

การดูดซับสังกะสีออกจากน้ำเสีย  
ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

Adsorption of Zn from Wastewater Using Magnetic  
Biochar Composites by Zero-Valent Iron



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



NARISARA PHRUETHAKORN  
PIYAPINYA THAMKLA  
LAKSANAWADEE KHONGCHAIYAPHUM

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

DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดูดซับสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

Adsorption of Zn from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron

ชื่อนักศึกษา

นางสาวนริศรา พงศมากรณ์ รหัสนักศึกษา 62050401

นางสาวปิยะภิญญา ทากกล้า รหัสนักศึกษา 62050415

นางสาวลักษณาวดี กงชัยภูมิ รหัสนักศึกษา 62050438

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2565

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

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

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการ	
รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ Adsorption of Zn from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนริศรา	พฤตมากรณ์	รหัสนักศึกษา 62050401
	นางสาวปิยะภิญญา	ท่ากล้า	รหัสนักศึกษา 62050415
	นางสาวลักษณาวดี	กงชัยภูมิ	รหัสนักศึกษา 62050438
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2565		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสังกะสี ด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบไปด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ โดยงานวิจัยศึกษา pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ ( $pH_{pzc}$ ) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น ค่า pH ของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการบำบัด และอุณหภูมิในการดูดซับ รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งค่าประจุพื้นผิวของตัวดูดซับถ่านชีวภาพแม่เหล็กจะเป็นศูนย์ ผลการทดลองชี้ว่าประจุที่ผิวตัวดูดซับจะเป็นศูนย์เมื่อสารละลายมีค่าพีเอช 3.85 เมื่อใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 2 กรัม/ลิตร บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 7 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สามารถบำบัดได้ 79.68 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมแบบใด

**คำสำคัญ :** สังกะสี, ถ่านชีวภาพ, เหล็กวาเลนซ์ศูนย์, ตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Adsorption of Zn from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron		
<b>Students</b>	Narisara	Phruethakorn	Student ID 62050401
	Piyapinya	Thamkla	Student ID 62050415
	Laksanawadee	Khongchaiyaphum	Student ID 62050438
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>School</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2565		
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa		

### Abstract

This special project aimed to study the treatment of zinc-contaminated wastewater using magnetic biochar composites by zero valence iron. The point of zero charges of the magnetic biochar ( $pH_{pzc}$ ) and the adsorption related factors such as pH value of solution, sorbent dosage, treatment time and temperature were studied. The study included the adsorption isotherms. The results indicated that the surface area charges of adsorbent were zero when the solution pH was 3.85. When using 2 g/l of magnetic biochar to treat synthetic wastewater contaminated with zinc at a concentration of 100 mg/l, pH 7, temperature 40 °C for 15 minutes, the treatment efficiency was 79.68 percent. The results are inconclusive about the type of adsorption isotherm.

**Keyword :** Zinc, Biochar, Zero valent iron, Adsorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากกลุ่มบุคคลต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา รวมถึงช่วยตรวจสอบผลงาน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ เพื่อนๆ น้องๆ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ทุกคน ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการจัดการด้านการเงิน ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้ทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน แรงบันดาลใจ และคอยสนับสนุนมาตลอด ทำให้กลุ่มของผู้ทำวิจัย สามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

นริศรา พงศมากรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น **ปิยะภิญญา ทำกล้า**  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึง **ลักษณะาวดี กงชัยภูมิ** ที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 โลหะหนัก.....	3
2.1.1 สังกะสี (Zn).....	3
2.1.2 ความเป็นพิษของสังกะสี.....	4
2.1.3 ประโยชน์ของสังกะสี.....	5
2.2 อุตสาหกรรมชุบโลหะ.....	5
2.2.1 การชุบโลหะ.....	5
2.2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating).....	6
2.2.3 การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Plating).....	6
2.2.4 การชุบโลหะแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและไฟฟ้าเคมี.....	7
2.2.5 การชุบโลหะแบบอื่น ๆ.....	7
2.3 การดูดซับ.....	8
2.3.1 กระบวนการดูดซับ.....	8
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ.....	8
2.3.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ.....	9
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

2.4 . การบำบัดน้ำเสีย .....	11
2.4.1 . การบำบัดขั้นเตรียมการและขั้นต้น .....	11
2.4.2 . การกำจัดด้วยตะแกรงหยาบ .....	11
2.4.3 . บ่อตกกรวดทราย .....	11
2.4.4 . ถังตกตะกอนเบื้องต้น .....	12
2.4.5 . บ่อตกไขมันและน้ำมัน .....	12
2.4.6 . การบำบัดขั้นที่สอง .....	12
2.4.7 . การบำบัดขั้นที่สาม .....	13
2.4.8 . การบำบัดขั้นสูง .....	13
2.4.9 . การบำบัดกากตะกอนหรือสลัดจ์ .....	14
2.4.10 . การกำจัดตะกอน .....	15
2.5 . เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ .....	15
2.5.1 . คุณสมบัติทางเคมี .....	15
2.5.2 . การกักร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ .....	17
2.5.3 . จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ .....	19
2.5.4 . การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ .....	20
2.5.5 . ไอโซเทอมการดูดซับ .....	21
2.5.6 . การใช้ประโยชน์ .....	22
2.6 . งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>24</b>
3.1 . อุปกรณ์และสารเคมี .....	24
3.1.1 . อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	24
3.1.2 . สารเคมี .....	24
3.2 . การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี .....	25
3.3 . การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีไบโโรไฮไดรริตักชัน .....	25
3.4 . การวิเคราะห์ค่า Point of zero charge ( $pH_{pzc}$ ) ของถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดยวิธี pH drift method .....	25
3.5 . การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด .....	26
3.6 . การคำนวณเพื่อศึกษาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	28
4.1 . การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ .....	28
4.2 . การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี .....	29
4.2.1 . การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม .....	29
4.2.2 . การศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กและเวลาที่เหมาะสม .....	29
4.2.3 . การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัด .....	30
4.3 . ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาลเลนซ์ศูนย์ .....	31
4.3.1 . สมการการดูดซับของ Langmuir .....	31
4.3.2 . สมการการดูดซับของ Freundlich .....	33
4.3.3 . สมการการดูดซับของ Temkin .....	34
4.3.4 . สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich .....	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	38
5.1 . สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	38
5.2 . ข้อเสนอแนะ .....	38
เอกสารอ้างอิง .....	39
ภาคผนวก .....	41
ภาคผนวก ก .....	42
ภาคผนวก ข .....	44
ภาคผนวก ค .....	45
ภาคผนวก ง .....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สภาวะที่ทำการทดลอง.....	26
4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับสังกะสีด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก .....	37
ภาคผนวก ค.1 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าพีเอชสุดท้ายของการทดลองหาค่าประจุพื้นที่ผิวที่เป็นศูนย์ .....	45
ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 1 รอบที่ 1.....	46
ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 1 รอบที่ 2.....	46
ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 0 g/L .....	47
ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 0.5 g/L .....	47
ตารางที่ ง.5 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 1 g/L .....	48
ตารางที่ ง.6 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 2 g/L .....	48
ตารางที่ ง.7 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 3 g/L .....	49
ตารางที่ ง.8 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 2 น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 4 g/L .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

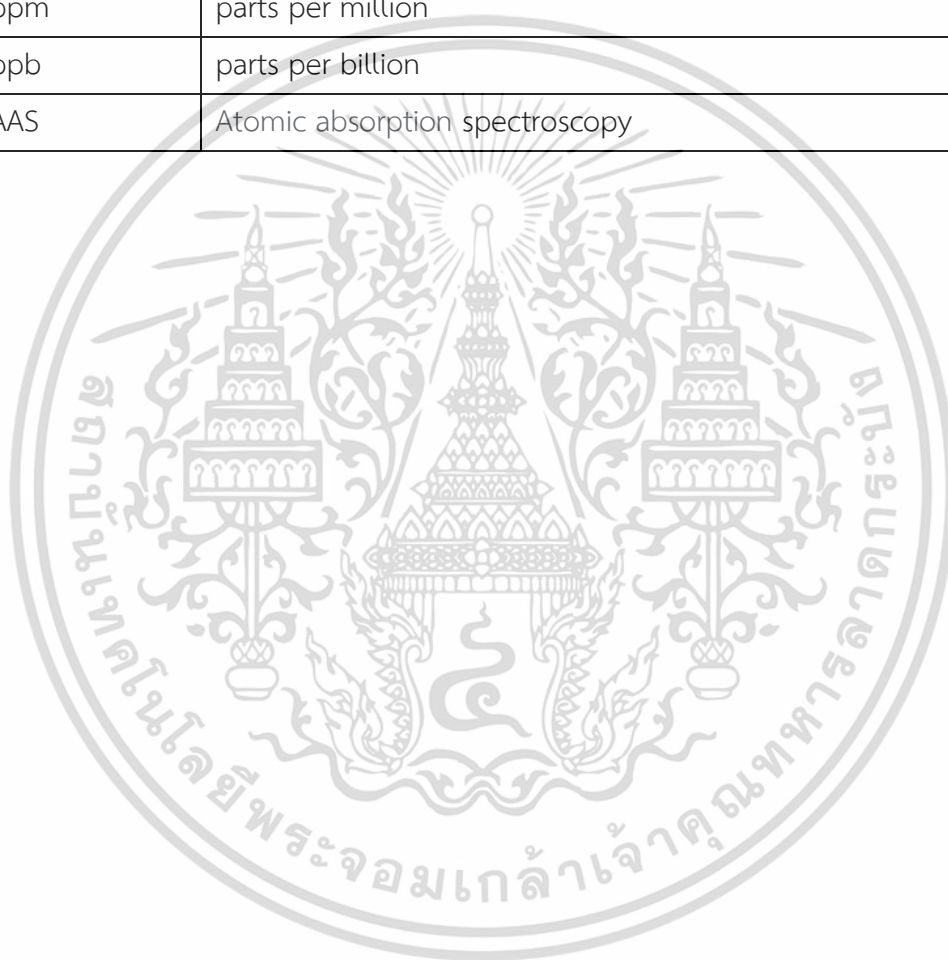
## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการชุบโลหะโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า.....	6
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกชุบไปยังตัวชุบ.....	9
รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกิจกรรมประเภทต่างๆ.....	15
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ $pH_{pzc}$ ของถ่านชีวภาพสภาวะแม่เหล็ก.....	28
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับค่าพีเอช.....	29
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลา และ ปริมาณ MBC.....	30
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดและอุณหภูมิ.....	30
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ.....	32
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับ ของถ่านชีวภาพ แม่เหล็ก.....	33
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_e$ กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนสังกะสี...	35
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $E^2$ ของการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนสังกะสี..	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ZVI	Zero-valent iron
BC	Biochar
MBC	Magnetic biochar
ppm	parts per million
ppb	parts per billion
AAS	Atomic absorption spectroscopy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีโลหะหนักอยู่หลายชนิดที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย เช่น Zn Cd Mn Fe เป็นต้น และมีการนำเอาโลหะหนักเหล่านี้มาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งสังกะสีก็เป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น โดยทั้ง 2 อุตสาหกรรมนี้อยู่ในบัญชีรายชื่อการกำหนดประเภท ชนิด และขนาดของโรงงาน คือ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการชุบโลหะอยู่ในลำดับที่ 64 และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับสิ่งทออยู่ในลำดับที่ 22 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม) และจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะมี 212 โรงงาน จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทย ในปี 2565 มีจำนวนรวม 2,671 โรงงาน (สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ)

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่ก่อปัญหาของน้ำเสียปนเปื้อนสังกะสีนี้มีวิธีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมีหรือการตกตะกอนผลึก เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย (Soluble form) เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble form) เกิดเป็นตะกอนซึ่งจับตัวได้มีข้อเสียคือ ต้องใช้สารเคมีจำนวนมากไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดโดยใช้ไฟฟ้า ข้อจำกัดของวิธีนี้คือสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

การบำบัดด้วยวิธีการดูดซับนั้นก็มีข้อดี เช่น ง่ายและถูก เป็นต้นและมีนักวิจัยจำนวนมากใช้ถ่านที่ทำจากวัสดุที่หาง่าย ราคาถูกหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กากมะพร้าวและแกนข้าวโพด เป็นต้น มาเป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียและปริมาณการปลูกข้าวโพดในประเทศสามารถปลูกได้ดีทุกภาค จังหวัดที่มีเนื้อที่ปลูกข้าวโพดมาก 5 อันดับแรกในปีเพาะปลูก 2556 ได้แก่ เพชรบูรณ์ เลย นครราชสีมา ตาก และน่าน มีเนื้อที่ 1.08, 0.82, 0.81, 0.68 และ 0.62 ล้านไร่ ตามลำดับ และมีผลผลิตรวม 0.73, 0.56, 0.60, 0.45 และ 0.40 ล้านตัน ตามลำดับ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) แกนข้าวโพดเป็นสิ่งเหลือทิ้งจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้ประโยชน์

ในการใช้ถ่านชีวภาพดูดซับมลพิษในน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพที่น่าพอใจ แต่ปัญหาคือการแยกตัวดูดซับออกจากน้ำเสียหลังจากดูดซับแล้วทำได้ยาก จึงมีนักวิจัยหลายคนสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  แล้วนำไปดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งให้ผลการดูดซับที่ดี และแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายขึ้น โดยใช้แม่เหล็กดูดออก โดยถ่านชีวภาพในสภาวะแม่เหล็กสามารถช่วยให้การดูดซับดียิ่งขึ้น สังเคราะห์ได้ง่าย และไม่ส่งผลให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม (ชมพูนุท และคณะ,

