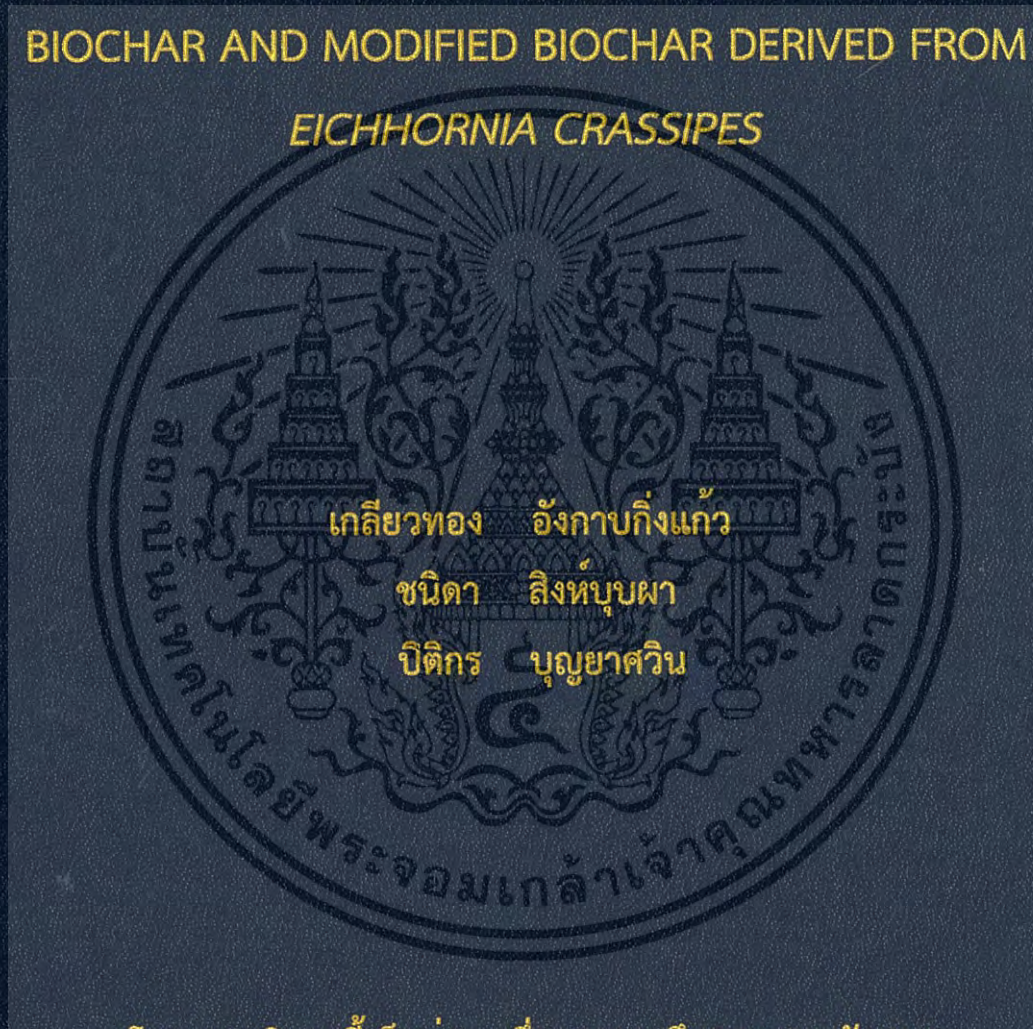


การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่าน  
ชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ

COMPARISON OF CADMIUM ADSORPTION EFFICIENCY BY

BIOCHAR AND MODIFIED BIOCHAR DERIVED FROM

*EICHHORNIA CRASSIPES*



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่าน  
ชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ

COMPARISON OF CADMIUM ADSORPTION EFFICIENCY BY  
BIOCHAR AND MODIFIED BIOCHAR DERIVED FROM  
*EICHHORNIA CRASSIPES*



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPARISON OF CADMIUM ADSORPTION EFFICIENCY  
BY BIOCHAR AND MODIFIED BIOCHAR DERIVED FROM  
*EICHHORNIA CRASSIPES*



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




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจาก  
 ผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ  
 Comparison of Cadmium Adsorption Efficiency by Biochar and  
 Modified Biochar Derived from *Eichhornia Crassipes*

ชื่อนักศึกษา นางสาวเกลียวทอง อังกาบกิ่งแก้ว รหัสนักศึกษา 57050571  
 นางสาวชนิตา สิ่งบุบผา รหัสนักศึกษา 57050582  
 นางสาวปิติกร บุญยาศวิน รหัสนักศึกษา 57050621

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

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี  
 สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเกลิยวทอง	อังกาบกิ่งแก้ว	รหัสนักศึกษา 57050571
	นางสาวชนิดา	สิงห์บุผา	รหัสนักศึกษา 57050582
	นางสาวปติกร	บุญยาศวิน	รหัสนักศึกษา 57050621
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ คือ SDS - biochar/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ศึกษาค่า Zero point charge ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแคดเมียม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำเสีย (pH), ปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของน้ำเสียและอุณหภูมิของระบบ, ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพ งานวิจัยนี้ยังรวมถึงการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม, จลนศาสตร์การดูดซับ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ จากการทดลองพบว่าค่า Zero point charge ของตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพคือ 7.40 และ 3.00 ตามลำดับ การดูดซับสูงสุดของถ่านผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 8 และมีค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมสูงสุดที่เวลา 5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ และอุณหภูมิในการบำบัด ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมจะลดลง ไอโซเทอรัมการดูดซับของถ่านผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและผ่านการปรับปรุงคุณภาพสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบ Freundlich และจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

คำสำคัญ : การดูดซับ, แคดเมียม, ถ่านชีวภาพ, โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต, ผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Comparison of Cadmium Adsorption Efficiency by Biochar and Modified Biochar Derived from <i>Eichhornia Crassipes</i>		
Students	Ms. Kliathong	Angkabkingkaew	Student ID 57050571
	Ms. Chanida	Singbubpha	Student ID 57050582
	Ms. Thitikorn	Boonyasawin	Student ID 57050621
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department of	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic year	2560		
Advisors	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa		

### Abstracts

The purpose of this research is to study the adsorption of cadmium ion by modified magnetic biochar derived from *Eichhornia Crassipes* (SDS-biochar/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite). This research studied zero point charge (pH<sub>pzc</sub>) and factors related to adsorption of cadmium; such as pH, amount of adsorbent, the concentration of wastewater and temperature. The comparison of adsorption efficiency of biochar between the unmodified biochar with modified magnetic biochar derived from *Eichhornia Crassipes* was performed. This study also included isotherms, kinetic, and thermodynamics of the adsorption. Zero point charge of the unmodified biochar and modified magnetic biochar were 7.40 and 3.00, respectively. The maximum adsorption was reached when using pH 8. The equilibrium adsorption time was found at 5 hours and 1 hour for biochar and magnetic biochar, respectively. The adsorption percentage increased with increasing the amount of the unmodified biochar. The adsorption percentage decreased with increasing the amount of the magnetic biochar. When the concentration of wastewater and temperature were increased, adsorption percentages decreased. This isotherm study showed that the unmodified biochar and the modified magnetic biochar adsorption and kinetic followed Freundlich isotherm model and the second order reaction.

