\text{log } q_e$
0.025	0.2	160	137.88	176.96	2.1395	2.2478
0.1	0.2	160	139.14	41.72	2.1434	1.6203
0.2	0.2	160	141.14	18.86	2.1496	1.2755

ตาราง ค.5 ไอโซเทอร์มเทมคินของการดูดซับทองแดง

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสียสังเคราะห์ (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg)	q_e (mg/g)	$\ln C_e$
0.15	0.2	40	15.75	32.3333	1.1972
0.1	0.2	40	22.91	34.18	1.3600
0.025	0.2	40	35.56	35.52	1.5509

ตาราง ค.6 ไอโซเทอร์มเทมคินของการดูดซับนิกเกิล

น้ำหนักตัว ดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสียสังเคราะห์ (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg)	q_e (mg/g)	$\ln C_e$
0.025	0.2	160	137.88	176.96	2.139501
0.1	0.2	160	139.14	41.72	2.143452
0.2	0.2	160	141.14	18.86	2.14965

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.7 ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับทองแดง

น้ำหนัก ตัวดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำ เสียสังเคราะห์ (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\ln q_e$	ϵ^2
0.15	0.2	40	15.75	32.33333	3.4760	26372626
0.1	0.2	40	22.91	34.18	3.5316	36549554
0.025	0.2	40	35.56	35.52	3.5700	87660788

ตาราง ค.8 ไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับนิกเกิล

น้ำหนัก ตัวดูดซับ (g)	ปริมาตรน้ำเสีย สังเคราะห์ (L)	C_o (mg/L)	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	$\ln q_e$	ϵ^2
0.025	0.2	160	137.88	176.96	5.1759	87660788
0.1	0.2	160	139.14	41.72	3.7309	36549554
0.2	0.2	160	141.14	18.86	2.9370	20407090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตาราง ง.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log(q_e - q_t)$
35°C	0	40	40	0	77.605	1.8898
	10	10.355	40	59.29	77.605	1.2628
	20	6.2425	40	67.515	77.605	1.0038
	30	7.325	40	65.35	77.605	1.0883
	40	3.217	40	73.566	77.605	0.6062
	50	1.432	40	77.136	77.605	-0.3288
	60	1.1975	40	-	--	

ตาราง ง.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log(q_e - q_t)$
45°C	0	40	40	0	61.344	1.7877
	10	24.2766	40	31.4466	61.344	1.4756
	20	15.0866	40	49.8266	61.344	1.0613
	30	14.86	40	50.28	61.344	1.0439
	40	11.73	40	56.54	61.344	0.6816
	50	10.3393	40	59.3213	61.344	0.3059
	60	9.328	40	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 °C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
55°C	0	40	40	0	66.83167	1.824982
	10	14.2875	40	51.425	66.83167	1.187709
	20	9.510833	40	60.97833	66.83167	0.767404
	30	7.426667	40	65.14667	66.83167	0.226601
	40	6.919167	40	66.16167	66.83167	-0.17392
	50	6.671667	40	66.65667	66.83167	-0.75695
	60	6.584167	40	-	-	-

ตาราง ง.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
120 mg/L	0	30	30	0	49.304	1.692882
	10	13.285	30	33.43	49.304	1.200686
	20	9.644	30	40.712	49.304	0.934094
	30	9.571	30	40.858	49.304	0.926651
	40	9.179	30	41.642	49.304	0.884342
	50	9.162	30	41.676	49.304	0.882411
	60	8.849	30	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
160 mg/L	0	40	40	0	63.82	1.804957
	10	11.36535	40	57.2693	63.82	0.816288
	20	10.8846	40	58.2308	63.82	0.74735
	30	10.638	40	58.724	63.82	0.707229
	40	10.25065	40	59.4987	63.82	0.635614
	50	10.03925	40	59.9215	63.82	0.590898
	60	8.09	40	-	-	-