เอกสารนี้ 2561) แต่ยังมีพบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่สังเคราะห์จาก  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  มีความไม่เสถียร ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กหลุดออกจากถ่านและปนเปื้อนในน้ำเสียได้ง่าย และในเวลาต่อมามีผู้วิจัยสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กจาก  $Fe^0$  และระบุว่าเหล็กจะมีความเสถียรมากขึ้น ไม่หลุดออกง่าย แต่งานวิจัยยังมีอยู่ในวงจำกัด

ผู้วิจัยจึงมุ่งที่จะสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสังกะสี ไอโซเทอมการดูดซับ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ทำการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสังกะสี ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นตัวดูดซับ โดยประเด็นที่ศึกษามีดังนี้

- 1) สังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กและทดสอบคุณสมบัติ
- 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ
- 3) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ และวิเคราะห์
- 2) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้
  - ค่า pH คือ 2, 3, 4, 5, 7, 9
  - ปริมาณของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก คือ 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 กรัม/ลิตร
  - ระยะเวลาในการดูดซับ คือ 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที
  - อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 45°C, 50°C โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีหลังบำบัดแล้วทุกครั้ง และความเข้มข้นของเหล็กในน้ำเสียเฉพาะในการทดลองอิทธิพลของ pH
- 3) นำผลการทดลองไปคำนวณเพื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม
- 2) สามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้ด้วยการนำกากของเสียจากผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ในการผลิตเป็นถ่านชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะหนัก (กองตรวจสอบคุณภาพสินค้าประมง กรมประมง, 2558)

โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป ได้แก่ ดีบุก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว สารหนู พรอท เป็นสารที่มีอัตราการสลายตัวค่อนข้างช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานเป็นมลพิษทางน้ำ มนุษย์จะรับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายโดยการบริโภค น้ำ พิษน้ำ สัตว์น้ำ เช่น กุ้ง หอย ปู ปลา สาหร่าย เป็นต้น จากการกินตามห่วงโซ่อาหาร โลหะหนักเป็นอันตรายในอาหาร (Food hazard) ประเภทอันตรายทางเคมี (Chemical hazard) จึงเกิดการสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อสัตว์ และเนื้อเยื่อพืช โดยสะสมสารมลพิษเพิ่มขึ้น ตามลำดับขั้นการบริโภค

#### 2.1.1 สังกะสี (Zn)

สังกะสีเป็นแร่โลหะที่มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อนแกมน้ำเงิน มีความแข็งแรง ทนทาน โดยสังกะสีมีมวลอะตอม 65.409 เลขอะตอม 30 เลขออกซิเดชัน  $2^+$  จุดเดือดที่ 907 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.68 องศาเซลเซียส สังกะสีมักพบปะปนกับซัลไฟด์ของโลหะอื่น เช่น เหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นจุลธาตุอาหารที่มีความสำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตอีกด้วย สำหรับพืช พบว่าสังกะสี มีความจำเป็นในการเจริญเติบโต และระบบภายในเช่นกัน เนื่องจากเป็น จุลธาตุอาหารที่อาจเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับพืชในดินที่ขาดแคลน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการเจริญเติบโต ของพืชรวมทั้งก่อให้เกิดโรคได้

สังกะสี มีความสำคัญต่อร่างกายมากเพราะเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์มากกว่า 200 ชนิด มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนที่ควบคุมการทำงานของร่างกายหลายระบบ เช่น การเจริญเติบโต ภูมิคุ้มกันโรค ติดเชื้อ การสืบพันธุ์ ระบบประสาทที่ควบคุมพฤติกรรม สังเคราะห์กรดนิวคลีอิก และที่สำคัญมากคือ มีบทบาทในขบวนการเมตาบอลิซึมของโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต จากข้อมูล การศึกษาในกลุ่มประชากรและเด็กก่อนวัยเรียนของประเทศที่กำลังพัฒนาพบว่า ภาวะการขาดธาตุสังกะสีมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคติดเชื้อ ซึ่งเป็นสาเหตุการตายที่สำคัญในทารกและเด็กเล็ก เช่น โรคท้องร่วงเรื้อรัง โรคติดเชื้อระบบทางเดินหายใจ โรคมาลาเรีย การเสริมธาตุสังกะสีในกลุ่มประชากรเหล่านี้ ช่วยให้ร่างกายมีการเจริญเติบโต และช่วยลดอุบัติการณ์ของโรคดังกล่าว องค์การอนามัยโลก ได้ประกาศให้ภาวะขาดธาตุสังกะสีเป็น 1/10 ของปัจจัยภาระ โรค (Burden of diseases) ธาตุสังกะสีพบมากใน เนื้อสัตว์ อาหารทะเล ตับและไข่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ความเป็นพิษของสังกะสี

การได้รับสังกะสีเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่อาจทำให้เกิดพิษสามารถแบ่งได้หลายกรณี ได้แก่

#### 1) การได้รับสังกะสีจากภาวะมลพิษ

สังกะสีที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมักเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่บำบัดไม่หมด หรือการผลิตภัณฑ์ที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ มลพิษที่ปนเปื้อนสังกะสีมักอยู่ในรูปของฝุ่น หรือไอสารที่ลอยในอากาศ ซึ่งมีโอกาสสัมผัส และได้รับสารได้ง่าย โดยเฉพาะคนงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิต

ฝุ่นหรือไอของซิงค์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ส่วนการสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานานจะทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรง ที่เรียกว่า โรค ออกไซด์พอกซ์ (Oxide pox) อาการเมื่อได้รับฝุ่นหรือไอของสังกะสีในปริมาณมากจากการสูดดมจะเกิดอาการระคายเคือง ไอ หลอดลมอักเสบ ปอดบวม เหนื่อยล้าง่าย อ่อนแรง มีอาการปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้ มีไข้ มีอาการหนาวสั่น และผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งมักเกิดภายใน 4-12 ชั่วโมง หลังการสัมผัส อาการเหล่านี้จะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้อาโรควัซวันจันทร์ (Monday fever) หรือโรควัซไฟฟูลเฮ (Metal fume fever)

#### 2) การปนเปื้อนจากอาหาร และน้ำดื่ม

สารประกอบซิงค์ออกไซด์มักปะปนในแหล่งน้ำหรืออาหารได้ง่าย โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ใกล้แหล่งแร่สังกะสี เมื่อร่างกายได้รับสาร และสะสมเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดอาการความผิดปกติ และพบอาการเลือดออกในระบบทางเดินอาหาร ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ได้กำหนดให้มีสังกะสีปนเปื้อนในแหล่งน้ำไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร

การเกิดพิษในระบบทางเดินอาหารจากการกินสังกะสีเข้าไปจะเกิดอาการบริเวณทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหาร และกระเพาะอาหาร ทำให้มีอาการอักเสบ ปวดท้องอย่างรุนแรง และอาจทำให้ทางเดินอาหารตีบตันได้

#### 3) ผลกระทบอาหารเสริมสังกะสี

ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสังกะสี ทั้งในรูปแบบของอาหารเสริมสังกะสีชนิดเม็ด และชนิดน้ำ หากผู้บริโภคบริโภคปริมาณในจำนวนมากที่เกินความต้องการของร่างกายมักทำให้เกิดอาการเหมือนการได้รับซิงค์ออกไซด์ในข้อที่ 2 ที่กล่าวมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ประโยชน์ของสังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะในหมู่เดียวกันกับปรอท มีลักษณะสีเงิน มันวาว หลอม และขึ้นรูปได้ง่าย มีความทนต่อการเกิดสนิม มีความแข็ง แต่เปราะง่าย ไม่สามารถตัดโค้งงอตามรูปที่ต้องการได้ เนื่องจากเปราะ และมีจุดหลอมเหลวต่ำเมื่อเทียบกับโลหะอื่น เช่น ทอง ที่ตัดโค้งงอได้ดีกว่า

- 1) เป็นโลหะสำคัญที่ใช้เป็นโลหะผสมกับโลหะชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติโลหะต่าง ๆ
- 2) เป็นโลหะที่ใช้เคลือบโลหะอื่น ๆ สำหรับป้องกันการเกิดสนิม
- 3) ใช้ผลิตทองเหลือง (สังกะสีผสมทองแดง)
- 4) ใช้ผลิตสังกะสีมุงหลังคา
- 5) ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) ใช้เป็นสารป้องกันเชื้อราในอุตสาหกรรมกระดาษ และไม่อัด

## 2.2 อุตสาหกรรมชุบโลหะ

อุตสาหกรรมชุบโลหะเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์จากโลหะเหล็ก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ท่อ และข้อต่อกล้าไนซ์ เครื่องสุขภัณฑ์ที่ทำด้วยโลหะ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือช่าง น็อต สกรู กุญแจ ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลต่างๆ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

### 2.2.1 การชุบโลหะ (ณปักษ์, 2560)

การทำให้โลหะชนิดหนึ่งเคลือบอยู่บนผิวของโลหะอีกชนิดหนึ่ง เป็นเทคโนโลยีที่มีมานาน เพื่อปรับปรุงผิวชิ้นงานให้มีความแข็ง เพื่อทนต่อการสึกหรอ การเสียดสี ความร้อน รวมถึงป้องกันการกัดกร่อน การชุบเคลือบเป็นการนำวัสดุมาเคลือบติดกับผิวชิ้นงานได้แก่ การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การเคลือบผิวด้วยไอกายภาพและไอเคมี การทาสี การเคลือบสารแม่เหล็กลงบนแผ่นดิสก์

อุตสาหกรรมเกือบทุกประเภทมักจะผ่านการชุบเคลือบทั้งสิ้น ได้แก่ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม ตลอดจนชิ้นส่วนทางการแพทย์

ส่วนการชุบแข็งเหล็กกล้า เป็นการทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยการให้ความร้อนเพื่อทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างผลึก จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลง โดยอัตราการเย็นตัว ต้องเร็วพอที่จะทำให้เหล็กกล้าเปลี่ยนโครงสร้างผลึก เป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีความแข็งสูง ดังนั้นในทางอุตสาหกรรม การชุบโลหะจัดอยู่ในอุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนของอุตสาหกรรม

หลักอื่นๆ จำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์อิเล็กทรอนิกส์อุปกรณ์ก่อสร้าง อัญมณี เครื่องจักรกลหนัก เครื่องใช้ในครัวเรือน ไทโรคมนาคุม เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชุบโลหะมีวัตถุประสงค์หลัก คือ

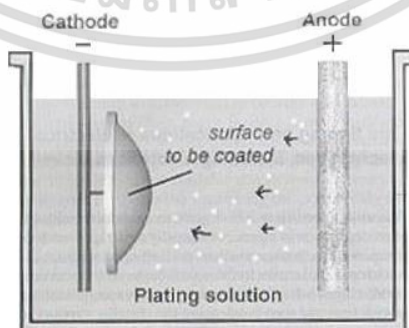
- 1) เพื่อตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้เกิดความสวยงาม แวววาว (Decorating)
- 2) เพื่อป้องกันการผุกร่อน (Anti - corrosion) และยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์ และเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ ได้แก่
  - การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)
  - การสะท้อนแสง (Reflectivity and appearance) เช่น การเป็นประกาย (Brightness) สี (Color) เป็นต้น
  - ทนทานต่อแรงบิด (Torque tolerance)
  - ช่วยในงานเชื่อมประสานโลหะ (Solder ability)
  - ทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance)
  - ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้ออย่างพารา (Ability to bond to rubber) เช่น ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เป็นต้น
  - เพิ่มความแข็ง (Hardness)

### 2.2.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายเกลือของโลหะ (Metallic salts) แล้วทำให้อิออนบวกวิ่งมารับประจุไฟฟ้าลบที่ขั้วงาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) จึงทำให้เกิดเป็นชั้นผิวบางของโลหะมาเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของชิ้นงานการชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม (Cu-Ni-Cr Plating) จัดอยู่ในประเภทการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

### 2.2.3 การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating)

กระบวนการจับตัวของโลหะที่ผิวหน้าวัสดุที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น การชุบทองแดง และนิกเกิล แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit boards, PCB)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการชุบโลหะโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ <https://www.scimath.org/lesson-chemistry> ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การชุบโลหะแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและไฟฟ้าเคมี

กระบวนการชุบโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยอาจมีการใช้กระแสไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ เพื่อทำให้เกิดชั้นป้องกันผิว (Protective coating) และ/หรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม (Decorative coating) ตัวอย่างเช่น

- Chromating คือ การชุบโลหะด้วยโครเมียม
- Phosphating คือ การเตรียมพื้นผิวหน้า โดยการรองพื้นด้วยฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะทำก่อนการทาสี หรือพ่นสี
- Anodizing คือ การจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายเกลือโลหะ หรือสารละลายกรด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน
- Passivating คือ กระบวนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรด เช่น กรดดินประสิว (Nitric acid) หรือสารละลายของกรดดินประสิวกับเกลือโซเดียมไดโครเมต (Sodium dichromate) ใช้สำหรับการป้องกันการผุกร่อน (Corrosion) และช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

### 2.2.5 การชุบโลหะแบบอื่น ๆ

การชุบโลหะแบบอื่น ๆ (Other surface finishing technologies) คือ กระบวนการชุบโลหะที่ไม่จัดอยู่ใน 3 กลุ่มข้างต้น ได้แก่