**Keywords:** Adsorption, Biochar, Cadmium, Sodium Dodecyl Sulfate, Water hyacinth

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.กถินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ คณะกรรมการสอบที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง แนวทางการแก้ปัญหา รวมไปถึงการตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษเพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู ตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมที่คอยเป็นกำลังใจ แนะนำ และเป็นที่ยกย่องที่ดีตลอดจนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้จนออกมาเสร็จสมบูรณ์

เกลิยาทอง อังกาบกิ่งแก้ว  
ชนิดา สິงห์บุบผา  
ปิติกร บุญยาศวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ด
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ตัวดูดซับ.....	4
2.1.1 Sodium dodecyl sulphate (SDS) .....	4
2.1.2 Ferric chloride (FeCl <sub>3</sub> ).....	6
2.1.3 เหล็ก (Iron).....	6
2.1.3.1 ความสามารถในการละลายและตกตะกอนของเหล็ก.....	7
2.1.3.2 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide).....	8
2.2 ผักตบชวา.....	9
2.2.1 ผักตบชวา.....	9
2.2.2 ประโยชน์.....	10
2.2.3 บทบาทในการกำจัดน้ำเสีย.....	10
2.3 ถ่านชีวภาพ.....	10
2.3.1 ถ่านชีวภาพ.....	10
2.3.2 คุณสมบัติและประโยชน์ของถ่านชีวภาพ.....	11
2.4 แคลเดียม.....	12
2.4.1 ระดับของแคลเดียมในสิ่งแวดล้อม.....	12
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส.....	13
2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis).....	13
2.5.2 วิธีการไพโรไลซิส.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการดูดซับ.....	14
2.6.1 กระบวนการดูดซับ.....	14
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ.....	15
2.6.3 กลไกการดูดซับ.....	16
2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
<b>บทที่ 3 วิธีการทำงานวิจัย.....</b>	<b>22</b>
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี.....	22
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	22
3.1.2 สารเคมี.....	22
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ.....	23
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	23
3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการ ปรับปรุงคุณภาพและหลังการปรับปรุงคุณภาพ.....	24
3.2.3.1 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH <sub>pzc</sub> ) ของตัวดูดซับ.....	24
3.2.4 การศึกษาของอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย แคดเมียมสังเคราะห์.....	24
3.2.4.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย แคดเมียมสังเคราะห์.....	24
3.2.4.2 การศึกษาอิทธิพลของของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการ ดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	25
3.2.4.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	25
3.2.4.4 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย แคดเมียมสังเคราะห์.....	25
3.2.5 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	26
3.2.6 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่สภาวะ เหมาะสม.....	26
3.2.7 ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์.....	26
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>27</b>
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผกตบขวา.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) .....	27
4.1.2 การวิเคราะห์การวิเคราะห์โครงสร้างและธาตุองค์ประกอบของ ตัวอย่างถ่านชีวภาพด้วย X - Ray Diffractometer (XRD).....	28
4.1.3 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	30
4.2 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, $pH_{PZC}$ ).....	31
4.3 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์	32
4.3.1 อิทธิพลของค่า pH.....	32
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณผักตบชวา.....	35
4.3.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	37
4.3.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์...	40
4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียด้วยผักตบชวา.....	42
4.4.1 สมการการดูดซับของ Langmuir.....	42
4.4.2 สมการการดูดซับของ Freundlich.....	44
4.4.3 สมการการดูดซับของ Temkin.....	45
4.4.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich.....	47
4.4.5 สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson (R-P).....	48
4.5 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพผักตบชวา..	52
4.5.1 แปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ดังนี้ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุง คุณภาพ.....	54
4.5.2 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ดังนี้ 33°C, 45°C และ 55°C ของถ่านชีวภาพที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	55
4.5.3 แปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ดังนี้ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพ...	57
4.5.4 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ดังนี้ 33°C, 45°C และ 55°C ของถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพ.....	59
4.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ด้วยผักตบชวา ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี.....	64
4.6.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) ของการดูดซับแคดเมียม.....	64
4.6.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) การดูดซับ แคดเมียม.....	66
4.6.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	105
ภาคผนวก ง.....	106
ภาคผนวก จ.....	108
ภาคผนวก ฉ.....	111
ภาคผนวก ช.....	115
ภาคผนวก ซ.....	120
ภาคผนวก ฌ.....	122
ภาคผนวก ฎ.....	123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์และผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	14
4.1 ความยาวคลื่นที่หุ้มฟังก์ชันต่างๆ.....	30
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich และ Redlich-Peterson สำหรับการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (BC) และการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท(SDS/Fe-BC).....	42
4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	62
4.4 ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	63
4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	64
4.6 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	65
4.7 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	67
4.8 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	67
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	76
ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	77
ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปริมาณตัวดูดซับของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	78
ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปริมาณตัวดูดซับของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	79
ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาความเข้มข้นของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ก.6	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาความเข้มข้นของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	81
ก.7	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาอุณหภูมิของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	82
ข.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	84
ข.2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	99
ข.3	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	101
ข.4	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์.....	103
ค.1	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	103
ค.2	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนทที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	105
ง.1	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	106
ง.2	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนทที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.3	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคะเดียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคะเดียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคะเดียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 50 องศาเซลเซียส.....	107
ง.4	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคะเดียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคะเดียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคะเดียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเคคซิลซิลโฟเนทที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 50 องศาเซลเซียส.....	107
ฅ.1	ค่า pH เริ่มต้นและ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง..	122
ฅ.2	ค่า pH เริ่มต้นและ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเคคซิลซิลโฟเนทปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง.....	122
ญ.1	ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ.....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การจับตัวของสารลดแรงตึงผิวกับอนุภาค.....	5
2.2	โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวรวมตัวกันเป็น Micelle.....	5
2.3	การวางตัวของคราบน้ำมันใน Micelle .....	5
2.4	ลักษณะโมเลกุลของเหล็กธรรมชาติและโมเลกุลของแม่เหล็ก.....	7
2.5	ผักตบชวา.....	9
2.6	โครงสร้างชีวโมลลิกโนเซลลูโลส.....	10
2.7	การดูดซับแบบหลายชั้น.....	15
2.8	การดูดซับแบบชั้นเดียว.....	16
4.1	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพจากกล้อง SEM กำลังขยาย 9000 เท่า.....	27
4.2	โครงสร้างทางจุลภาคและสารประกอบของถ่านชีวภาพ.....	29
4.3	สเปกตรัมของผักตบชวาวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	30
4.4	ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH <sub>PZC</sub> ) ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	31
4.5	ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH <sub>PZC</sub> ) ของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	32
4.6	ร้อยละการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพเมื่อน้ำเสียนี้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	32
4.7	ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพเมื่อน้ำเสียนี้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร น้ำเสียสังเคราะห์(w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	33
4.8	ร้อยละการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนทเมื่อน้ำเสียนี้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	33
4.9	ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนทเมื่อน้ำเสียนี้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	35
4.11 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัม ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	36
4.12 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะคซิลซิลโฟเนทเท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัม ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	36
4.13 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะคซิลซิลโฟเนทเท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัม ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	37
4.14 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	37
4.15 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตรและใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการ ทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	38
4.16 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะคซิลซิลโฟเนทต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	39
4.17 ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะคซิลซิลโฟเนทต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	40
4.19 ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และ ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	40
4.20 ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนตต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และ ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	41
4.21 ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนตต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัม ต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	41
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	42
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนต.....	43
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	44
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนต.....	45
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_e$ กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	46
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_e$ กับ $\ln C_e$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพ จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนต.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $[RT \ln (1+1/Ce)]^2$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	47
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $[RT \ln (1+1/Ce)]^2$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	48
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (KR(Ce/q_e) - 1)$ กับ $\ln Ce$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ.....	49
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (KR(Ce/q_e) - 1)$ กับ $\ln Ce$ ของการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเดคซิลซัลโฟเนท.....	50
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - qt)$ ) กับเวลา (t) .....	54
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/qt) กับเวลา (t) .....	54
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ ) .....	55
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับ $t^{0.5}$ .....	55
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - qt)$ ) กับเวลา (t) .....	56
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/qt) กับเวลา (t) .....	56
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ ) .....	57
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับ $t^{0.5}$ .....	57
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - qt)$ ) กับเวลา (t) .....	58
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/qt) กับเวลา (t) .....	58
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ ) .....	59
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับ $t^{0.5}$ .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - qt)$ ) กับเวลา (t) .....	60
4.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/qt) กับเวลา (t) .....	60
4.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ ).....	61
4.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (qt) กับ $t^{0.5}$ .....	61
4.48	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	65
4.49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	66
ก.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของ Biochar.....	77
ก.2	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของ SDS/Fe-Biochar .....	78
ก.3	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ Biochar.....	79
ก.4	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ SDS/Fe -Biochar.....	80
ก.5	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ Biochar. ....	81
ก.6	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ SDS/Fe-Biochar.....	82
ก.7	กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยอุณหภูมิของ Biochar และ SDS/Fe-Biochar.....	83
ข.1.1	ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เมื่อน้ำเสียนี้อาจมี pH เท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	84
ข.1.2	ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ถ่านผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโอดีคซิลซิลโฟเนท เมื่อน้ำเสียนี้อาจมี pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7,8 และ 9 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	90
ข.1	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ซ.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) .....	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	แฟกเตอร์ความถี่
$a_R$	ค่าคงที่ Redlich-Peterson (1/mg)
BC	ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
$b_0$	ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ
$b_R$	ค่าที่อยู่ระหว่าง 0 - 1
$C_0$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
$C_t$	ความเข้มข้นที่เวลานั้น ๆ ของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
$C_e$	ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับ
E	พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ
$E_a$	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา
Fe - BC	ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก
g	กรัม
$H_1$	เอนทัลปี ณ สภาวะเริ่มต้น
$H_2$	เอนทัลปี ณ สภาวะสุดท้าย
J	จูล
K	เคลวิน
$K_{DR}$	ค่าคงที่ของ Dubinin-Radushkevich
$K_F$	ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น
kg	กิโลกรัม
$k_{id}$	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน
kJ	กิโลจูล
$K_L$	ค่าคงที่ของแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$K_R$	ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับจากวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) (mg/g)
$k_1$	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
$k_2$	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
L	ลิตร
log	ล็อกกาติทึม
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
mm	มิลลิเมตร
mol	โมล
nm	นาโนเมตร
pH	ค่าที่แสดงความเป็นกรดและด่าง
$q_D$	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของการดูดซับ
$q_e$	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
$q_{max}$	ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด
$q_t$	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่เวลานั้น ๆ
R	ค่าคงที่ของก๊าซ ( $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}/\text{K}^{-1}$ )
$R_L$	ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล
SDS/Fe - BC	ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนต
$S_1$	เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น
$S_2$	เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
t	เวลา (นาทีก)
V	ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ
W	น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้
ln	ล็อกการิทึมธรรมชาติ
$\Delta G$	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ
$\Delta H$	การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี
$\Delta S$	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี
1/n	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ
$\mu g$	ไมโครกรัม
$\alpha$	อัตราเร็วในการดูดซับ
$\beta$	สัมประสิทธิ์ของการคายซับ
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงด้านเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยี รวมไปถึงการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมที่เป็นไปอย่างก้าวกระโดด ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการบำบัด ก่อให้เกิดผลกระทบที่ตามมาคือน้ำที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักถูกปล่อยลงสู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ หนึ่งในโลหะหนักนั้นคือแคดเมียม โดยแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมจะพบในแหล่งทำเหมืองสังกะสีและตะกั่ว อุตสาหกรรมยาสูบและบุหรี่ย นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม และอะไหล่รถยนต์ หรือภาคเกษตรกรรมที่มีแคดเมียมปนเปื้อนในสารกำจัดศัตรูพืชหรือมูลสัตว์ที่นำมาใช้เป็นปุ๋ย จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ที่เพาะปลูกที่ได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียในจังหวัดสมุทรปราการ มีปริมาณแคดเมียมสูงสุด 7.42 พีพีเอ็ม ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่เกินค่ามาตรฐานเป็นอย่างมาก (อรทัย, 2541) ซึ่งเมื่อมีฝนตกอาจจะถูกชะล้างลงสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ดิน แม่น้ำ ทะเล หรือมหาสมุทร เป็นต้น ทำให้สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้นได้รับแคดเมียมเข้าไปสะสม และเมื่อผู้บริโภครับประทานสัตว์น้ำเหล่านั้นเข้าไปก็จะได้รับสารเหล่านั้นเข้าสู่ร่างกายด้วย ส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนเซลล์และเพิ่มการกระตุ้นต่อมมะเร็ง เป็นพิษต่อเซลล์ประสาท อีกทั้งแคดเมียมเลือกที่สะสมอยู่ในตับอ่อน ไต ปอด และกระดูก ทำให้คนที่ได้รับแคดเมียมมากเกินไปจะเป็นโรคไต-อิตไต ทำให้เกิดโรคกระดูกพรุน (Abbas. *et al*, 2014) ดังนั้นจึงมีการกำหนดปริมาณในการปล่อยแคดเมียม โดยกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมให้มีปริมาณแคดเมียมได้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539) ภาคอุตสาหกรรมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับแคดเมียมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบำบัดแคดเมียมก่อนที่จะมีการปล่อยน้ำเสียในอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

การกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี เช่น เทคโนโลยีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electro dialysis) การกรอง (Filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion - exchange) การตกตะกอนด้วยสารเคมี เป็นต้น แต่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมดาที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ ยากต่อการแยกสารในการกำจัดและต้องใช้ต้นทุนสูง รวมไปถึงไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพจากธรรมชาติในการดูดซับหรือเรียกว่าการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) โดยทั่วไปวัสดุดูดซับทางชีวภาพที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ สาหร่าย เชื้อรา แบคทีเรีย เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ยังไม่มี ความเหมาะสมมากพอเนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อนสูง วัสดุดูดซับทางชีวภาพเหล่านี้อาจสิ้นสุดวงจรของชีวิตก่อนการกำจัดโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ (Irina, 2016) การตระหนักถึงปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและกฎหมาย จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียหลายกระบวนการผสมผสานกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ใช้กระบวนการทางเคมีและกายภาพร่วมกัน ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นทุนการบำบัดต่ำ ใช้เวลาบำบัดไม่นาน และใช้สารเคมีไม่มากในการปรับสภาพน้ำเสีย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วิธีการดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการดูดซับที่ใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมและของเสียทางการเกษตร เช่น เศษไม้ ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุจากธรรมชาติบางชนิดยังสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพได้ เช่น ผักตบชวา ซึ่งเป็นวัชพืชที่พบได้ในทุกสภาพน้ำและสามารถช่วยบำบัดน้ำเสียได้โดยตรง ซึ่งผักตบชวาเป็นแหล่งลิกโนเซลลูโลสมีองค์ประกอบของเซลลูโลสร้อยละ 31.6 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 33.4 และลิกนินร้อยละ 9.3 (Kalhorinia. *et al*, 2014) ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถดูดโลหะหนักที่มีในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี ทำให้มีการนำถ่านชีวภาพเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง รวมทั้งการนำผักตบชวามาสังเคราะห์เป็นถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับ ยังเป็นการกำจัดผักตบชวาในแหล่งน้ำไปในตัวอีกด้วย