ตาราง ง.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
200 mg/L	0	50	50	0	83.59	1.922154
	10	15.5275	50	68.945	83.59	1.165689
	20	12.935	50	74.13	83.59	0.975891
	30	11.4575	50	77.085	83.59	0.813247
	40	11.4425	50	77.115	83.59	0.81124
	50	10.255	50	79.49	83.59	0.612784
	60	8.205	50	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง .7 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
35°C	0	160	160	0	68.9	1.838219
	10	151.85	160	16.3	68.9	1.720986
	20	144.4	160	31.2	68.9	1.576341
	30	135.25	160	49.5	68.9	1.287802
	40	132.75	160	54.5	68.9	1.158362
	50	128.8	160	62.4	68.9	0.812913
	60	125.55	160	-	-	-

ตาราง ง .8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
45°C	0	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-
	20	152.28	160	15.44	83.8	1.834802
	30	148.94	160	22.12	83.8	1.790144
	40	147.7	160	24.6	83.8	1.772322
	50	126.92	160	66.16	83.8	1.246499
	60	118.1	160	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
55°C	0	160	160	0	106.16	2.025961
	10	151.64	160	16.72	106.16	1.951532
	20	128.34	160	63.32	106.16	1.631849
	30	126.68	160	66.64	106.16	1.596817
	40	123.82	160	72.36	106.16	1.528917
	50	114.98	160	90.04	106.16	1.207365
	60	106.92	160	-	-	-

ตาราง ง.10 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
120 mg/L	0	120	120	0	80.925	1.908083
	10	111.0375	120	17.925	80.925	1.799341
	20	96.6175	120	46.765	80.925	1.533518
	30	92.7325	120	54.535	80.925	1.421439
	40	89.4775	120	61.045	80.925	1.298416
	50	82.1275	120	75.745	80.925	0.71433
	60	79.5375	120	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

160 mg/L	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
	0	160	160	0	78.08	1.89254
	10	138.18	160	43.64	78.08	1.537063
	20	135.78	160	48.44	78.08	1.471878
	30	132.63	160	54.74	78.08	1.368101
	40	129.6	160	60.8	78.08	1.237544
	50	123.51	160	72.98	78.08	0.70757
	60	120.96	160	-	-	-

ตาราง ง.12 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

200 mg/L	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	q_e (mg/g)	$\log (q_e - q_t)$
	0	200	200	0	88.28	1.945862
	10	193.64	200	12.72	88.28	1.878292
	20	187.34	200	25.32	88.28	1.799065
	30	182.06	200	35.88	88.28	1.719331
	40	176.38	200	47.24	88.28	1.613207
	50	168.6	200	62.8	88.28	1.406199
	60	155.86	200	-	-	-

ตาราง ง.13 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
35°C	0	40	40	0	0
	10	10.355	40	59.29	0.168663
	20	6.2425	40	67.515	0.29623
	30	7.325	40	65.35	0.459067
	40	3.217	40	73.566	0.543729
	50	1.432	40	77.136	0.648206
	60	1.1975	40	-	-

ตาราง ง.14 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
45°C	0	40	40	0	0
	10	24.27667	40	31.44667	0.317999
	20	15.08667	40	49.82667	0.401391
	30	14.86	40	50.28	0.596659
	40	11.73	40	56.54	0.707464
	50	10.33933	40	59.32133	0.842867
	60	9.328	40	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.15 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55 °C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
55°C	0	40	40	0	0
	10	14.2875	40	51.425	0.194458
	20	9.510833	40	60.97833	0.327985
	30	7.426667	40	65.14667	0.460499
	40	6.919167	40	66.16167	0.60458
	50	6.671667	40	66.65667	0.750113
	60	6.584167	40	-	-

ตาราง ง.16 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
120 mg/L	0	30	30	0	0
	10	13.285	30	33.43	0.299133
	20	9.644	30	40.712	0.491256
	30	9.571	30	40.858	0.73425
	40	9.179	30	41.642	0.960569
	50	9.162	30	41.676	1.199731
	60	8.849	30	-	-