- 1) การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน Hot dipped galvanizing คือ กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เพื่อเคลือบผิวเหล็ก หรือเหล็กกล้า
- 2) Surface hardening คือ กระบวนการทางด้านวัสดุโลหะ ที่ทำให้ผิวด้านนอกของวัสดุมีความแข็งมากกว่าเนื้อวัสดุที่อยู่ภายใน เป็นวิธีการปรับปรุงผิวโลหะให้มีความแข็ง (Hardness) เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้มีความทนทาน (Durable) และสามารถต้านทานการสึกกร่อน (Wear-resistance) ได้ดี เช่น
  - Carburizing คือ การปรับปรุงสภาพผิวของเหล็กกล้าประเภทคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) อบกับสารที่มีปริมาณคาร์บอนสูง โดยคาร์บอนจะแพร่กระจายเข้าไปในผิวเนื้อเหล็กที่อุณหภูมิสูง 845-955 องศาเซลเซียส เกิดเป็นชั้นผิวแข็งหุ้มที่เปลือกนอกของชิ้นโลหะ และมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นประมาณ 0.85 % สารคาร์บอนที่นำมาอบที่เป็นของแข็งได้แก่ ถ่านไม้ หรือถ่านโค้ก ผสมกับแบเรียมคาร์บอเนต สารที่เป็นก๊าซ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนโมนอกไซด์ มีเทน เป็นต้น
  - Nitriding คือ การปรับปรุงสภาพผิวโลหะภายใต้บรรยากาศของก๊าซแอมโมเนีย เกิดการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะและเกิดสารประกอบไนไตรด์ที่ผิวนอก ทำให้ผิวชิ้นงานมีลักษณะแข็งมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นผู้ที่มีเหตุอันสมควรและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การชุบโลหะอื่น ๆ เช่น Cladding, Vapor deposition, Vacuum coating เป็นต้น

- Cladding เป็นการปรับปรุงผิวโลหะเพื่อป้องกันสนิมด้วยการปกคลุมเนื้อโลหะด้วยโลหะอีกชนิดหนึ่ง และยึดติดกันด้วยแรงกล เช่น การอัดบีบ (Pressing) การรีดดึง (Extruding) ภายใต้ความดันสูง ตัวอย่างได้แก่ การผลิตเหรียญกษาปณ์ แผงอลูมิเนียมระดับอาคาร เป็นต้น
- Vapor deposition คือการทำให้สารละลายไอ หรือ มีสถานะเป็นก๊าซ แล้วเกิดการกลั่นตัว หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิววัตถุ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติทางกล ไฟฟ้า ความร้อน สะท้อนแสง ป้องกันสนิมและต้านทานการสึกกร่อน
- Vacuum coating คือการเคลือบผิววัตถุ ในสภาพสุญญากาศ หรือมีความกดอากาศน้อย ทำให้ผิวเคลือบมีความบริสุทธิ์และไม่มีสารเจือปน เนื่องจากไม่มีก๊าซชนิดอื่นปะปนส่วนมากใช้ในอุตสาหกรรมผลิต เวเฟอร์ ฟิล์มโลหะหรือฟิล์มนำไฟฟ้า และฟิล์มนำไฟฟ้าชนิดโปร่งใส เช่น แผงป้องกันฝ้าที่กระจก ฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตที่จอภาพ เป็นต้น

## 2.3 การดูดซับ (กมลรัตน์, 2564)

### 2.3.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) คือ กระบวนการดูดซับสารละลายหรือ สารแขวนลอย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารจากการดูดติดหรือผสมในโมเลกุลสารที่ต้องการระหว่างสถานะในวัฏภาคของไหล ได้แก่ แก๊ส (Gas) ของเหลว (Liquid) และของแข็ง (Solid) โดยสารละลายที่ต้องการแยก เรียกว่า ตัวถูกดูดซับหรือสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวภายในซึ่งทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับหรือสารดูดซับ (Adsorbent) การดูดติดของโมเลกุลสารถูกดูดซับ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณโพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของสารดูดซับที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

### 2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

ประเภทของการดูดซับ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งอาศัยแรงดึงดูดไฟฟ้า เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) และการดูดซับทางเคมี อาศัยแรงดึงดูด ระหว่างพันธะของโมเลกุล

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่อาศัยแรง ดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน ๆ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งจัดเป็นเอกสารนี้แรงดึงดูดที่อ่อนทำให้การดูดซับมีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ การกำจัดตัวถูกดูดซับออกไม่ว่าการจกผิวตัวดูดซับได้ง่าย สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้และการดูดซับเกิดย้อนกลับได้

หลายชั้น (Multilayer) โดยจำนวนชั้นที่ซ้อนทับเป็นส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ถูกดูดซับ โดยจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

(2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่อาศัย การสร้างพันธะระหว่างตัวถูกละลายกับพื้นผิวของตัวดูดซับ และแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ โดยพันธะเคมีเป็นพันธะที่ แข็งแรงทำให้มีความร้อนของการดูดซับสูง การกำจัดตัวถูกละลายออกจาก พื้นผิวจึงทำได้ยากและการดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (นิพนธ์, 2550)

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของ ตัวถูกละลายเคลื่อน ที่เข้าไปเกาะผิวหน้าของตัวดูดซับ

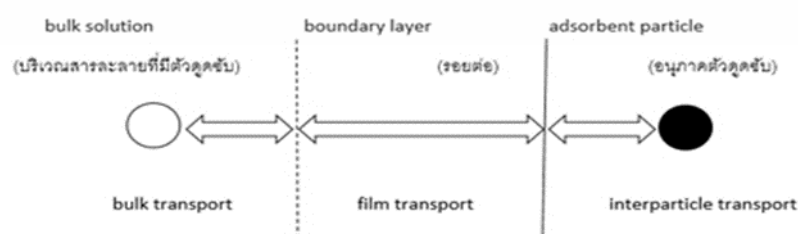
ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับ แพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างรวดเร็ว โดยเกิดจากโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของตัวดูดซับ

### 2.3.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลาย

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับ หากอัตรา การดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วยิ่งขึ้น ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย (รูปที่ 2.3) ดังนี้

- (1) การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูก ส่งไปยังผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด
- (2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลบนผิวหน้าของชั้น ของเหลวแพร่ผ่านฟิล์มน้ำและแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับจัดเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ
- (3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดการดูดซับ ขึ้นภายในของตัวดูดซับ เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา: (นิพนธ์, 2550) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### ปัจจัยทางกายภาพ

- (1) อัตราเร็วในการดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (สันทัด, 2549; Faust and Aly, 1987)
- (2) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดของสารดูดซับเป็นส่วนที่ผกผันกับ อัตราเร็วของการดูดซับคือ ตัวดูดซับขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการถูกดูดซับสูง พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งพื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น ดังนั้นหากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและมีรูพรุนมากความสามารถในการดูดซับจะมี ประสิทธิภาพมากขึ้น (Ginosar. *et al.* 2011)
- (3) อุณหภูมิ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้สมดุลของการดูดซับเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ทำให้เมื่ออุณหภูมิมียุคสูงขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น (อัญรินทร์, 2559)
- (4) เวลาที่ได้รับสัมผัส เวลาที่สัมผัสในกระบวนการดูดซับเป็นพารามิเตอร์สำคัญ อย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ หากใช้เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งานของการดูดซับแบบต่อเนื่อง (มันสิน, 2538)

#### ปัจจัยทางเคมี

- (1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ถ้าความเข้มข้นของกรดลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมากขึ้น เพราะเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นและมีความสามารถในการเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดีทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างมี ประจุเล็กน้อยจึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (Non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ตัวอย่างเช่น การดูดซับ 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-DCP) ด้วยตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ความสามารถในการดูดซับของสารประกอบคลอโรฟีนอลจากตะกอนขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย โดยการดูดซับ 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-DCP) เพิ่มขึ้นเมื่อ pH ลดลง (Ruiying and Jianlong, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงในคลังทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) ความมีขี้ของโมเลกุล ความมีขี้ของโมเลกุลมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ของสาร หากความมีขี้สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง คือสารที่ละลายน้ำได้หรือแตก ตัวได้มีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้ดีจึงเกิดการดูดซับได้น้อย ส่วนสารที่ไม่มีความสามารถในการละลาย หรือมีความสามารถในการละลายได้น้อย สามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่า (อัญรินทร์, 2559)

## 2.4 การบำบัดน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ จนกลายเป็นน้ำที่น้ำรังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์อีกต่อไป เช่น น้ำเสียจากการชำระล้างร่างกาย น้ำเสียจากห้องน้ำห้องส้วม น้ำเสียที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆภายในโรงพยาบาล เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment) หมายถึง การปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียให้ดีขึ้น ทำให้หมดอันตรายหรืออันตรายน้อยลง โดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งเป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

### 2.4.1 การบำบัดขั้นเตรียมการและขั้นต้น (Preliminary treatment / Primary treatment)

ส่วนใหญ่เป็นการบำบัดเพื่อแยกทราย กรวด และของแข็งหรือเศษวัตถุ ที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย เป็นการลดปริมาณของแข็งและน้ำมันหรือ ไขมันที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียขั้นนี้สามารถกำจัดของแข็ง แขนวลอยได้ร้อยละ 50-70 และกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีได้ ร้อยละ 25-40

### 2.4.2 การกำจัดด้วยตะแกรงหยาบ (Screening)

เป็นการกำจัดเศษวัตถุ ของแข็งขนาดใหญ่โดยใช้ตะแกรง โดยทั่วไปตะแกรงที่ใช้มี 2 ประเภท คือ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด การใช้ตะแกรงชนิดใดขึ้นกับขนาดวัตถุ ที่ต้องการกรองออกจากน้ำเสีย แต่ต้องพิจารณาการทำความสะอาด ตะแกรงบ่อยครั้ง หากมีการอุดตันของตะแกรงเนื่องจากเลือกตะแกรงที่มีร่องละเอียดเกินไป โดยต้องคำนึงถึงวัสดุที่ใช้ทำตะแกรง ถ้าน้ำเสียมีความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างสูง ควรเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น โลหะ สแตนเลส เป็นต้น

### 2.4.3 บ่อตกกรวดทราย (Grit chamber)

เป็นการกำจัดพวกกรวดทราย โดยการแยกให้ตกตะกอนในรางตกกรวดทราย ในระบบบำบัดน้ำเสีย บางแห่งอาจเพิ่มการหมุนเวียนของน้ำเสียในบ่อนี้เพื่อให้เศษวัสดุที่เป็นของแข็ง ตกตะกอนแยก

เอกสารนี้แจกเศษวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ถังตกตะกอนเบื้องต้น (Primary sedimentation tank)

คือถัง ตกตะกอนที่ทำหน้าที่แยกตะกอนต่างๆ ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะไหลไปลง ถังบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีววิทยา กระบวนการนี้จะเป็นการเพิ่มเวลาให้เศษวัสดุขนาดเล็กตกตะกอนลงก้นบ่อมากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้พื้นที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับก่อสร้างบ่อตกตะกอนเบื้องต้น

#### 2.4.5 บ่อดักไขมันและน้ำมัน (Oil and grease removal)

น้ำมันและไขมันจะพบมากในน้ำทิ้งจากบ้านเรือน ร้านอาหาร สถานีจำหน่ายน้ำมัน และโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่มีไขมัน การกำจัดน้ำมันและไขมันมีอยู่ด้วยกัน หลายวิธี เช่น การเติมคลอรีนร่วมกับการเป่าอากาศ การทำให้ลอย (Flotation) แล้วเก็บกวาดออกจากผิวน้ำ การเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อช่วยลดค่าความตึงผิวของน้ำมันหรือไขมันทำให้ลอยขึ้นมาได้มาก เป็นต้น ขั้นตอนนี้จะช่วยลดปริมาณความสกปรกที่เกิดจากน้ำมันและไขมันลงได้มาก ทั้งยังช่วยเพิ่มการละลายของออกซิเจนลงในน้ำเสียในขั้นตอนการเติมอากาศ ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไปด้วย

#### 2.4.6 การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment)

เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยการกำจัดสารอินทรีย์และสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งการบำบัดน้ำเสียในขั้นนี้เป็นกระบวนการทางชีวภาพ สามารถกำจัดสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีลงได้ประมาณร้อยละ 75 - 95 ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ หากเป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดใหญ่ นิยมใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพที่ใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนในการบำบัด เนื่องจากใช้เวลาและค่าใช้จ่ายบำบัดน้อยกว่า กระบวนการบำบัดโดยใช้สารเคมี น้ำทิ้งที่บำบัดแล้วมีความสกปรกน้อย และประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าระบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายในการเติมออกซิเจนลงในน้ำเสีย และเกิดตะกอนจุลินทรีย์มากในระบบบำบัดที่ต้องเพิ่มขั้นตอนการกำจัด อย่างไรก็ตาม ในบางชนิดของ ระบบบำบัดแบบใช้จุลินทรีย์ประเภทใช้ออกซิเจน เช่น ระบบบ่อผึ่ง (Stabilization pond หรือ SP) ซึ่งใช้พื้นที่ก่อสร้างมาก บ่อจะปล่อยให้ ออกซิเจนในอากาศละลายในน้ำเสียได้โดยธรรมชาติจึงไม่จำเป็นต้องติดตั้ง เครื่องจักรกลในการเติมอากาศให้แก่ น้ำเสีย แต่สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กับบ้านเรือนที่อยู่อาศัยเฉพาะ แต่ละหลังนิยมใช้กระบวนการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ ทั้งแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic microorganism) และแบบกึ่งใช้ออกซิเจน (Facultative microorganism) ซึ่งมีอยู่ในน้ำเสียอยู่แล้ว ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียของบ้านเรือนทั่วไปจึงมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.7 การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment)