ทั้งนี้ที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยทำการศึกษาศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยใช้ถ่านชีวภาพ โดย Zhang และคณะ (2015) ได้ทำการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับแคดเมียมจากถ่านชีวภาพจากผักตบชวาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ความร้อน  $450^{\circ}\text{C}$  ดูดซับแคดเมียมได้  $70.3 \text{ mg/g}$  ตามรูปแบบสมการ Langmuir ซึ่งนับว่าไม่สูงมากนัก ประสิทธิภาพการดูดซับยังไม่มากพอ ต่อมาจึงได้มีผู้วิจัยทำการศึกษาศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยการทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพด้วยการทำให้ถ่านชีวภาพมีสภาพเป็นแม่เหล็ก (Ahmed. *et al*, 2016) งานวิจัยที่ผ่านของ Song และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพจากฟางข้าวฟาง โดยแปรรูปเป็น chitosan - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  สามารถดูดไอออนของ Cd ในน้ำเสียได้ค่า  $Q_m$  เท่ากับ 105.26 มิลลิกรัม ต่อกรัม ซึ่งสูงกว่า biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยโคโคซานหรือการนำไปเคลือบด้วย สารต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของ biochar และ SDS - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  composite
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับแคดเมียม
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของ biochar และ SDS - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  composite
4. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสำหรับโลหะแคดเมียม
5. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ
6. ศึกษาอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. นำผักตบชวาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ คือ SDS - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  composite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (biochar) และที่ปรับปรุงคุณภาพ (SDS - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) นำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยใช้เครื่อง SEM, FTIR, XRD และหาค่า Zero point charge

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ โดยแปรผันค่าความเป็นกรด - ต่างของน้ำเสีย ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของน้ำเสีย อุณหภูมิของระบบ

4. ทำการดูดซับโลหะที่มีความเป็นพิษ คือ แคดเมียม

5. ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ และที่ปรับปรุงคุณภาพ

6. ศึกษา 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับสำหรับโลหะแต่ละชนิด ได้แก่ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin - Radushkevich และ Redlich - Peterson isotherm

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

8. ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาการดูดซับ คำนวณค่าเอนทัลปี ( $\Delta H^\circ$ ) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ หาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) และหาค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ )

### 1.3.2 ขอบเขตด้านน้ำเสีย

น้ำเสียจากการสังเคราะห์ที่ขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์

### 1.3.3 ขอบเขตด้านพื้นที่

พื้นที่ที่ใช้ในการทดลอง เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

### 1.3.4 ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูล 2 ภาคการศึกษา ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2561

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพมาใช้บำบัดน้ำเสีย

2. เป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาโลหะปนเปื้อนในน้ำเสีย

3. เป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาดินปนเปื้อนโลหะ

4. สามารถนำข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม โดยใช้ถ่านชีวภาพที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ ไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการบำบัดน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษาเรื่อง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ ผู้ศึกษาได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับตัวดูดซับ

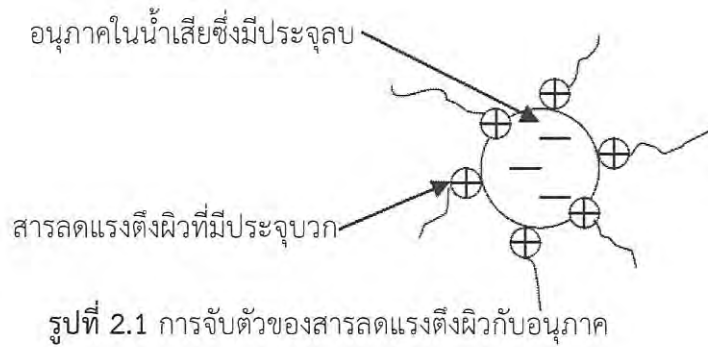
#### 2.1.1 Sodium dodecyl sulphate (SDS)

Sodium dodecyl sulphate (SDS) เป็น สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}^+$  มักจะเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกและสบู่ เป็นต้น

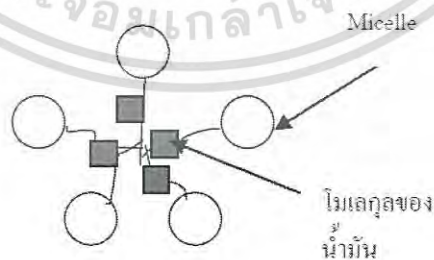
#### บทบาทของสารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย

อนุภาคต่างๆที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย เช่น ฝุ่น สำหรับขนาดเล็ก แบคทีเรีย ส่วนใหญ่จะมีประจุลบและมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขนาดโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงไมครอนหรือ  $10^{-6}$  เมตรเท่ากับ 0.000001 เมตร ซึ่งมักถูกเรียกว่าคอลลอยด์ (colloid) คอลลอยด์มักจะแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย และยากที่จะแยกออกจากน้ำได้ ทั้งนี้เพราะคอลลอยด์มีขนาดเล็กมาก ความหนาแน่นต่ำ และมีการผลักระหว่างกันเนื่องจากมีประจุลบเหมือนกัน มีหลายวิธีที่สามารถจะแยกอนุภาคเหล่านี้ได้ เช่น การทำให้อนุภาคมารวมตัวกันซึ่งจะทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้สาร coagulant สารนี้เมื่อแตกตัวในน้ำจะให้ประจุบวกและประจุลบ ประจุบวกของ coagulant จะไปจับอนุภาคประจุลบให้มารวมตัวกันได้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีซึ่งเรียกว่า Coagulation and Flocculation กระบวนการนี้จะสามารถทำให้คอลลอยด์แยกออกจากน้ำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอนุภาคหรือสิ่งสกปรกที่แขวนลอยในน้ำมารวมตัวกันจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ง่าย โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ตัวอย่างของ coagulant ได้แก่ สารส้มหรือ aluminum sulphate, ferric sulphate, ferric chloride และ polyelectrolytes เป็นต้น

การใช้สารลดแรงตึงผิวก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการแยกอนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้ออกจากน้ำ โดยการใส่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมาจับอนุภาคซึ่งมีประจุลบ ส่วนที่ขอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวซึ่งมีประจุบวกจะไปจับกับอนุภาคที่มีประจุลบ ทำให้เหลือส่วนที่ไม่ขอบน้ำผลึกโมเลกุลของน้ำแยกจากอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้เกิดกระบวนการแยกอนุภาคออกจากน้ำ