ตาราง ง.17 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
160 mg/L	0	40	40	0	0
	10	11.36535	40	57.2693	0.174614
	20	10.8846	40	58.2308	0.343461
	30	10.638	40	58.724	0.510864
	40	10.25065	40	59.4987	0.672284
	50	10.03925	40	59.9215	0.834425
	60	8.09	40	-	-

ตาราง ง.18 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
200 mg/L	0	50	50	0	0
	10	15.5275	50	68.945	0.145043
	20	12.935	50	74.13	0.269796
	30	11.4575	50	77.085	0.389181
	40	11.4425	50	77.115	0.518706
	50	10.255	50	79.49	0.62901
	60	8.205	50	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.19 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
35°C	0	160	160	0	0
	10	151.85	160	16.3	0.613497
	20	144.4	160	31.2	0.641026
	30	135.25	160	49.5	0.606061
	40	132.75	160	54.5	0.733945
	50	128.8	160	62.4	0.801282
	60	125.55	160	-	-

ตาราง ง.20 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
45°C	0	-	-	-	-
	10	-	-	-	-
	20	152.28	160	15.44	1.295337
	30	148.94	160	22.12	1.356239
	40	147.7	160	24.6	1.626016
	50	126.92	160	66.16	0.755744
	60	118.1	160	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.21 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
55°C	0	160	160	0	0
	10	151.64	160	16.72	0.598086
	20	128.34	160	63.32	0.315856
	30	126.68	160	66.64	0.45018
	40	123.82	160	72.36	0.552792
	50	114.98	160	90.04	0.555309
	60	106.92	160	-	-

ตาราง ง.22 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
120 mg/L	0	120	120	0	0
	10	111.0375	120	17.925	0.55788
	20	96.6175	120	46.765	0.42767
	30	92.7325	120	54.535	0.550105
	40	89.4775	120	61.045	0.655254
	50	82.1275	120	75.745	0.66011
	60	79.5375	120	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.23 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
160 mg/L	0	160	160	0	0
	10	138.18	160	43.64	0.229148
	20	135.78	160	48.44	0.412882
	30	132.63	160	54.74	0.548045
	40	129.6	160	60.8	0.657895
	50	123.51	160	72.98	0.685119
	60	120.96	160	-	-

ตาราง ง.24 อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	t/q_t
200 mg/L	0	200	200	0	0
	10	193.64	200	12.72	0.786164
	20	187.34	200	25.32	0.789889
	30	182.06	200	35.88	0.83612
	40	176.38	200	47.24	0.84674
	50	168.6	200	62.8	0.796178
	60	155.86	200	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.25 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
35°C	0	40	40	0	0
	10	10.355	40	59.29	2.3025
	20	6.2425	40	67.515	2.9957
	30	7.325	40	65.35	3.4011
	40	3.217	40	73.566	3.6888
	50	1.432	40	77.136	3.9120
	60	1.1975	40	-	-

ตาราง ง.26 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
45°C	0	40	40	0	0
	10	24.2766	40	31.44667	2.3025
	20	15.0866	40	49.82667	2.9957
	30	14.86	40	50.28	3.4011
	40	11.73	40	56.54	3.6888
	50	10.3393	40	59.32133	3.9120
	60	9.328	40	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.27 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
55°C	0	40	40	0	0
	10	14.2875	40	51.425	2.302585
	20	9.510833	40	60.97833	2.995732
	30	7.426667	40	65.14667	3.401197
	40	6.919167	40	66.16167	3.688879
	50	6.671667	40	66.65667	3.912023
	60	6.584167	40	-	-

ตาราง ง.28 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
120 mg/L	0	30	30	0	0
	10	13.285	30	33.43	2.302585
	20	9.644	30	40.712	2.995732
	30	9.571	30	40.858	3.401197
	40	9.179	30	41.642	3.688879
	50	9.162	30	41.676	3.912023
	60	8.849	30	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.29 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
160 mg/L	0	40	40	0	0
	10	11.36535	40	57.2693	2.302585
	20	10.8846	40	58.2308	2.995732
	30	10.638	40	58.724	3.401197
	40	10.25065	40	59.4987	3.688879
	50	10.03925	40	59.9215	3.912023
	60	8.09	40	-	-