เป็นการบำบัดเพื่อนำสารเคมี สาหร่าย ไช้พยาธิ ตัวอ่อนสัตว์พาหะ นำโรคออกจากน้ำเสียก่อนระบายสู่สิ่งแวดล้อม การบำบัดขั้นที่ 3 นี้มีหลาย กระบวนการให้เลือกซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการกำจัดสิ่งสกปรกชนิดใดออกจากน้ำ ก่อนระบายทิ้ง ซึ่งกระบวนการที่นิยมใช้เหล่านี้ เช่น การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ด้วยการเติมคลอรีนหรือใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือการใช้โอโซนเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ไช้พยาธิ ตัวอ่อนของสัตว์พาหะ และการใช้สารเคมีตกตะกอนเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสที่จะทำให้เกิดยูโทรฟิเคชัน หรือ ภาวะสาหร่ายบานสะพรั่งในแหล่งน้ำ เป็นต้น

#### 2.4.8 การบำบัดขั้นสูง (Advance treatment)

ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ยังไม่พบกระบวนการบำบัดนี้ เนื่องจากการบำบัดขั้นสูงเป็นกระบวนการกำจัดสารอาหาร ที่ยังคงเหลือค้างอยู่ในน้ำทิ้ง เช่น ไนโตรเจน ไนโตรเจน ฟอสเฟต สีสสาร แขนวนลอยที่ตกตะกอนยากและอื่นๆ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเติบโตผิดปกติของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำเน่า แก๊สปัญหาความน่ารังเกียจของแหล่งน้ำอันเนื่องจากสี และ แก๊สปัญหาอื่นๆ ซึ่งยังไม่ได้ถูกกำจัดโดยกระบวนการบำบัดขั้นที่สอง ทั้งนี้กระบวนการนี้จะใช้เมื่อต้องการน้ำทิ้งที่มีคุณภาพสูง โดยส่วนใหญ่จะใช้เมื่อ ต้องระบายน้ำทิ้งลงแหล่งน้ำที่มีความสำคัญ หรือต้องการนำน้ำทิ้งกลับมา ใช้ประโยชน์ซ้ำอีก (Reuse and reclamation) ในปัจจุบันขั้นตอนนี้ได้มีการพัฒนานำมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ไม่เพียงเฉพาะใช้บำบัดน้ำเสียเท่านั้น แต่เป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ เพื่อนำไปอุปโภคบริโภคก่อน แล้วจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียขั้นสูงในที่สุด กระบวนการที่นิยมใช้ในการบำบัดขั้นนี้ เช่น การกรองด้วยวิธีการต่างๆ (ระบบกรองย้อนกลับ หรือ Reverse osmosis การใช้เยื่อกรอง หรือ Membrane filtration) และการกรองสารละลายน้ำ (Demineralization) เป็นต้น โดยกระบวนการเหล่านี้จัดให้มีเพิ่มเติมเพื่อ

- การกำจัดสารประกอบพื้นฐานของฟอสฟอรัส เช่น ออโรฟอสเฟต ซึ่งมีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ
- การกำจัดสารประกอบพื้นฐานของไนโตรเจน เช่น ไนเตรต ซึ่งมีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและแบบใช้กระบวนการทางชีวภาพ โดยวิธีการทางชีวภาพมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจน ให้เป็นไนเตรตที่เกิดขึ้นในสภาวะแบบใช้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า "กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)" และขั้นตอนการเปลี่ยนไนเตรต ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า "กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)"
- การกรอง (Filtration) เป็นการกำจัดสารที่ไม่ต้องการโดยวิธีการ ทางกายภาพ ได้แก่

สารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเอกชนแห่งนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสีย โดยการดูดติดบนพื้นผิวของของแข็ง รวมถึงการกำจัดกลิ่นหรือก๊าซที่เกิดขึ้นด้วย
- การฆ่าเชื้อโรค น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียต้องได้รับการบำบัด ขั้นสุดท้ายโดยการฆ่าเชื้อโรคก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อฆ่าเชื้อโรค บางตัวที่เป็นสาเหตุให้เกิดโรคกับสิ่งมีชีวิตในน้ำและต่อมนุษย์โดยใช้สารเคมี เช่น ปูนคลอรีน ก๊าซโอโซน และสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการฆ่าเชื้อที่นิยมใช้คือบ่มและถังสัมผัสคลอรีน

#### 2.4.9 การบำบัดกากตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge treatment)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการทางชีวภาพจะมีกากตะกอนจุลินทรีย์ หรือสลัดจ์เป็นผลผลิตตามมาด้วยเสมอ ซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ในการกินหรือย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องกำจัดสลัดจ์เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเน่าเหม็น การเพิ่มภาวะมลพิษและเป็นการทำลายเชื้อโรคด้วย นอกจากนี้การลดปริมาณของสลัดจ์โดยการกำจัดน้ำออกจากสลัดจ์ ช่วยให้เกิดความสะดวกในการเก็บขนไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ การกำจัดสลัดจ์ประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ ดังนี้

**การทำชั้น (Thickener)** โดยใช้ถังทำชั้นซึ่งมีทั้งที่ใช้กลไกการตกตะกอน (Sedimentation) และใช้กลไกการลอยตัว (Flotation) ทำหน้าที่ในการลดปริมาณสลัดจ์ก่อนส่งไปบำบัดโดยวิธีการอื่นต่อไป

**การทำให้สลัดจ์คงตัวหรือการลดปริมาณเนื้อสลัดจ์ (Stabilization หรือ Digestion)** โดยการย่อยสลัดจ์ด้วยกระบวนการใช้อากาศ หรือใช้กระบวนการไร้อากาศเพื่อให้จุลินทรีย์ในสลัดจ์ย่อยสลายกันเอง ทำให้ปริมาณสลัดจ์คงตัวไม่เพิ่มปริมาณมากขึ้นและสามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่เกิดการเน่าเหม็นรุนแรง

**การปรับสภาพสลัดจ์ (Conditioning)** ทำให้สลัดจ์มีความเหมาะสม กับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ทำปุ๋ย การใช้ปรับสภาพดินสำหรับใช้ทางการเกษตร เป็นต้น

**การรีดน้ำ (Dewatering)** เพื่อลดปริมาณสลัดจ์ที่จะนำไปทิ้งโดยการ ฝึกลง การเผา หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น โดยสลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ จะมีลักษณะเป็นก้อน (Cake) คล้ายก้อนตะกอนดินทั่วไป ทำให้เกิดความสะดวกในการขนส่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีดน้ำ ได้แก่ เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) เครื่องอัดกรอง (Filter press) หรือเครื่องกรองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) และลานตากสลัดจ์ (Sludge drying bed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

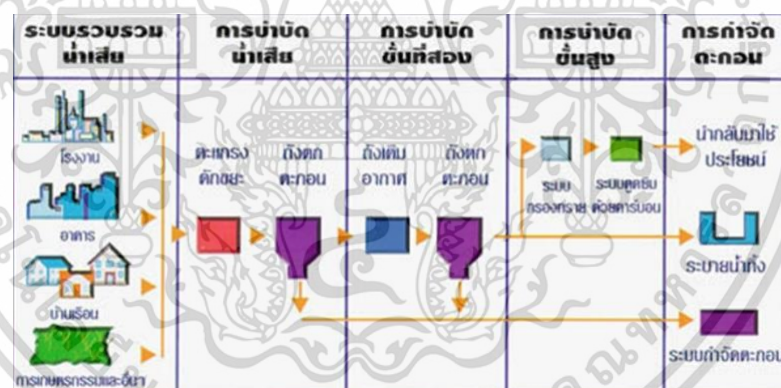
#### 2.4.10 การกำจัดตะกอน

สลัดจ์ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจะได้รับการบำบัดให้มีความคงตัว ไม่มีกลิ่นเหม็น และมีปริมาตรลดลง เพื่อความสะดวกในการขนส่ง ในขั้นต่อมาก็คือ การนำสลัดจ์เหล่านั้นไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการที่เหมาะสม ดังนี้

**การฝังกลบ (Landfill)** เป็นการนำสลัดจ์มาฝังในที่ที่เตรียมไว้ และกลบด้วยชั้นดินทับหน้าอีกชั้นหนึ่ง

**การหมักทำปุ๋ย (Composting)** เป็นการนำสลัดจ์มาหมักต่อ เพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย ซึ่งเป็นการนำสลัดจ์กลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืช เนื่องจากในสลัดจ์ประกอบด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแร่ธาตุต่างๆ

**การเผา (Incineration)** เป็นการนำสลัดจ์ที่จวนแห้ง (ความชื้นประมาณร้อยละ 40) มาเผา เพราะไม่สามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยหรือฝังกลบได้ การเผาที่เหมาะสมที่จะใช้กับสลัดจ์ที่มาจากตะกอนจุลินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียจากสถานพยาบาลหรือโรงพยาบาลที่ต้องการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกิจกรรมประเภทต่างๆ

(สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กันยายน 2560)

## 2.5 เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero Valent iron) (นิรามัย, 2557)

### 2.5.1 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

เหล็ก (Iron) โดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0 +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์หรือเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็ก หรือเหล็กบริสุทธิ์

เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้น

เอกสารนี้ได้แก่ เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เหล็กอ่อน (Wrought iron) คือเหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddle furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่มีเนื้อเหล็กถึง 99.99% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กจะตี ขึ้นรูปได้ง่ายมากจึงเป็นที่นิยมของช่างตีเหล็ก
- เหล็กกล้า (Steel) คือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม โดยมีคาร์บอน ผสมอยู่ต่ำกว่า 1.7 หรือ 2% นอกจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย แต่จะอยู่ในลักษณะเป็นธาตุเจือปน (Impurities) เช่น ซิลิกอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส
- เหล็กหล่อ (Cast iron) คือเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 2% ขึ้นไป ใช้ ประโยชน์ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุประกอบชิ้นส่วน
- เหล็กดิบ (Pig iron) คือเหล็กที่นำมาจากกระบวนการขุดสินแร่ดิบโดยกรรมวิธีการ ทำเหมืองแร่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากมีสิ่งอื่นเจือปนอยู่โดยเฉพาะออกซิเจนซึ่งมี อยู่เป็นจำนวนมากในสินแร่เหล็ก ออกซิเจนเหล่านี้ จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ( $Fe^0$ ) เป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรด เจือจางเมื่อไม่มีอากาศ ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) พร้อมกับสารที่เกิดจากการรีดิวซ์กรดคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ )

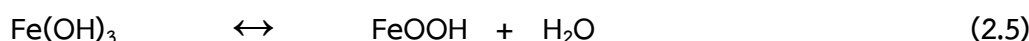
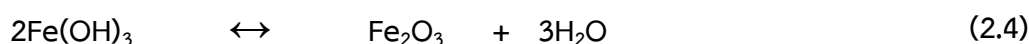
เฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_2$ ) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility constant) ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จะละลายน้ำได้น้อยจึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้ อย่างรวดเร็ว และเคลือบอยู่บนผิวโลหะอย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว ตามสมการที่ 2.3 ดังนี้



เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออกดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนิมเหล็กที่เห็นโดยทั่วไปคือ  $Fe_2O_3$  จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (Anodic region) ไอออนอื่นๆ ก็จะมาตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมมาวิเคราะห์ดูก็มักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษหิน ดิน ทราายปะปนอยู่ด้วยเสมอ (วุฒิชัย, 2545; วรรณวิภา, 2547; ศุภชาติ, 2548; อุทัย, 2548) ส่วน  $FeOOH$  จะมีลักษณะเป็นตะกอนผลึก สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางผลึก

## 2.5.2 การกัดกร่อนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

โลหะสถานะออกซิเดชันศูนย์มีแนวโน้มที่จะกลับไปสู่สถานะทางอุณหพลศาสตร์ที่เสถียร (Thermodynamically stable form) เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ ( $Fe^0$ ) จะถูกออกซิไดซ์ เป็นเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ในบรรยากาศของโลกที่มีออกซิเจนมาก เมื่อโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำเกลือ จะสามารถเกิดการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอน (Electron:  $e^-$ ) ถูกปลดปล่อยออกมาจากขั้วบวก (Anodic region) ได้ไอออนบวกของโลหะ (Metal cation) และอิเล็กตรอนจะถูกนำไปอีกบริเวณหนึ่งของผิวโลหะคือบริเวณขั้วลบ (Cathodic region) ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการหลีกเลี่ยงการสะสมของประจุไฟฟ้า เนื่องจากการกัดกร่อนของโลหะโดยกระบวนการกัดกร่อนไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โลหะกลับคืนไปสู่สถานะเดิมของมัน เช่น เหล็กเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมเหล็กออกไซด์ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของแร่เหล็ก เป็นต้น การกัดกร่อนโลหะจึงสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและพร้อมที่จะเกิดขึ้นทุกขณะเท่าที่มีสถานะที่เหมาะสมสาเหตุการกัดกร่อนโลหะ ได้แก่ น้ำมีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด ไม่ว่าจะมียูออกซิเจนละลายหรือไม่ก็ตาม น้ำมียูออกซิเจนละลายและค่าพีเอชสูงกว่า 7 โลหะต่างชนิดต่อกันเป็นวงจรเซลล์ไฟฟ้า โลหะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือเนื้อโลหะไม่สม่ำเสมอ ผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายที่มีไอออนเข้มข้นไม่สม่ำเสมอกัน ผิวโลหะมีรอยร้าวหรือขรุขระเฉพาะแห่ง และโลหะที่ได้รับความกดดัน เช่น โลหะที่ถูกทำให้ยืด เป็นต้น (วุฒิชัย, 2545)