ตัวอย่างหนึ่งของการนำสารลดแรงตึงผิวไปบำบัดน้ำเสีย คือการนำสารลดแรงตึงผิวไปแยกคราบน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ กระบวนการแยกเกิดขึ้นจากการใส่สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุหรือมีประจุก็ได้ที่ความเข้มข้นเกินค่า CMC หรือ critical micelle concentration ของสารลดแรงตึงผิว ชนิดนั้นลงในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมัน CMC คือความเข้มข้นที่สารลดแรงตึงผิวมาเรียงตัวกันเป็น micelle ดังรูปที่ 2.2 ตัวอย่างค่า CMC ของ Sodium dodecyl sulphate: SDS เท่ากับ  $8.2 \times 10^{-3}$  mol/L ที่  $25^{\circ}\text{C}$  ซึ่งหมายถึง เมื่อนำ SDS ความเข้มข้น  $8.2 \times 10^{-3}$  mol/L ใส่ลงไปในน้ำ โมเลกุลของ SDS จะมารวมตัวกันเป็น micelle เมื่อสารลดแรงตึงผิวมาเรียงตัวกันเป็น micelle โมเลกุลของน้ำมันจะเข้าไปวางตัวอยู่ใน micelle ดังรูปที่ 2.3 ทำให้เกิดกระบวนการแยกคราบน้ำมันจากน้ำ กระบวนการทำให้ลอยหรือ Flotation มักถูกนำมาใช้ในการพา micelle ที่มีคราบน้ำมันวางตัวอยู่ ออกจากน้ำ



Phoochinda (1999) ได้ทำการศึกษาการแยกคราบน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับวิธีการ Froth Flotation สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Nonylphenol ethoxylate และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulphate ถูกนำมาใช้ในการกำจัด Ortho-dichlorobenzene ซึ่งเป็นสารอะโรมาติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีและสารนี้ยังพบทั่วไปในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้สารชนิดนี้ยังมีความเป็นพิษสูงแม้ว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ และมีฤทธิ์ทำลายระบบประสาท

นอกจากสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้ว เช่น ในกระบวนการทำความสะอาด สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย รวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามแล้วแต่การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์นั้นจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวก็สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน ถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องและมีนำสารลดแรงตึงผิวผิดประเภทมาใช้ ตัวอย่างเช่นในการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้น ซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลานานที่กระบวนการธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด US. EPA. ได้กำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำดื่มให้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kawamura, 2000)

### 2.1.2 Ferric chloride (FeCl<sub>3</sub>)

Ferric chloride แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) เพอริคลอไรด์ที่ปราศจากน้ำผลึก มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ FeCl<sub>3</sub> น้ำหนักโมเลกุล 162.206 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีสีเกือบดำ เมื่อเป็นแผ่นผลึกขนาดเล็กละเอียดจะมีลักษณะมันวาวเหมือนโลหะ ที่อุณหภูมิ 305 องศาเซลเซียส จะระเหิดกลายเป็นไอ จุดหลอมเหลวที่ 332 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 2.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และผลึกเป็นประเภทไฮโกรสโคปิก (hygroscopic) ที่แรง ทำให้สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ ซึ่งจะทำให้เกิดชุดของโครงสร้างของน้ำผลึกหลายแบบ คือ FeCl<sub>3</sub> · xH<sub>2</sub>O เมื่อ x เท่ากับ 6, 3.5, 2.5, 2

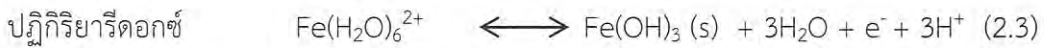
2) เพอริคลอไรด์หกน้ำผลึก มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O น้ำหนักโมเลกุล 270.30 มีจุดหลอมเหลว 37 องศาเซลเซียส ผกที่มีโครงสร้างแบบโมนอคลินิก (monoclinic crystal) จะมีสีน้ำตาล-เหลืองหรือส้ม โดยมีโครงสร้างทางเคมีคือ [FeCl<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>]<sup>+</sup> Cl<sup>-</sup> · 2H<sub>2</sub>O

Ferric chloride (FeCl<sub>3</sub>) ส่วนใหญ่นำมาใช้ในรูปของสารละลายเจือจาง โดยใช้เป็นสารช่วยจับตะกอน (flocculating agent) และสารตกตะกอน (precipitating agent) ในระบบบำบัดน้ำ โดย FeCl<sub>3</sub> จะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำเกิดเป็น Fe(OH)<sub>3</sub> ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดซับของแข็งที่มีขนาดเล็กและอนุภาคของคอลลอยด์ FeCl<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพที่ดีโดยเฉพาะในการตกตะกอนสารโลหะหนักและซัลไฟด์ นอกจากนี้ในกรณีของน้ำมันและสารโพลิเมอร์ที่ยากต่อการย่อยสลายก็สามารถถูกดูดซับบน Fe(OH)<sub>3</sub> ได้

### 2.1.3 เหล็ก (Iron)

เหล็กออกไซด์มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนที่เกาะอยู่กับเหล็กว่ามากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe<sup>2+</sup>) และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe<sup>3+</sup>) ซึ่งเป็นเหล็กที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ เป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ในน้ำได้ และปรากฏอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (hydrate ion) หรือ Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub><sup>n+</sup> โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าเหล็กนั้นอยู่ในรูปใด เช่น

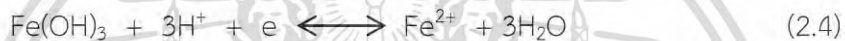
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



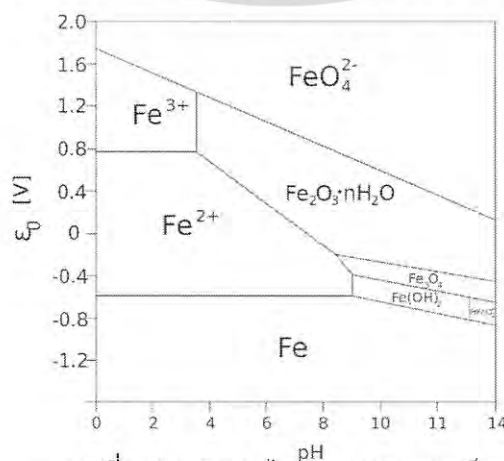
รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือกับสารอนินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (organometallic compound) ได้อีกด้วย

### 2.1.3.1 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก

ปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำเสีย คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ไอออนที่ละลายน้ำได้ เหล็กจึงถูกปลดปล่อยและเกิดการปนเปื้อนดังสมการ (2.4)



โดยในการอธิบายถึงระบบที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน การสร้างไดอะแกรมแบบสองตัวแปร (two-variable diagram) เพื่อใช้ในการศึกษาจึงมีความแม่นยำกว่าพิจารณาได้จาก pE/pH ไดอะแกรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าเลขตรอนแอคติวิตี (electron activity) และค่าไฮโดรเจนแอคติวิตี (hydrogen activity : pH) ที่สามารถบอกถึงสภาวะออกซิไดซ์และสภาวะรีดิวซ์ของระบบได้ แต่เนื่องจากระดับของ electron activity ของน้ำแปรผันได้ในช่วงกว้างมาก จึงนิยมให้ pE เป็นตัวแทนในการแสดงค่า electron activity โดย  $pE = -\log a_e$  ดังนั้นเมื่อ pE มีค่าเป็นลบ แสดงว่าสารละลายมีค่า electron activity สูง ระบบอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ในขณะที่ค่า pE เป็นบวก นั่นคือในสารละลายมีค่า electron activity ต่ำ ระบบจึงอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ โดย pE เป็นบวก นั่นคือในสารละลายมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงและรูปแบบหลัก (dominant species) ของไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ยังคงแตกต่างกันแม้ที่ระดับพีเอชเท่ากัน เกิดจากค่าคงที่ของการละลาย ( $K_{sp}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน โดยสารที่มีค่าคงที่ของการละลายมาก หมายถึงสามารถละลายได้มากและการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ

### 2.3.1.2 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxides)

เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมตัวอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งครอบคลุมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรตได้ง่าย สามารถพบได้ตามธรรมชาติทั้งในดิน ดินเหนียว และตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น มีรูปแบบทางเคมี เช่น  $Fe(OH)_3$  (ferric hydroxide),  $FeO$  (ferrous oxide),  $Fe_2O_3$  (ferric oxide),  $Fe_3O_4$  ซึ่งก็คือ  $FeO \cdot Fe_2O_3$  (ferrous ferric oxide หรือเรียกว่า magnetite) และ  $FeOOH$  เรียกว่า goethite เป็นต้น

เหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไทต์ ( $FeOOH$ ) และฮีมาไทต์ ( $Fe_2O_3$ ) เกิดจากเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซิไฮดรอกไซด์และออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ซึ่งอยู่ในสภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำหรือ pH สูง แต่อุณหภูมิต่ำจะนำไปสู่การเกิดเกอร์ไทต์ ส่วนสภาวะที่ pH ต่ำ ( $pH < 4$ ) และอุณหภูมิสูงๆจะทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ อย่างไรก็ตามเมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำ สารละลายเกลือเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) จะเกิดเป็น amorphous ferrihydrite ( $FeOOH$ ) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 3-5 nm หลังจากล้างและทำให้แห้งแล้วจะมีพื้นผิว 225-340  $m^2/g$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง ประมาณ 4 nm แต่ถ้าให้ความร้อนที่ 400-700 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า 20  $m^2/g$  และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงโดยเฉลี่ยเป็น 100 nm ส่วนแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ  $Fe_2O_3$  หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $Fe(OH)_2$

## 2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผักตบชวา

### 2.2.1 ผักตบชวา



รูปที่ 2.5 ผักตบชวา

อาณาจักร :	พืช (Plantae)
หมวด :	Liliopsida
ชั้น :	Commelinidae
อันดับ :	Commelinales
วงศ์ :	Pontederiaceae
สกุล :	<i>Eichhornia</i>
สปีชีส์ :	<i>E. crassipes</i>
	<i>Eichhorniacrassipes</i>

ผักตบชวาจัดเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่เข้ามาแพร่ระบาดรุกรานจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศในประเทศไทย มีการแพร่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วใน 1 เดือน ผักตบชวาเพียง 1 ต้นอาจขยายพันธุ์ได้มากถึง 1,000 ต้น ถึงแม้ว่าจะแห้งจนต้นตายแต่เมล็ดของมันก็ยังมีชีวิตต่อไปได้นานถึง 15 ปี และทันทีที่เมล็ดได้รับน้ำที่เพียงพอมันก็จะแตกหน่อเป็นต้นใหม่ต่อไป จนกลายเป็นปัญหาทางน้ำและทวีความรุนแรงจนเป็นปัญหาระดับประเทศ ทำให้รัฐบาลต้องเสียงบประมาณในการกำจัดผักตบชวาจำนวนมาก ซึ่งไม่เพียงแต่ประเทศไทยเท่านั้น อีกกว่า 50 ประเทศทั่วโลกก็เจอปัญหาเช่นเดียวกัน เว้นแต่ประเทศในแถบยุโรปเท่านั้นที่ปลอดการรบกวน และบริเวณที่ถูกผักตบชวาคุกคามมากที่สุดคือ ทะเลสาบวิกตอเรีย ซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญของทวีปแอฟริกา.

ผักตบชวาเป็นพืชที่ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะช่วงฤดูฝนจึงมีปริมาณมากในช่วงนั้น เกิดจากสารเคมีที่เราใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น ผงซักฟอก ปุ๋ย ซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืชน้ำ โดยเฉพาะกับผักตบชวาเป็นอย่างดี ทำให้กีดขวางการเดินทางของน้ำ อัตราการไหลของน้ำจึงลดลงและกีดขวางการระบายน้ำของประตุน้ำ อีกทั้งยังทำให้ระบบนิเวศเสียหายซึ่งผักตบชวาสามารถดูดซึมธาตุอาหารที่เป็นตัวการทำให้น้ำเสียแต่เมื่อมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตใต้น้ำ กล่าวคือ สัตว์ใต้น้ำจะขาดออกซิเจนและตายลง รวมถึงการบดบังแสงแดดที่เป็นส่วนหนึ่งของการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำจะทำให้พืชเหล่านั้นเน่าและตายไป ดังนั้นจึงเกิดน้ำเน่าเสียอย่างง่ายตายรวมทั้งทำลายระบบนิเวศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ประโยชน์

- การบริโภค ดอกอ่อนและก้านใบอ่อนกินเป็นผักลวกจิ้ม น้ำพริกหรือทำแกงส้ม
- ใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ เช่น หมู ใช้ทำปุ๋ยหมัก
- เยื่อสานจากผักตบชวา
- ด้านสมุนไพร ใช้แก้พิษภายในร่างกาย และขับลม ใช้ทาหรือพอกแก้แผลอักเสบ

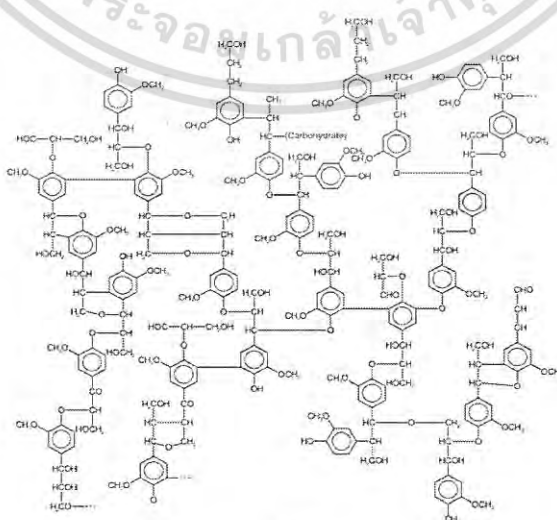
## 2.2.3 บทบาทในการกำจัดน้ำเสีย

ผักตบชวาสามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยการทำหน้าที่กรองน้ำที่ไหลผ่านกอผักตบชวาอย่างช้าๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้นกรองออก นอกจากนี้ ระบบรากที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด และจุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่ราก จะช่วยดูดสารอินทรีย์ได้ด้วยอีกทางหนึ่ง รากผักตบชวาจะดูดสารอาหารที่อยู่ในน้ำ ทำให้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจึงถูกกำจัดไป อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำเสียนั้น ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน พบว่าผักตบชวาสามารถดูดไนโตรเจนได้ทั้ง 3 ชนิด แต่ในปริมาณที่แตกต่างกันคือ ผักตบชวาสามารถดูดอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนในรูปอื่น ๆ คือ ประมาณ 95% ขณะที่ไนเตรทไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนจะเป็นประมาณ 80% และ 7% ตามลำดับ สถานที่แรกในประเทศไทยที่ใช้การบำบัดด้วยวิธีนี้คือ "บึงมักกะสัน" ซึ่งเป็นโครงการบึงมักกะสันอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยใช้หลักการบำบัดน้ำเสียตามแนวทฤษฎีการพัฒนาโดยการกรองน้ำเสียด้วยผักตบชวา (Filtration)