ตาราง ง.30 สมการ Elovich ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
200 mg/L	0	50	50	0	0
	10	15.5275	50	68.945	2.302585
	20	12.935	50	74.13	2.995732
	30	11.4575	50	77.085	3.401197
	40	11.4425	50	77.115	3.688879
	50	10.255	50	79.49	3.912023
	60	8.205	50	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.31 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
35°C	0	160	160	0	0
	10	151.85	160	16.3	2.302585
	20	144.4	160	31.2	2.995732
	30	135.25	160	49.5	3.401197
	40	132.75	160	54.5	3.688879
	50	128.8	160	62.4	3.912023
	60	125.55	160	-	-

ตาราง ง.32 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
45°C	0	-	-	-	-
	10	-	-	-	-
	20	152.28	160	15.44	2.995732
	30	148.94	160	22.12	3.401197
	40	147.7	160	24.6	3.688879
	50	126.92	160	66.16	3.912023
	60	118.1	160	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.33 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
55°C	0	160	160	0	0
	10	151.64	160	16.72	2.302585
	20	128.34	160	63.32	2.995732
	30	126.68	160	66.64	3.401197
	40	123.82	160	72.36	3.688879
	50	114.98	160	90.04	3.912023
	60	106.92	160	-	-

ตาราง ง.34 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
120 mg/L	0	120	120	0	0
	10	111.0375	120	17.925	2.302585
	20	96.6175	120	46.765	2.995732
	30	92.7325	120	54.535	3.401197
	40	89.4775	120	61.045	3.688879
	50	82.1275	120	75.745	3.912023
	60	79.5375	120	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.35 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
160 mg/L	0	160	160	0	0
	10	138.18	160	43.64	2.302585
	20	135.78	160	48.44	2.995732
	30	132.63	160	54.74	3.401197
	40	129.6	160	60.8	3.688879
	50	123.51	160	72.98	3.912023
	60	120.96	160	-	-

ตาราง ง.36 สมการ Elovich ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$\ln t$
200 mg/L	0	200	200	0	0
	10	193.64	200	12.72	2.302585
	20	187.34	200	25.32	2.995732
	30	182.06	200	35.88	3.401197
	40	176.38	200	47.24	3.688879
	50	168.6	200	62.8	3.912023
	60	155.86	200	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.37 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
35°C	0	40	40	0	0
	10	10.355	40	59.29	3.162278
	20	6.2425	40	67.515	4.472136
	30	7.325	40	65.35	5.477226
	40	3.217	40	73.566	6.324555
	50	1.432	40	77.136	7.071068
	60	1.1975	40	-	-

ตาราง ง.38 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
45°C	0	40	40	0	0
	10	24.27667	40	31.44667	3.162278
	20	15.08667	40	49.82667	4.472136
	30	14.86	40	50.28	5.477226
	40	11.73	40	56.54	6.324555
	50	10.33933	40	59.32133	7.071068
	60	9.328	40	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.39 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
55°C	0	40	40	0	0
	10	14.2875	40	51.425	3.162278
	20	9.510833	40	60.97833	4.472136
	30	7.426667	40	65.14667	5.477226
	40	6.919167	40	66.16167	6.324555
	50	6.671667	40	66.65667	7.071068
	60	6.584167	40	-	-

ตาราง ง.40 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
120 mg/L	0	30	30	0	0
	10	13.285	30	33.43	3.162278
	20	9.644	30	40.712	4.472136
	30	9.571	30	40.858	5.477226
	40	9.179	30	41.642	6.324555
	50	9.162	30	41.676	7.071068
	60	8.849	30	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.41 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
160 mg/L	0	40	40	0	0
	10	11.36535	40	57.2693	3.162278
	20	10.8846	40	58.2308	4.472136
	30	10.638	40	58.724	5.477226
	40	10.25065	40	59.4987	6.324555
	50	10.03925	40	59.9215	7.071068
	60	8.09	40	-	-