การกัดกร่อน (Corrosion) ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เป็นการผุกร่อนหรือการสลายตัว ตามกลไกของธรรมชาติ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation – Reduction reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนคือมีเลขออกซิเดชันลดลงจะ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน และตัวทำปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่าตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นพร้อมกัน และปริมาณอิเล็กตรอนของตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์จะมีจำนวนเท่ากัน ในสมการที่ดุลแล้ว เลขออกซิเดชันที่เพิ่มจะเท่ากับเลขออกซิเดชันที่ลด สารตัวใดจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังนึ่งของ... มีอยู่ภายใต้การนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานครึ่งเซลล์ (Standard reduction potential) ใช้สัญลักษณ์  $E^0$  red หรือ  $E^0$  ซึ่งคือความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาในแต่ละครึ่งเซลล์ โดยครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายบวก และครึ่งเซลล์ที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายลบ (ศุทธวดี, 2548) ดังนั้น ปฏิกิริยารีดอกซ์ ต้องประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน คือมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron transfer) ระหว่างตัวให้และตัวรับ โดยที่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และมีสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เป็นตัวรับ อิเล็กตรอน (Electron acceptor)

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนประกอบด้วยครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชัน โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของเหล็กจะเกิดขึ้นที่บริเวณขั้วบวก (Anode) โลหะเหล็กจะสลายตัวกลายเป็นเหล็กเฟอรัส ( $Fe^{2+}$ ) และให้อิเล็กตรอนส่วนปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) คือกลไกของการรับอิเล็กตรอน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) และสามารถเกิดขึ้นได้หลายลักษณะขึ้นกับตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้การกัดกร่อนของเหล็กสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.6 (Zhang, *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2011)



จากค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของเหล็ก เท่ากับ  $-0.44$  โวลต์ แสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันนั้น  $Fe^0$  จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ และ  $Fe^{2+}$  จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะมีสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) และตัวถูกรีดิวซ์ (Reduced) ตามลำดับ เนื่องจากความไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ของโลหะ ทำให้สามารถขับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้ โดยปราศจากการใช้พลังงานจากภายนอก หากมีคู่ทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

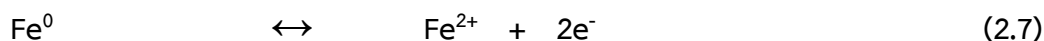
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในการกำจัดสารปนเปื้อนสามารถเกิดได้ 3 รูปแบบ (ศิริพรรณ, 2542; วุฒิชัย, 2545) ดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเหล็ก คือเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของเหล็ก
2. การเกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยตัวกลางอื่น ได้แก่ เฟอรัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กและจะละลายอยู่ในน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ แต่ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้าๆ
3. การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรเจน( $H_2$ ) จากการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับน้ำ แต่ปฏิกิริยาที่จะทำให้ไฮโดรเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้ ต้องอยู่ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น พื้นผิวของเหล็กเกิดการผุกร่อนหรือมีโลหะอื่นอยู่ในกระบวนการ ซึ่งจะช่วยให้ไฮโดรเจนเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ )

ตัวอย่างกลไกการเกิดการกัดกร่อน สามารถอธิบายโดยใช้เซลล์กักกร่อนไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion cell) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ วงจรภายในคือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และวงจรภายนอกคือโลหะที่เป็นขั้วบวกและโลหะที่เป็นขั้วลบ วงจรภายนอกจะถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ )

ได้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ดังสมการที่ 2.7 ถึง 2.9 ตามลำดับ หรือเมื่อมีออกซิเจนและไฮโดรเจน ไอออน จะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ตัวอย่างของเซลล์กักตกร่อนไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กเป็น ขั้วบวก จะเกิดตามสมการที่ 2.10 ถึง 2.12 ดังต่อไปนี้ (วุฒิชัย, 2545)

กรณีที่ไม่มีออกซิเจน



กรณีที่มีออกซิเจน



### 2.5.3 จลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับเวลา เรียกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction) และการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือจลนพลศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) เป็นการอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสารในขณะที่เกิดปฏิกิริยาและผลของการเปลี่ยนแปลงที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ทราบถึงลำดับขั้นของปฏิกิริยา เรียกว่า กลไกปฏิกิริยา (Reaction mechanism) ในการศึกษาผลจากความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นการศึกษาถึงกฎอัตราและลำดับของปฏิกิริยา (Sawyer. *et al.*, 2003)

กฎอัตรา (Rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.13

$$\text{อัตรา (r)} = k[A]^n [B]^m \quad (2.13)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา ณ อุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้น ค่า  $k$  จะเปลี่ยนเมื่อมีการแปลงอุณหภูมิ

$[A]$  และ  $[B]$  เป็นความเข้มข้น ( $M/L^3$ ) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

$n$  และ  $m$  เป็นเลขยกกำลัง ตามที่สารเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งมีค่า = 0, 1/2, 1, 2, 3, ...

ลำดับของปฏิกิริยา (Order of reaction) คือ ผลรวมของกำลังของสารที่ปรากฏในกฎอัตรา เช่น เมื่อผลรวมของ  $n$  และ  $m$  มีค่าเท่ากับศูนย์ จะเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับศูนย์ เท่ากับหนึ่ง เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และเท่ากับสองเรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาถึงจลนพลศาสตร์เคมีของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ เพื่อให้ทราบถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารปนเปื้อน จากงานวิจัยส่วนใหญ่ลำดับปฏิกิริยาของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเท่า (Pseudo-first-order kinetics) (Helland. *et al.*, 1995; Komnitsas. *et al.*, 2007)

## 2.5.4 การดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

### การดูดซับ

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของ มันปรากฏการณ์เช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิว ของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เป็นสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่ เกาะจับของ Adsorbate คือสารดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวโดยทั่วไปมี 3 รูปแบบ (Sawyer *et al.*, 2003; วุฒิชัย, 2545) ได้แก่ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงกระทำอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุล คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) การดูดติดผิวของโมเลกุลจะไม่ยึดติดในจุดใดจุดหนึ่งบนผิว แต่จะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปบนพื้นผิว ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวจะมีความเข้มข้นมากขึ้นและเกิดเป็นชั้นทับกันหลาย ๆ ชั้นที่ผิวของสารดูดติดผิว อย่างไรก็ตาม การดูดติดผิวทางกายภาพ โดยทั่วไปสามารถเกิดการย้อนกลับได้ นั่นคือโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวสามารถหลุดกลับไปอยู่ในสถานะเดิมก่อนการดูดติดผิวได้โดยง่าย การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นผลมาจากแรงกระทำอย่างแข็งแรงกว่าการดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งสามารถเปรียบได้กับแรงกระทำที่ทำให้เกิดสารประกอบทางเคมีปกติโมเลกุลที่ถูกดูดติดจะก่อกำกับบนผิวซึ่งหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล และ โมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวได้ เมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลหนึ่งชั้น กำลังของสารดูดติดผิวก็จะหมดลง การดูดติดผิวทางเคมีสามารถฟื้นอำนาจกลับได้น้อย โดยทั่วไปจะต้องให้ความร้อนแก่สารดูดติดผิวให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะใช้กำจัดโมเลกุลของสารปนเปื้อน การดูดติดผิวแบบมีการแลกเปลี่ยน (Exchange adsorption) มักจะใช้อธิบายรูปแบบลักษณะของแรง กระทำทางไฟฟ้าระหว่างสารปนเปื้อนกับพื้นผิว การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) ก็รวมอยู่ใน กระบวนการนี้ด้วยในที่นี้ ไอออนของสารจะสะสมบนพื้นผิวโดยเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตโดยจะจับอยู่ในตำแหน่งของพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม โดยปกติไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น มีประจุสามจะถูกดูดอย่างแข็งแรงกว่าโมเลกุลที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนที่มีประจุหนึ่ง หรือโมเลกุลที่มีขนาดยิ่งเล็กก็ยิ่งมีความสามารถในการดูดติดผิวที่แข็งแรงมากขึ้น

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไป เกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของตัวดูดซับมีเพียง เล็กน้อยเท่านั้นที่เกาะติดอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้ จนถึงจุดสมดุล ซึ่ง

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ (Sawyer. *et al.*, 2003; อุทัย, 2548) ได้แก่ การกวนผสม (Mixing) ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ พิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก เพราะไม่ถูกรบกวน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การส่งผ่านโมเลกุลของตัวถูกดูดซับผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface area of adsorbent) โดยที่ขนาดจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ เป็นผลให้ความจุของการดูดซับต่างกัน หมายความว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ชนิดของสารถูกดูดซับ (Nature of adsorbate) คุณสมบัติของสารแต่ละชนิดที่ต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย โครงสร้างโมเลกุล และขนาดของสารหรือโมเลกุล จะเป็นผลให้สารแต่ละชนิดดูดซับได้ไม่เท่ากัน ซึ่งขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวดูดซับเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงหลุดเข้าไปได้ ค่าพีเอช (pH) ของสารละลาย มีผลต่อการแตกตัวของสาร การแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ โดยมีผลต่อความเป็นขั้วของผิวตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกละลาย ดังนั้นพีเอชจึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลต่างๆ อุณหภูมิ (Temperature) ของระบบ มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง และสุดท้ายระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับ (Contact time) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา คือเมื่อเวลาในการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นตาม แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งที่ความสามารถในการดูดซับคงที่ คือ ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุดจากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

### 2.5.5 ไอโซเทอมการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) เป็นจุดสมดุลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเป็นลักษณะเฉพาะของระบบซึ่งเกี่ยวกับปัจจัยของการดูดซับไม่ว่าจะเป็นสารดูดซับสารถูกดูดซับตัวทำละลาย พีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยทั่วไปมักจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และการศึกษาดังกล่าวจะใช้เส้นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ เรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งอาศัยสมการคณิตศาสตร์ใน การอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้น

(Sawyer. *et al.*, 2003; อุทัย, 2548; ปรินทร์, 2551) ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยอาศัยสมการเพื่อพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม สำหรับปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity:  $q$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 (Zhang, Liu *et al.*, 2010)

$$q = \frac{C_i - C_e}{w} \quad (2.14)$$

โดย  $q$  คือ ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg/g)

$C_i$  และ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นและที่สมดุล (mg/L) ตามลำดับ

$V$  คือ ปริมาณของสารละลาย (L)

$W$  คือ ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

กระบวนการดูดซับของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ อาศัยสมการไอโซเทอม คือเมื่อคำนวณปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับได้ จากนั้นนำค่าที่ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยพิจารณาหาสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination:  $R^2$ ) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่าจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ จะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้กันได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) (วรรณวิภา, 2547; สุทธิสา และคณะ, 2551; Miranda *et al.*, 2014) ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) (Liu. *et al.*, 2009; อุทัย, 2548) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface)

### 2.5.6 การใช้ประโยชน์

เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron: ZVI) เป็นโลหะวัตถุที่เหมาะสมสำหรับบำบัดการปนเปื้อนของน้ำในสิ่งแวดล้อมเพราะว่าเหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ (Reduce) ที่แข็งแรงและมีศักย์รีดักชัน (Reduction potential) สูงรวมถึงไม่เป็นพิษและมีราคาถูก (Gillham and O'Hannesin, 1992 อ้างอิงใน Yossapol, 1999) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาด้วย ZVI สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ZVI ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Yossapol (1999) ได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของ ZVI ในอดีตว่าได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ ZVI ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น สารประกอบฮาโลเจนเตตระลิฟาติก (Halogenated aliphatic compounds) เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride: CT) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene: PCE) เป็นต้น สารประกอบฮาโลเจนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon compounds) เช่น สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides) สารระเบิด (Explosives) เป็นต้น ไนเตรท (Nitrate) โลหะ (Metals) เช่น  $UO_2^{2+}$   $MoO_4^{2-}$   $TcO_4^-$  และ  $CrO_4^{2-}$  เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูป (Transformation) คือ การเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารที่มีความเป็นพิษน้อยลง เช่น เปลี่ยนจากคาร์บอนเตตระคลอไรด์เป็นมีเทน (Methanes) เป็นต้น แต่ถึงอย่างไร กลไกของการเกิดปฏิกิริยาก็ยังคงมีความไม่แน่นอน ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้เสนอเกี่ยวกับกลไกการย่อยสลายสารปนเปื้อนด้วย ZVI ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หรือปฏิกิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous reaction) โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) เข้าทำปฏิกิริยากับ ZVI ที่ผิวหน้าอย่างสมบูรณ์ การอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นการเกิดกลไกทางไฟฟ้าเคมี นั่นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation-Reduction reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวให้ และตัวรับ โดยที่ ZVI จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยมีสารปนเปื้อนหรือสารตัวอื่น ๆ เป็น ตัวรับอิเล็กตรอน นอกจากนี้ การลดการปนเปื้อนของน้ำยังอาศัยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือกระบวนการแยกสารที่ต้องการกำจัดออกจากสารละลายของเหลว โดยการให้สารละลายผสม ไทลล์สัมผัสกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะเกิดกลไกการทางเคมีขึ้น การนำ ZVI มาใช้บำบัดสารปนเปื้อนเริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดย Reynolds ซึ่งได้ทำวิจัยเพื่อหาวัสดุที่จะนำมาใช้บำบัดสารปนเปื้อน 10 ชนิด โดยมี ZVI เป็นหนึ่งใน วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ต่อมา ในปี ค.ศ. 1992 Gillham and O'Hannesin ได้ใช้ ZVI ในการบำบัด สารประกอบฮาโลเจนเต็ดไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon compounds) และได้มีงานวิจัยออกมาต่อเนื่อง พบว่า ZVI สามารถบำบัดสารปนเปื้อนได้ทั้งสารประกอบอินทรีย์และ สารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งที่ได้รับความสนใจและมีกระบวนการบำบัดที่ค่อนข้างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- 6) ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ )
- 7) โซเดียมโบโมไฮไดรด์ ( $NaBH_4$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 8) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba, ประเทศอังกฤษ
- 9) โซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) AR Grade บริษัท European Distribution Center
- 10) น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