## 2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านชีวภาพ

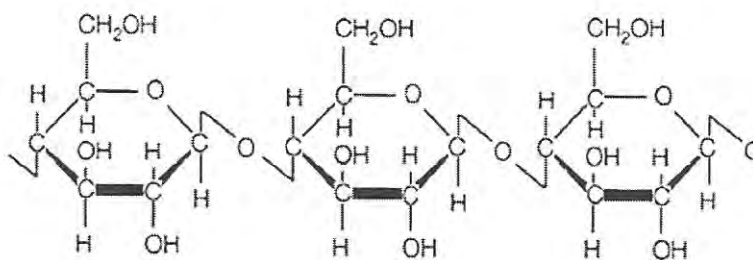
### 2.3.1 ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) หมายถึง ชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบหลัก เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นตัวยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน และลิกนินทำหน้าที่ให้เส้นใยเหล่านี้มีการยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ (ก) ลิกนิน (ข) เซลลูโลส

### 2.3.2 คุณสมบัติและประโยชน์ของถ่านชีวภาพ

1. มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนต่ำกว่าถ่านกัมมันต์
2. ลักษณะของถ่านชีวภาพที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันจะมีสีดำตลอด (Uniformly Black) เมื่อหักถ่านแล้วจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny Surface)
3. เป็นที่อยู่ของพวกจุลินทรีย์
4. บริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนจะมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆและกลุ่มอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ
5. ถ่านชีวภาพจะสลายตัวช้ากว่าถ่านชีวมวล (Uncharred biomass)
6. ผลลัพธ์คือ เกิดการกักเก็บคาร์บอนในดิน ลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาว เป็นการช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ช่วยปรับปรุงดินและผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเมื่อนำถ่านชีวภาพลงในดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยกักเก็บน้ำและอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น
7. ช่วยผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลด้วยการแยกสลายด้วยความร้อนจะให้พลังงานชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการขนส่งและในระบบอุตสาหกรรมได้
8. ช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการกำจัดของเสียที่ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้
9. ช่วยลดความจำเป็นในการใช้ปุ๋ย ผลลัพธ์คือสามารถลดการปล่อยมลพิษจากการผลิตปุ๋ยและสารอาหารที่ลดลง
10. ถ่านชีวภาพช่วยลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ก๊าซเรือนกระจก)
11. สามารถนำกากของเสียทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อช่วยลดก๊าซมีเทนและก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่ายและทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 8.65 ค่า Mohs hardness 2.0 ค่า refractive index 1.13 จุดหลอมเหลว (m.p.) 302.9°C จุดเดือด (b.p.) 767°C มีความดันไอ (vapor pressure) 1.4 mm ที่ 400°C และ 16 mm ที่ 500°C ดังนั้นเมื่อการใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเหล็ก และการเผาของเสียจะทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อนและไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO)

นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจาง ซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์แต่มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น cadmium sulfate ( $\text{CdSO}_4$ ), cadmium nitrate ( $\text{CdNO}_3$ ), cadmium chloride ( $\text{CdCl}_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำและแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ cyanides และ amines

### 2.4.1 ระดับแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

#### 1. ในบรรยากาศทั่วไป

จากการตรวจวัดความเข้มข้นของแคดเมียมในอากาศของประเทศต่างๆ พบว่าแคดเมียมในบรรยากาศเขตชนบทและเขตเมืองมีระดับค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณ  $0.0001 - 0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ดังนั้นแคดเมียมที่ร่างกายจะได้รับโดยการหายใจจึงค่อนข้างน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ได้รับจากอาหาร สำหรับประเทศไทยมีการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศบริเวณใกล้เคียงกับโรงงานถลุงสังกะสีจังหวัดตาก ในรัศมีประมาณ 1 กิโลเมตร โดยการตรวจวัดในรูปฝุ่นตก พบว่ามีระดับต่ำมาก คือ น้อยกว่า  $0.003 \mu\text{g}/\text{m}^3$

#### 2. ในสภาพแวดล้อมการทำงาน

จากการตรวจวัดระดับแคดเมียมในสภาพแวดล้อมการทำงานของโรงงานถลุงสังกะสี จังหวัดตาก ในปี 2528 - 2530 พบว่ามีระดับแคดเมียมในบรรยากาศเฉลี่ย 24 ชั่วโมงมีค่าประมาณ  $0.007 - 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และจากการตรวจวัดเช่นเดียวกันโดยสำนักคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เมื่อเดือนมกราคม 2529 และโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีเดียวกันมีค่าเท่ากับ  $0.0003 - 0.0033 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และน้อยกว่า  $0.0033 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่มีกำหนดโดยกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ซึ่งกำหนดไว้ดังนี้

- ความเข้มข้นของฝุ่นแคดเมียมในบรรยากาศการทำงานโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ ไม่เกิน  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และความเข้มข้นที่อาจยอมให้มีได้ คือ  $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$

- ความเข้มข้นของฟุ้งแคดเมียม (Cadmium Fume) โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทำงานปกติ ไม่เกิน  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  และความเข้มข้นที่ยอมให้มีได้ คือ  $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$

### 3. ในน้ำ

จากการตรวจวัดระดับแคดเมียมในตัวอย่งน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างพบว่ามีค่าระหว่าง 0.85 - 2.28 ppb จากการตรวจวัดในเดือนมกราคม 2519 และวัดน้ำในเดือนพฤษภาคมปีเดียวกันมีค่าระหว่าง 0.95 - 2.34 ppb ซึ่งมีค่าสูงกว่าการตรวจพบในต่างประเทศ และยังมีรายงานการตรวจวัดคุณภาพของน้ำบริเวณอ่าวไทยในปี 2526 พบว่ามีระดับแคดเมียมระหว่าง 0.007 - 0.12  $\mu\text{g/L}$  จากการตรวจวัดจาก 6 สถานีเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดระดับโลหะหนักในแหล่งน้ำในเขตราชบุรีบูรณะ (กรุงเทพมหานคร) ซึ่งเป็นเขตอุตสาหกรรมและชุมชนแออัด ในช่วงเดือนกันยายน 2539 ถึงเดือนเมษายน 2540 พบว่ามีระดับแคดเมียมในน้ำอยู่ระหว่าง 0.04 - 0.12  $\mu\text{g/L}$  ซึ่งต่ำมาตรฐานที่กำหนดไว้มีแยกไว้ 2 ประเภทคือ

1. มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินที่ไม่ใช่ทะเลที่กำหนดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน คือ

- ในน้ำมีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ไม่เกินกว่า 100  $\mu\text{g/L}$  ระดับแคดเมียมต้องไม่เกิน 0.005  $\mu\text{g/L}$

- ในน้ำมีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  เกินกว่า 100  $\mu\text{g/L}$  ระดับแคดเมียมต้องไม่เกิน 0.05  $\mu\text{g/L}$

2. มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

- ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ในระดับน้ำที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 0.03  $\mu\text{g/L}$

## 2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิส

### 2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นของแข็งและของเหลวที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนจำนวนมาก โดยองค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 300 - 500°C (Azargohar. *et al*, 2013) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำมัน ถ่านชีวภาพและแก๊สเชื้อเพลิงผสมที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า แบบปานกลาง แบบเร็ว และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่วิธีการที่นิยมใช้คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ถ่านชีวภาพที่ได้เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในสภาวะอุณหภูมิปานกลาง อัตราการให้ความร้อนต่ำและใช้ระยะเวลาในการเผาที่นาน