ตาราง ง.42 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับทองแดง ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
200 mg/L	0	50	50	0	0
	10	15.5275	50	68.945	3.162278
	20	12.935	50	74.13	4.472136
	30	11.4575	50	77.085	5.477226
	40	11.4425	50	77.115	6.324555
	50	10.255	50	79.49	7.071068
	60	8.205	50	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.43 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 35°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
35°C	0	160	160	0	0
	10	151.85	160	16.3	3.162278
	20	144.4	160	31.2	4.472136
	30	135.25	160	49.5	5.477226
	40	132.75	160	54.5	6.324555
	50	128.8	160	62.4	7.071068
	60	125.55	160	-	-

ตาราง ง.44 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 45°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
45°C	0	-	-	-	-
	10	-	-	-	-
	20	152.28	160	15.44	4.472136
	30	148.94	160	22.12	5.477226
	40	147.7	160	24.6	6.324555
	50	126.92	160	66.16	7.071068
	60	118.1	160	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.45 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 55°C

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
55°C	0	160	160	0	0
	10	151.64	160	16.72	3.162278
	20	128.34	160	63.32	4.472136
	30	126.68	160	66.64	5.477226
	40	123.82	160	72.36	6.324555
	50	114.98	160	90.04	7.071068
	60	106.92	160	-	-

ตาราง ง.46 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
120 mg/L	0	120	120	0	0
	10	111.0375	120	17.925	3.162278
	20	96.6175	120	46.765	4.472136
	30	92.7325	120	54.535	5.477226
	40	89.4775	120	61.045	6.324555
	50	82.1275	120	75.745	7.071068
	60	79.5375	120	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.47 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
160 mg/L	0	160	160	0	0
	10	138.18	160	43.64	3.162278
	20	135.78	160	48.44	4.472136
	30	132.63	160	54.74	5.477226
	40	129.6	160	60.8	6.324555
	50	123.51	160	72.98	7.071068
	60	120.96	160	-	-

ตาราง ง.48 สมการ Intra-particle diffusion ของการดูดซับนิกเกิล ที่ความเข้มข้นของน้ำเสีย 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 100 มิลลิกรัม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

	time (นาที)	C_e (mg/L)	C_o (mg/L)	q_t (mg/g)	$t^{0.5}$
200 mg/L	0	200	200	0	0
	10	193.64	200	12.72	3.162278
	20	187.34	200	25.32	4.472136
	30	182.06	200	35.88	5.477226
	40	176.38	200	47.24	6.324555
	50	168.6	200	62.8	7.071068
	60	155.86	200	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

จ. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลการคายซัด้วยวิธีต่างๆ

ตารางที่ จ.1 ประสิทธิภาพในการคายซัทองแดง แลการลดลงของประสิทธิภาพในการดูดซัหลังจากคายซั โดยใช้วิธีการคายซัโดย EDTA, คายซัโดย HNO_3 และคายซัโดยใช้ NaNO_3

สารคายซั	ค่าการคายซั	เปอร์เซ็นต์การคายซั	ค่าการดูดซัหลังการคายซั	เปอร์เซ็นต์การดูดซัหลังการคายซั
EDTA	1.94	7.43	2.30	85.62
HNO_3	1.92	8.49	1.34	91.60
NaNO_3	2.33	8.36	1.32	91.78

ตารางที่ จ.1 ประสิทธิภาพในการคายซันิกเกิล แลการลดลงของประสิทธิภาพในการดูดซัหลังจากคายซั โดยใช้วิธีการคายซัโดย EDTA, คายซัโดย HNO_3 และคายซัโดยใช้ NaNO_3

สารคายซั	ค่าการคายซั	เปอร์เซ็นต์การคายซั	ค่าการดูดซัหลังการคายซั	เปอร์เซ็นต์การดูดซัหลังการคายซั
EDTA	0.25	2.33	6.00	6.25
HNO_3	1.43	1.66	7.42	7.44
NaNO_3	0.34	3.20	7.27	7.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้