### 3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี

ชั่ง  $ZnCl_2$  มา 0.2084 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เทใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับให้เป็น 1,000 ppm จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีความเข้มข้นประมาณ 1,000 ppm นำไปเจือจางและวิเคราะห์ความเข้มข้นสังกะสีด้วย AAS

### 3.3 การสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ด้วยวิธีโพรไฮไดรไรต์ (Ma *et al.*, 2020; Ahmad *et al.*, 2019)

- 1) เตรียม 1 M  $FeSO_4$  ในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 2) เติมถ่านชีวภาพ ปริมาณ 50 กรัม ลงในบีกเกอร์ข้อที่ 1 และกวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- 3) หลังจากนั้นไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพร้อมการปั่นกวน
- 4) เติม 2 M  $NaBH_4$  ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยการเติมทีละหยด ภายใต้สภาวะมีไนโตรเจน พร้อมกับปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
- 5) หยุดการเติมก๊าซไนโตรเจน ทิ้งไว้ข้ามคืนโดยปิดด้วยพาราฟิล์มไว้
- 6) นำไปกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman 0.45 ไมครอนและล้างด้วยเอทานอลเพื่อกำจัดซัลเฟต แล้วนำไปอบในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 7) ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง ข้อที่ 1) - 6)

### 3.4 การวิเคราะห์ค่า Point of zero charge ( $pH_{pzc}$ ) ของถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพแม่เหล็กโดยวิธี pH drift method (ปรับปรุงจากวิธีของ Khanal *et al.*, 2020)

- 1) เตรียม 0.01 M  $NaCl$  50 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรจำนวน 10 ใบ
- 2) ชั่งถ่าน 0.4 กรัม ใส่ลงในสารละลาย
- 3) ปรับ pH สารละลายให้เป็น 2-12 โดยเติม 0.1 M  $HCl$  หรือ 0.1 M  $NaOH$  เรียกว่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารเริ่มต้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH ด้วยเครื่อง pH จะได้ค่า pH สุดท้าย
- 5) นำค่า pH ที่บันทึกไว้ ไปใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH เริ่มต้นและ pH สุดท้าย

### 3.5 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

- 1) เติมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 2) ชั่ง MBC ลงในปริมาณที่ต้องการศึกษา
- 3) ปรับพีเอชของสารละลาย ด้วย 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ให้ได้ตามค่าที่กำหนด
- 4) เขย่าด้วยความถี่ 120 รอบ/นาที ตามระยะเวลาที่กำหนดในตารางที่ 3.1
- 5) นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่อง AAS
- 6) ทดลองทำทั้งสิ้น 2 ซ้ำ
- 7) สภาวะที่ทำการทดลองเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ทำการทดลอง

ชุดการทดลอง	สภาวะที่ทำการทดลอง	หมายเหตุ
<b>การทดลองชุดที่ 1</b> pH ของสารละลายเริ่มต้น 2, 3, 4, 5, 7, 9	ความเข้มข้นสารละลายสังกะสี 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณ MBC 3 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 180 นาที	วัดความเข้มข้นสังกะสี วัดความเข้มข้นเหล็ก
<b>การทดลองชุดที่ 2</b> ปริมาณ MBC 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 กรัม/ลิตร เวลาในการบำบัด 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที	ความเข้มข้นสารละลายสังกะสี 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการ ทดลองชุดที่ 1	วัดความเข้มข้นสังกะสี ข้อมูลใช้ศึกษาไอโซเทอมของ การดูดซับ
<b>การทดลองชุดที่ 3</b> อุณหภูมิ 30°C, 40°C, 45°C, 50°C เวลาในการบำบัด 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที	ความเข้มข้นสารละลายสังกะสี 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH เริ่มต้นที่เหมาะสมจากการ ทดลองชุดที่ 1 ปริมาณ MBC ที่เหมาะสมจาก การทดลองชุดที่ 2	วัดความเข้มข้นสังกะสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ การทดลองชุดที่ 2 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การคำนวณเพื่อศึกษาศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

Isotherm	Linear Equation
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L \cdot q_m}$ $R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}$
Freundlich	$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$
Tempkin	$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e$
Dubinin-Radushkevich	$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} \left[ RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \right]^2$ $E = \frac{1}{\sqrt{2K_{DR}}}$

$q_t$  = ปริมาณ Zn ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ณ เวลา  $t$  (mg/g)

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

$q_e$  = ปริมาณ Zn ที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

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

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

$C_0$  = ความเข้มข้นของ Zn ในสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น (mg/L)

$C_e$  = ความเข้มข้นของ Zn ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

$V$  = ปริมาตรสารละลาย (L)

$W$  = มวลของตัวดูดซับ (g)

$q_m$  = ปริมาณ Zn ที่ดูดซับสูงสุดต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ (mg/g)

$K_L$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ (L/mg)

$R_L$  = ปัจจัยการแยกแบบไร้มิติหรือพารามิเตอร์สมดุล

$K_f$  = ปัจจัยการแยกแบบไร้มิติหรือพารามิเตอร์สมดุล (L/g)

$1/n$  = ค่าที่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นการดูดซับ

$A$  = ค่าคงที่ไอโซเทอม Temkin (L/g) ที่สอดคล้องกับพลังงานการจับสูงสุด

$b_0$  = ค่าคงที่ Temkin ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)

$R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol.K)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$q_D$  = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

$K_{DR}$  = ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระเฉลี่ยของการดูดซับต่อโมลของตัวดูดซับ (mol<sup>2</sup>/kJ<sup>2</sup>)

$E$  = พลังงานดูดซับเฉลี่ย (kJ/mol) ของตัวดูดซับ

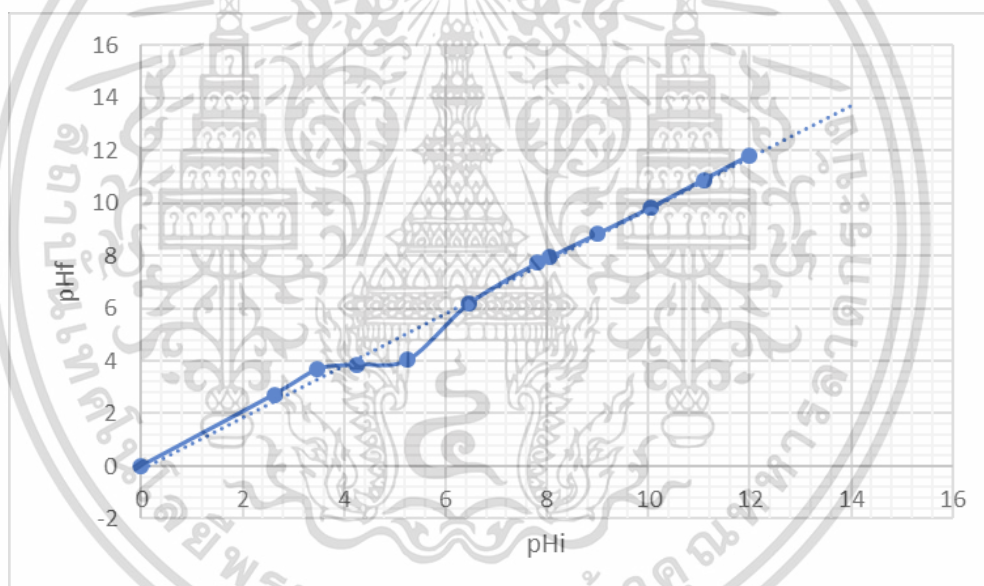
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การดูดซับซิงค์คลอไรด์ออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ มีขั้นตอนในการศึกษาคือ การวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ของถ่านชีวภาพ การหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พีเอช ปริมาณของถ่านชีวภาพ เวลาในการบำบัด และอุณหภูมิในการบำบัด โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีและนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ ผลการทดลองการศึกษาดังนี้

#### 4.1 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, $pH_{PZC}$ )



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์  $pH_{PZC}$  ของถ่านชีวภาพสถานะแม่เหล็ก

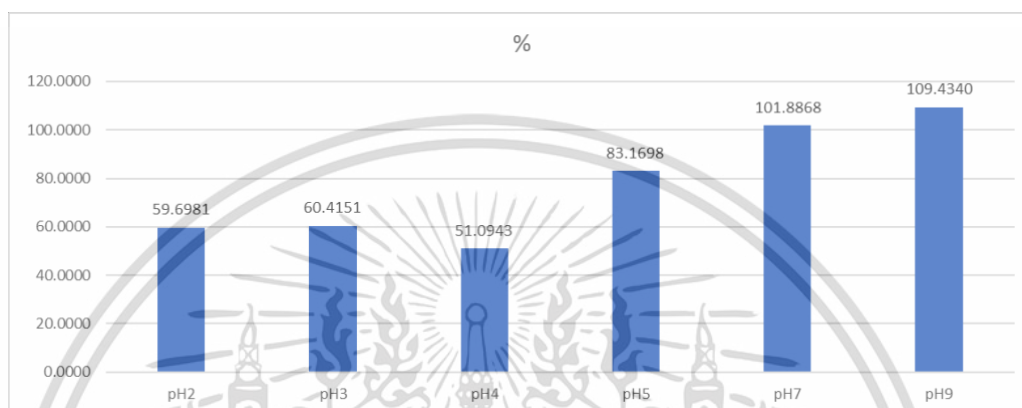
จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $pH_{เริ่มต้น}$  และ  $pH_{สุดท้าย}$  พบว่าประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับถ่านชีวภาพแม่เหล็กจะเป็นศูนย์ เมื่อสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3.85 และเมื่อตัวดูดซับนี้อยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 3.85 ประจุพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นบวกซึ่งอาจทำให้ความสามารถในการดูดซับสังกะสีลดลง และในทางตรงกันข้ามหากในสารละลายมีค่าพีเอชสูงกว่า 3.85 ประจุพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีสภาพเป็นลบ โดยอาจมีความสามารถในการดูดซับสังกะสีซึ่งมีประจุที่เป็นบวกสูงกว่าเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 3.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี

### 4.2.1 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

จากการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสังกะสี ความเข้มข้นที่ใช้คือ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กปริมาณ 3 กรัม/ลิตร โดยทำการศึกษาแปรผันค่าพีเอช 2, 3, 4, 5, 7, 9 ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการบำบัดอยู่ที่ 180 นาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.2

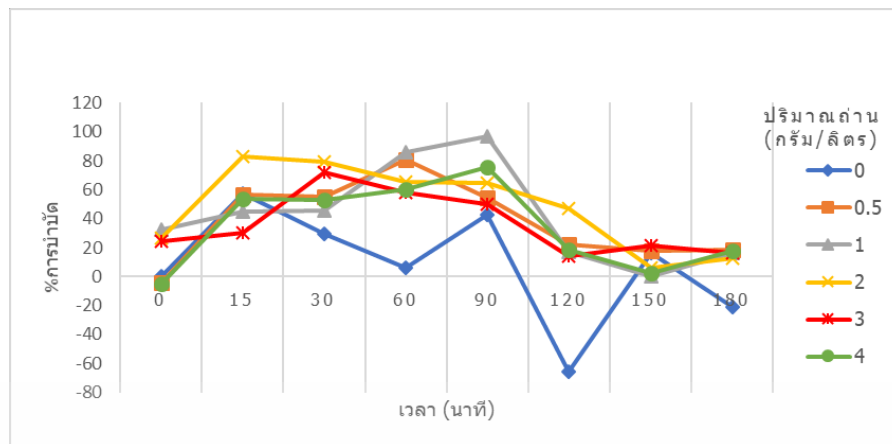


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับค่าพีเอช

จากผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี ที่ทำการปรับค่าพีเอชที่ 2, 3, 4, 5, 7 และ 9 พบว่า ถ่านแม่เหล็กชีวภาพที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับนั้นทำการดูดซับสังกะสีได้ดีในช่วงค่า pH 7 โดยมีเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดอยู่ที่ 101.89 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากพีเอชของสารละลายนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอ้างอิงจากค่า Point of zero charge ของตัวดูดซับเมื่อพีเอชของสารละลายเท่ากับ 3.85 ประจุพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเป็นศูนย์ และเมื่อตัวดูดซับมีค่าพีเอชของสารละลายมากกว่า 3.85 ประจุพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเป็นลบ ดังนั้นการเลือกใช้ค่าพีเอชของสารละลายที่ pH 7 จึงสอดคล้องกับประจุพื้นที่ผิวของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสภาพเป็นบวก ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีกว่าสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 7 และจะสังเกตว่าในช่วงค่า pH 9 จะมีเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดสูงถึง 109.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคาดว่าส่วนหนึ่งอาจไม่ได้มาจากกลไกในการดูดซับแต่เกิดจากกลไกการตกตะกอน การเลือกใช้สารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 จึงเหมาะสมที่สุดในการนำไปทำการทดลองในขั้นต่อไป

### 4.2.2 การศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กและเวลาที่เหมาะสม

ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 7 โดยการศึกษาตัวแปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสมดังนี้ ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 กรัม/ลิตร เวลาที่ใช้ในการบำบัด 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดเป็นดังรูปที่ 4.3

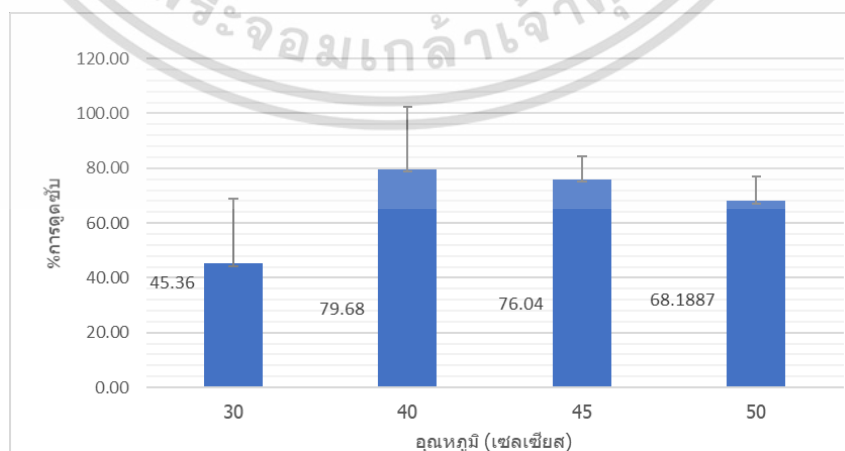


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลา และ ปริมาณ MBC

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณถ่านที่เพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดจาก 0 นาที เป็น 15 นาที เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดก็เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อดูจากกราฟ (รูปที่ 4.3) นั้นจะพบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านที่ 2 กรัม/ลิตร ระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที ประสิทธิภาพของถ่านจะเริ่มเข้าใกล้สู่สมดุลการบำบัด และเนื่องจากปริมาณรุกรุนของถ่านมีอย่างจำกัดเมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นมากกว่า 15 นาที จึงไม่สามารถดูดซับสารละลายได้เพิ่ม จึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณถ่าน 2 กรัม/ลิตร ที่เวลา 15 นาที จะอยู่ในสภาวะที่สมดุลที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

#### 4.2.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัด

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เป็นป้อนสังกะสี ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ 100 มิลลิกรัม/ลิตร pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ใช้ 2 กรัม/ลิตร เวลาในการแปรผัน 15 นาที โดยทำการศึกษาแปรผันอุณหภูมิในการบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 30, 40, 45, 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดและอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สภาวะ 30, 40, 45, 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 40 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นแต่ก็จะลดลงเล็กน้อยหลังจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากกราฟ (รูปที่ 4.4) จะพบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดสูงที่สุดและเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

### 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการดูดซับใช้ปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 กรัมต่อลิตร ค่า pH ของน้ำเสียเท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิห้อง 30 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich ผลการคำนวณแสดงดังนี้

#### 4.3.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

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

โดย  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

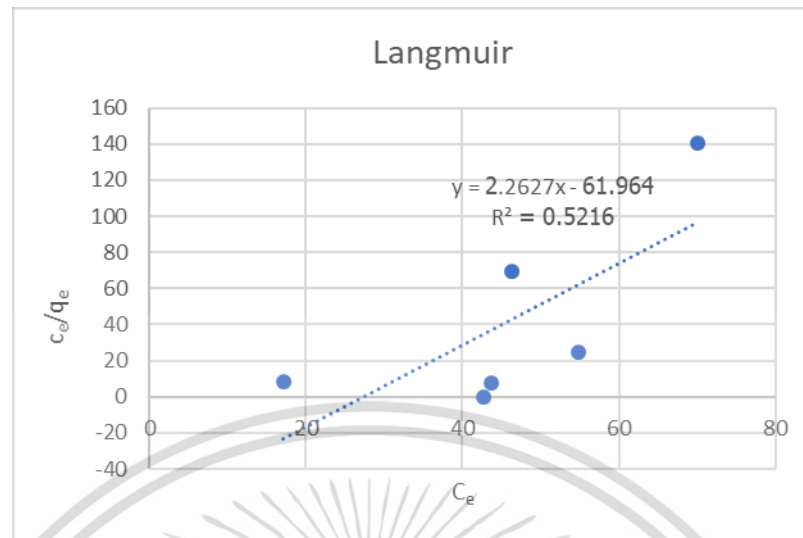
$q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

$q_m$  = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

$K_L$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของ Langmuir (L/mg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ของการดูดซับของถ่านชีวภาพ

จากกราฟจะได้ ความชัน (slope) = 2.2627 และจุดตัดแกน  $y = -61.964$  ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q_m$ ) ค่าคงที่สมการ Langmuir ( $K_L$ ) และค่า  $R_L$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+K_L C_0} \\ 2.2627 &= \frac{1}{q_m} & R_L &= \frac{1}{1+\left(140.2217 \frac{L}{mg}\right)\left(100 \frac{mg}{L}\right)} \\ q_m &= 0.44 & R_L &= 0.0007 \\ \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{1}{K_L q_m} \\ -61.964 &= \frac{1}{K_L (0.4419)} \\ K_L &= 140.2217 \text{ L/mg} \end{aligned}$$

ค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับจะไม่เป็นแบบ Langmuir (Unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (Favorable) และเมื่อ  $R_L = 0$  การดูดซับจะเกิดการผันกลับไม่ได้ (Irreversible) จากการคำนวณพบว่าค่า  $R_L$  ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์บนเปลือกส้ม มีค่าเท่ากับ 0.0007 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า 0 และน้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นการดูดซับแบบ Langmuir (Favorable) โดยการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว และมีค่า  $q_m$  ในการดูดซับเท่ากับ 0.44 mg/g และมีค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.5216

#### 4.3.2 สมการการดูดซับของ Freundlich

สมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) พื้นผิวตัวดูดซับขรุขระ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งกลไกทางกายภาพและทางเคมี การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น พื้นที่ผิวและพลังงานในการดูดซับจะมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียที่สภาวะสมดุล

สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

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

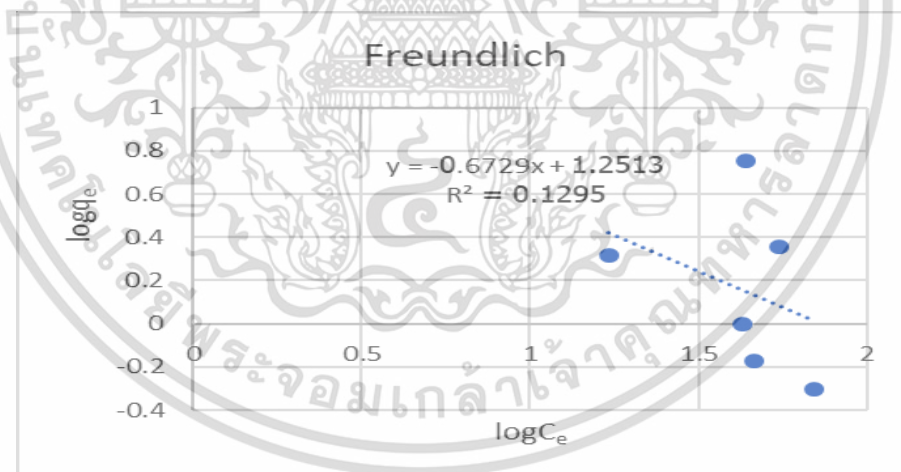
โดย  $K_f$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (L/g)

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

$q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

$C_e$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ของการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = -0.6729 และจุดตัดแกน  $y = 1.2513$  สามารถนำไปหาค่าคงที่  $1/n$  และ  $K_f$  ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{array}{lcl}
 \text{ความชัน} & = & \frac{1}{n} \\
 0.6729 & = & \frac{1}{n} \\
 n & = & 1.49
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{lcl}
 \text{จุดตัดแกน } y & = & \log K_f \\
 1.2513 & = & \log K_f \\
 K_f & = & 10^{1.2513} \text{ L/g} \\
 & = & 17.84 \text{ L/g}
 \end{array}$$

ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น ( $K_f$ ) ของการดูดซับถ่านชีวภาพ เท่ากับ 17.84 L/g ความชัน  $1/n = 1$  ไอโซเทอมการดูดซับเป็นเส้นตรง ค่า  $1/n > 1$  อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และ  $1/n < 1$  อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ ดังนั้นจากผลการคำนวณของการทดลองจะได้ว่า ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับซึ่งสัมพันธ์กับความชันของสารละลาย ( $1/n$ ) ของการดูดซับถ่านชีวภาพ เป็น 0.67 แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.1295 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เข้าใกล้ 1 ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีจึงไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ Freundlich

#### 4.3.3 สมการการดูดซับของ Temkin

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

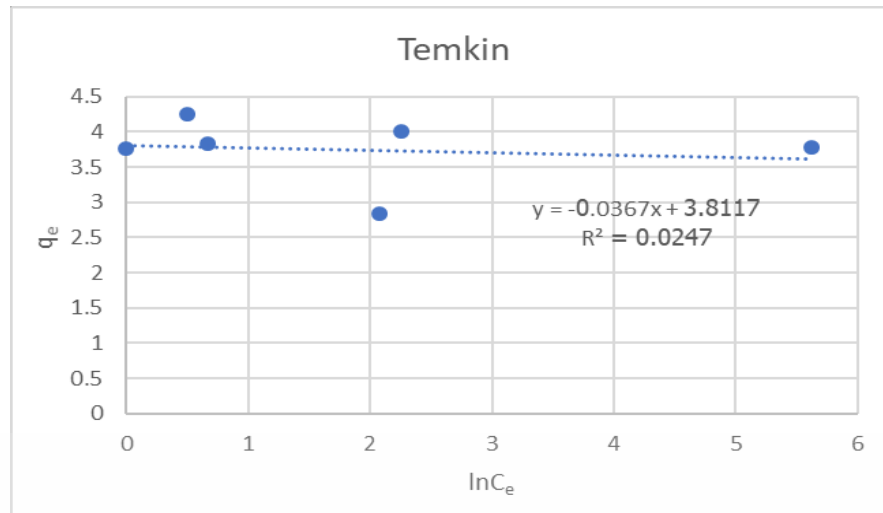
สมการการดูดซับของ Temkin

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย เพื่อบริการวิชาการแก่สังคมโดยไม่หวังผลตอบแทน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C_e$  ของการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนสังกะสี

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = -0.0367 และจุดตัดแกน  $y = 3.8117$  ค่าความสามารถหาค่าคงที่  $b_0$  และ  $A$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\
 0.0367 &= \frac{8.314 \times 303}{b_0} & 3.8117 &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\
 b_0 &= \frac{6.86 \times 10^4 \text{ KJ/mol}}{0.0367} & A &= \frac{(3.8117)(6.86 \times 10^4)}{(8.314)(303)} \\
 & & &= 103.8 \text{ L/g}
 \end{aligned}$$

สมการ Temkin สามารถนำมาอธิบายการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับได้ โดยที่หาก  $b_0 > 80 \text{ KJ/mol}$  แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาเคมี จากการคำนวณพบว่าค่า  $b_0$  ของการดูดซับของถ่านชีวภาพเท่ากับ  $6.86 \times 10^4 \text{ KJ/mol}$  โดยจากสมการดูดซับของ Temkin จะพบว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กเป็นการดูดซับทางเคมี แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) = 0.0247 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เข้าใกล้ 1 จึงไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ Temkin

#### 4.3.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือกายภาพที่เกิดบนผิวตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

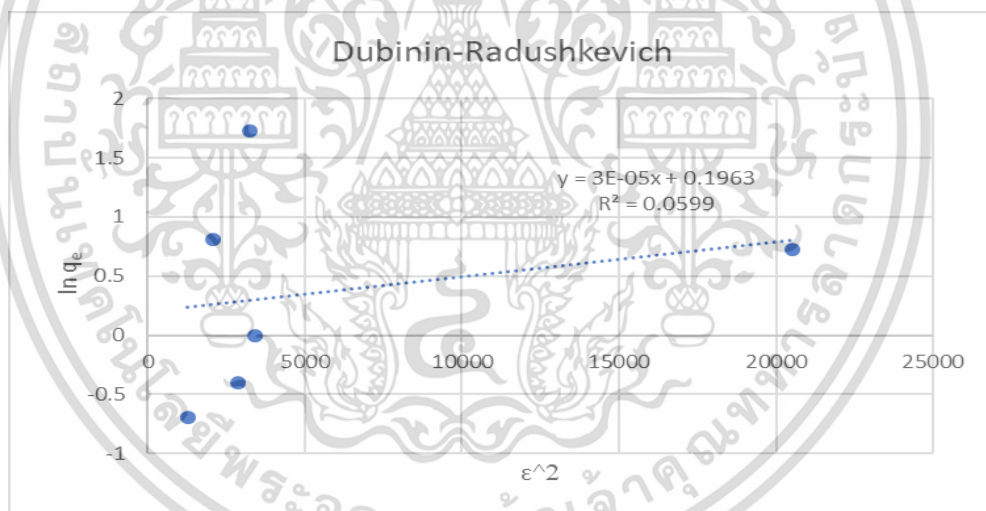
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

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

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

นำผลการทดลองคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  กับ  $\mathcal{E}^2$  ของการดูดซับน้ำเสียปนเปื้อนสังกะสี จากกราฟจะได้ความชัน  $= 3 \times 10^{-5} = K_{DR}$  หาค่า  $E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$  และจุดตัดแกน  $y = 0.1963$   
 $\text{mg/g} = \ln q_D$

$E$	$=$	$1/(2K_{DR})^{1/2}$	จุดตัดแกน Y	$=$	$\ln q_D$
$E$	$=$	$1/(2 \times (3 \times 10^{-5}))^{1/2}$	$\ln q_D$	$=$	0.1963
$E$	$=$	129.1 KJ/mol	$q_D$	$=$	1.18 mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณพลังงานอิสระจากไอโซเทอมการดูดซับของ D-R เมื่อได้ค่า E อยู่ในระหว่าง 8-16 KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ  $E < 8$  KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อ  $E > 16$  KJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี จากการคำนวณค่า E มีค่าเท่ากับ 129.1 KJ/mol ค่าสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับ Dubinin-Radushkevich ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.0599 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เข้าใกล้ 1 จึงไม่สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ Dubinin-Radushkevich

ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin ของการดูดซับสังกะสีด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

Langmuir Isotherm		Dubinin-Radushkevich Isotherm	
$q_m$ (mg/g)	0.44	$K_{DR}$	$3 \times 10^{-5}$
$K_L$ (L/mg)	140.22	$q_D$ (mg/g)	1.18
$R_L$	0.0007	$E$ (kJ/mol)	129.1
$R^2$	0.5216	$R^2$	0.0599
Freundlich Isotherm		Temkin Isotherm	
$K_f$ (L/g)	17.84	$b_0$ (KJ/mol)	$6.86 \times 10^4$
$1/n$	0.67	$A$ (L/g)	103.8
$R^2$	0.1295	$R^2$	0.0247

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ ( $R^2$ ) จากตารางพบว่า มีค่าที่น้อยเกินไปจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับชนิดใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการดูดซับสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดพบว่าเมื่อพีเอชของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 7 และปริมาณถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ใช้เท่ากับ 2 กรัม/ลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดคือ 15 นาที โดยความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีที่ใช้ในการบำบัดมีความเข้มข้นอยู่ที่ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 40 องศาเซลเซียส สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 20.32 มิลลิกรัม/ลิตร โดยคิดเป็น 79.68 เปอร์เซ็นต์ที่สามารถบำบัดไปได้
- 2) จากผลการศึกษาสัมประสิทธิ์พหุคูณ ( $R^2$ ) พบว่า สมการแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับนั้น ยังไม่สามารถสรุปผลการทดลองได้ เพราะค่าสัมประสิทธิ์พหุคูณ ( $R^2$ ) นั้นต่ำเกินไป ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าควรเป็นชนิดไหน
- 3) จากผลการศึกษาถ่านชีวภาพที่นำมาสังเคราะห์เป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กและเมื่อนำถ่านไปวัดค่าพื้นผิวประจุของตัวดูดซับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก (Point of zero charge) จะพบว่าค่าประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์ ( $pH_{pzc}$ ) ที่ pH เท่ากับ 3.85

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่มีผลต่อการดูดซับ
- 2) ศึกษาการนำถ่านแม่เหล็กชีวภาพกลับมาใช้ซ้ำ
- 3) ศึกษาและประยุกต์ใช้กับน้ำเสียประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

กมลรัตน์ เกลี้ยงประดิษฐ์. 2564. “การบำบัดน้ำเสียผ้าบาติกโดยกระบวนการดูดซับด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร

กองตรวจสอบคุณภาพสินค้าประมง, กรมประมง. 2558. **โลหะหนัก**. [Online] Available : Chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www4.fisheries.go.th/local/file\_document/20200415090908\_1\_file.pdf สืบค้นเมื่อ 9 เมษายน 2566

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. **การบำบัดน้ำเสีย** [Online] Available : chrome extension ://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.oic.go.th/FILEWEBB/CABINFOC ENTR3/DRAWER056/GENERAL/DATA0000/00000973.PDF สืบค้น เมื่อ 9 เมษายน 2566

ณปภัช พิมพ์ดี. 2560. **การชุบโลหะ**. [Online]. Available : https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7179-2017-06-05-14-14-44 สืบค้นเมื่อวันที่ 9 เมษายน 2566

ชมพูนุท ไชยรักษ์. 2563. “การดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวา.” สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิติรัตน์ จารุวาระกุล. 2548. หลักการและการแก้ปัญหาเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์. กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์, & คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิรามัย ไตรยวงศ์. 2558. “กำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และพีอาร์บี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. **ข้าวโพด**. [Online]. Available : <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=8635>

แม่น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์;

สิริชัย นันดี. 2561. “การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสังกะสีและทองแดงระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยหมักมูลวัว.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Arancibia-Miranda, N., Baltazar, S.E., García, A., Romero, A.H., Rubio, M.A., and Altbir, D. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014. Lead removal by nano-scale zero valent iron: Surface analysis and pH effect. *Materials Research Bulletin* 59: 341-348.
- Faust, S. D., & Aly, O. M. 1987. *Adsorption process for water treatment*. United States of America: Butterworth
- Ginosar, D. M., Petkovic, L. M., & Burch, K. C. 2011. Commercial activated carbon for the catalytic production of hydrogen via the sulfur-iodine thermochemical water splitting cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(15), 89088914
- Liu, Q., Bei, Y., and Zhou, F. 2009. Removal of lead (II) from aqueous solution with amino functionalized nanoscale zero-valent iron. *Central European Journal of Chemistry* 7(1): 79-82.
- Ruiying, G., & Jianlong, W. 2007. Effect of pH and temperature on isotherm parameter of chlorphenols biosorption to anaerobic granular. *Journal hazardous materials*, 145, 398-043
- Sawyer, C.N., Mccarty, P.L., and Parkin, G.F. 2003. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Zhang, X., Lin, S., Lu, X-Q., and Chen, Z-L. 2010. Removal of Pb(II) from water using synthesized kaolin supported nanoscale zero-valent iron. *Chemical Engineering Journal* 163: 243-248

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ก.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของสังกะสีด้วยเทคนิค Atomic absorption spectrophotometry

#### 1) หลักการของเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

Atomic absorption เป็นกระบวนการดูดกลืนแสงโดยอะตอมอิสระ ซึ่งอะตอมอิสระของธาตุแต่ละชนิดดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะ อะตอม ของธาตุต่างชนิดกันจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน สเปกตรัมของอะตอมที่ได้ มีลักษณะเป็นเส้น (Spectrum line) ต่างจากสเปกตรัมของโมเลกุล (Spectrum band) เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในอะตอมมีเฉพาะการเปลี่ยนระดับพลังงานของ อิเล็กตรอน แต่การเปลี่ยนระดับพลังงานในโมเลกุลเป็นการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนร่วมกับพลังงานการสั่น การที่จะทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบ เกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจจะอยู่ในรูป ต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า เป็นต้น เมื่ออะตอมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ดูดกลืนพลังงาน และเปลี่ยนเป็นอะตอมอิสระ ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ ซึ่งจะดูดกลืนแสงจากแหล่งกำเนิดเปลี่ยนจากสถานะพื้น ไปสู่สถานะกระตุ้น ทำให้ปริมาณแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดตกกระทบเครื่องวัดแสง (detector) ลดลง หลักการนี้เรียกว่า Atomic absorption (ฐิติรัตน์, 2548)

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS มีด้วยกัน 5 ส่วน ดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดแสง (Light source)
- 2) ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer)
- 3) โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator)
- 4) ดีเทคเตอร์ (Detector)
- 5) เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out units)

#### 1) แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

แหล่งกำเนิดแสง ต้องให้แสงที่มีความเข้มสูง คงที่ เป็นแถบแคบ ๆ และมีความยาวคลื่นเท่ากับ ความยาวคลื่นที่ใช้วิเคราะห์ โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดแสง ใช้เป็นหลอดฮอลโลว์แคโทด (Hollow cathode lamps, HCL) และหลอดที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า (Electrodeless discharge lamp, EDL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer)

การทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไป ซึ่งพลังงานดังกล่าวอาจอยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบของเครื่อง AAS ที่ให้พลังงานความร้อนเพื่อทำให้เกิดอะตอมอิสระ นั้นเรียกว่า Atomizer และกระบวนการที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้นเรียกว่า Atomization process

## 3) โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการเพียงความยาวคลื่นเดียวออกจากแสงที่มีหลายความยาวคลื่น

## 4) ดีเทคเตอร์ (Detector)

ทำหน้าที่วัดความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากโมโนโครมาเตอร์ ปัจจุบันนิยมใช้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ซึ่งเป็นหลอดสูญญากาศ ภายในบรรจุด้วย ไอโนดและแอโนด หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ จะเปลี่ยนแสงให้กลายเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบ แคโทดในหลอด โฟโตมัลติ พลายเออร์ (แมน และ อมร, 2534)

## 5) เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and read-out unit)

ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเครื่องดีเทคเตอร์ แล้วนำไปเข้ากระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำการแปลความหมาย ประมวลผล และแสดงผลออกมาผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร

#### ข.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี เข้มข้น 1000 ppm

- ชั่ง  $ZnCl_2$  0.2080 กรัม สารละลาย = 1000 ppm  
ดังนั้น ชั่ง  $ZnCl_2$  0.2080 กรัม ละลายน้ำแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ก็จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี 1000 ppm

#### ข.2 การเตรียมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์

- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์
- ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเฟอร์รัสซัลเฟต  $(1 \times 250/1000) = 0.25$  โมลาร์  
ดังนั้นสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต 1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งเฟอร์รัสซัลเฟต  $(0.25 \times 152) = 38$  กรัม  
ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

#### ข.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์

- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 2 โมลาร์
- ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร มีโซเดียมโบรโมไฮไดรด์  $(2 \times 250/1,000) = 0.5$  โมลาร์ สารละลายโซเดียมโบรโมไฮไดรด์ 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งโซเดียมโบรโมไฮไดรด์  $(0.5 \times 37.83) = 17.915$  กรัม ในสารละลาย 250 มิลลิลิตร

#### ข.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์

- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์
- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร มีโซเดียมไฮดรอกไซด์  $(2 \times 1,000/1,000) = 0.1$  โมลาร์  
ดังนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์  $(0.1 \times 40) = 4$  กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร

#### ข.5 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์

- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์
- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร มีโซเดียมคลอไรด์  $(0.01 \times 1000/1,000) = 0.01$  โมลาร์  
ดังนั้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งโซเดียมคลอไรด์  $(0.01 \times 58.44) = 0.5844$  กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร

#### ข.6 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

- ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์
- ในสารละลาย 500 มิลลิลิตร มีกรดไฮโดรคลอริก  $(0.1 \times 500/1,000) = 0.05$  โมลาร์  
ดังนั้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ เท่ากับต้องชั่งกรดไฮโดรคลอริก  $(0.05 \times 36.45) = 1.8$  กรัม ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าประจุพื้นที่ผิวที่เป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ )

ตารางที่ ค.1 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีค่าพีเอชเริ่มต้นและค่าพีเอชสุดท้ายของการทดลองหาค่าประจุพื้นที่ผิวที่เป็นศูนย์

Blank	Initial pH	Final pH
2	2.62	2.72
3	3.84	3.68
4	4.24	3.85
5	5.26	4.03
6	6.46	6.16
7	7.82	7.73
8	8.05	7.93
9	9.00	8.83
10	10.05	9.83
11	11.09	10.59
12	12.00	11.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### กราฟและตารางความเข้มข้นของสารละลาย

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 1 (พีเอชของสารละลายที่เหมาะสม) รอบที่ 1

pH	ความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์
2	57.24	42.75
3	48.86	51.13
4	57.54	42.45
5	54.41	45.58
7	47.96	52.03
9	27.50	72.49

ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นหลังการบำบัดชุดการทดลองที่ 1 (พีเอชของสารละลายที่เหมาะสม) รอบที่ 2

pH	ความเข้มข้นของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์
2	40.30	59.69
3	39.58	60.41
4	48.90	51.09
5	16.83	83.16
7	-1.88	101.88
9	-9.43	109.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 0 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	68.41	31.58
15	42.64	57.3585
30	70.67	29.32
60	94.07	5.92
90	57.05	42.94
120	165.84	-65.84
150	83.50	16.49
180	120.94	-20.94

ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 0.5 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	103.88	-3.88
15	43.73	56.26
30	44.71	55.28
60	18.98	81.01
90	45.69	54.30
120	77.84	22.15
150	82.26	17.73
180	81.54	18.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 1 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	67.88	32.11
15	54.90	45.09
30	54.00	46.00
60	14.22	85.77
90	3.32	96.67
120	82.90	17.09
150	99.50	0.49
180	83.43	16.56

ตารางที่ ง.6 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 2 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	73.20	26.79
15	17.09	82.90
30	20.49	79.50
60	34.79	65.20
90	35.50	64.49
120	52.94	47.05
150	94.03	5.96
180	87.32	12.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 3 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	75.47	24.52
15	70.07	29.92
30	27.92	72.07
60	41.77	58.22
90	49.92	50.07
120	86.22	13.77
150	78.45	21.54
180	83.58	16.41

ตารางที่ ง.8 ความเข้มข้นหลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่ 2 (แปรผันปริมาณถ่านชีวภาพและเวลาที่เหมาะสม)

น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้เท่ากับ 4 g/L ความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 100 mg/L pH เท่ากับ 7

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย สังเคราะห์หลังการบำบัด (mg/L)	เปอร์เซ็นต์ในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์
0	104.98	-4.98
15	46.37	53.62
30	46.79	53.20
60	39.88	60.11
90	24.67	75.32
120	81.81	18.18
150	97.39	2.60
180	82.11	17.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาว นริศรา พุฒากรณ์ รหัสประจำตัว 62050401

นางสาว ปิยะภิญญา ท่ากล้า รหัสประจำตัว 62050415

นางสาว ลักษณ์าวดี กงชัยภูมิ รหัสประจำตัว 62050438

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การดูดซับสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ประกอบด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

ชื่อภาษาอังกฤษ Adsorption of Zn from Wastewater Using Magnetic Biochar Composites by Zero-Valent Iron

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้

แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 9.25 % หรือโปรแกรม Turnitin. 9.25 %

ลงชื่อ น.ส.นริศรา พุฒากรณ์

ลงชื่อ น.ส.ปิยะภิญญา ท่ากล้า

ลงชื่อ น.ส.ลักษณ์าวดี กงชัยภูมิ

(นริศรา พุฒากรณ์)

(ปิยะภิญญา ท่ากล้า)

(ลักษณ์าวดี กงชัยภูมิ)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้น

แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ลงชื่อ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้