ตารางที่ 2.1 อธิบายพารามิเตอร์และผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการ	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการความร้อน	ระยะเวลาในการเผา	%ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้		
				น้ำมัน	ถ่าน	แก๊ส
แบบช้า	300 - 550	น้อยกว่า 50 °C/นาที่ (0.1 - 0.8 °C/นาที่)	5 - 30 นาที หรือ 25 - 35 ชั่วโมง	20 - 50	25 - 35	20 - 50
แบบปานกลาง	300 - 450	200 - 300 °C/นาที่ (3 - 5 °C/นาที่)	น้อยกว่า 10 นาที	30 - 35	25 - 40	20 - 30
แบบรวดเร็ว	300 - 1000	10 - 1,000 °C/วินาที	น้อยกว่า 2 วินาที	60 - 75	10 - 25	10 - 30

### 2.5.2 วิธีการไพโรไลซิส

วิธีการไพโรไลซิสแบ่งตามวิธีการให้ความร้อนได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

1. การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสต่อวินาทีและอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันดินและถ่านชีวภาพ

2. การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Flash หรือ Fast Pyrolysis) คือ การไพโรไลซิส โดยให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาทีและอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400 - 1,000 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซและของเหลว

## 2.6 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ

### 2.6.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารถูกดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับและสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา ระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือ ของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก ซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้ เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว - ของเหลว, ก๊าซ - ของเหลว, ก๊าซ -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็ง และของเหลว - ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว - ของแข็ง (Liquid – Solid Interface)

ในการดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

## 2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

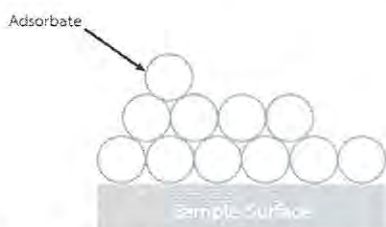
ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

### 1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งแรงนี้มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือแก๊สที่ควบแน่นนั้นจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของสารองค์ประกอบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ และคายความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรือเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่า การคายซับ ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ สมมติฐานของการดูดซับทางกายภาพ มีดังนี้

- 1) การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
- 2) การดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์
- 3) พลังงานในการดูดซับต่ำ ( $\Delta H < 20 \text{ kJ.mol}^{-1}$ )
- 4) พลังงานการกระตุ้นต่ำ
- 5) การดูดซับเป็นแบบผันกลับได้

6) เกิดการดูดซับขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้วโดยไม่จำกัด จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับแบบหลายชั้น แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การดูดซับแบบหลายชั้น (สุพะไชย์, 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การดูดซับทางเคมี

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพโดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวถูกดูดซับลดลง และมีความร้อนเกิดขึ้น สำหรับการดูดซับแบบนี้ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับค่อนข้างน้อย เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วบนพื้นที่ผิวทั้งหมด โดยการดูดซับทางเคมีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ถูกลดซับและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น องค์ประกอบบางชนิดไม่เกิดการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ สมมุติฐานของการดูดซับทางเคมี มีดังนี้

- 1) การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง
- 2) การดูดซับเกิดจากพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าตัวดูดซับ
- 3) พลังงานในการดูดซับสูง ( $50 \text{ kJ.mol}^{-1} < \Delta H < 800 \text{ kJ.mol}^{-1}$ )
- 4) พลังงานการกระตุ้นสูง
- 5) เกิดการดูดซับบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่บนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่าการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การดูดซับแบบชั้นเดียว (สุพะไชย์, 2555)

### 2.6.3 กลไกการดูดซับ (นิพนธ์, 2550)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับ กระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

## 2.6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

การนำถ่านมาใช้ในกระบวนการดูดซับนั้นอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 1.) ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านตามชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ดังนั้นถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามี่ความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถังการดูดซับ คือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น (ลลิตา, 2554)

### 2.) ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือถ้าตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย มีค่ามาก โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่สูง ส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า (ยุวรัตน์, 2544)

### 3.) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้นประกอบด้วยมีโครงสร้างรูพรุน ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะขบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเป็นส่วนใหญ่ (ยุวรัตน์, 2544)

### 4.) ขนาดของตัวดูดซับ

ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุน เมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลงพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงตามไปด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ (ยุวรัตน์, 2544)

### 5.) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูพรุนจะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย เพราะตัวถูกละลายสามารถเข้าไปในรูพรุนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ (ยุวรัตน์, 2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชจะมีผลต่อการดูดซับหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับกล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุลบแล้ว สารละลายมีค่าพีเอชต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับในตัวดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะมีผลในทางตรงกันข้ามเมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อย จึงลดการแย่งจับหรือการดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ก็จะมีให้ผลในทางตรงกันข้าม (ณัฐพร, 2556)

## 7.) อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับเป็นประเภทใด ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิต่ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับได้มากขึ้น (ณัฐพร, 2556)

## 8.) ระยะเวลาในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (กุลธิดา, 2557)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Anzeze และคณะ (2014) ใช้ผักตบชวาในส่วนรากมาดูด Pb (II) พบว่าค่าความสามารถในการบำบัดต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ( $Q_m$ ) เท่ากับ 16.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าน้อย Sarkar และคณะ (2017) ใช้ผักตบชวาในส่วนเหนือราก ทำเป็นผงและบรรจุในคอลัมน์ ทำการบำบัด Cr (IV) และ Cu (II) พบว่า 99% ของโลหะถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่จะบอกถึงค่าความสามารถในการบำบัดต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ( $Q_m$ ) ไม่ได้ศึกษาไว้ Sadeek และคณะ (2015) ดูดซับไอออนของ Cu, Co และ Fe โดยใช้เปลือกข้าว ใบปาล์ม ผักตบชวา และได้พบว่าผักตบชวาดูดซับได้น้อยที่สุด

2.7.2 Cheng และคณะ (2016) พบว่าถ่านชีวภาพที่ทำจากเปลือกถั่ว ดูด Cd (II) ได้ดีกว่าเปลือกถั่วที่ไม่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และใช้เวลา 12 ชั่วโมงจึงจะถึงสมดุล

2.7.3 Zhang และคณะ (2015) นำผักตบชวาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 250°C - 550°C แล้วไปดูดซับ Cd (II) จากการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450°C จะดูดซับได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด ( $Q_m$ ) คือ 70.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งนับว่าไม่สูงมากนัก และต้องใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมงจึงจะถึงสมดุล ซึ่งนับว่านานเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 Cui และคณะ (2016) นำพุทธรักษาไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 - 600°C จากการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C จะดูดซับ Cd ได้ดีที่สุด มีค่า  $Q_m$  เท่ากับ 188.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

2.7.5 Zheng และคณะ (2016) ถ่านชีวภาพได้ถูกนำมาพัฒนาโดยใช้หลายกระบวนการด้วยกัน เช่น กระตุ้นด้วยไอน้ำ เพิ่มรูพรุนโดยใช้กรด ใช้เบส การเคลือบด้วยเกลือหรือออกไซด์ของโลหะ

2.7.6 Ahmed และคณะ (2016) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลและชี้ว่า วิธีการทำถ่านชีวภาพให้มีสภาพแม่เหล็กเป็นวิธีที่น่าทำการศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากกระบวนการได้มาซึ่งตัวดูดซับดังกล่าวมีหลายวิธี แต่ละวิธีอาจได้มาซึ่งตัวดูดซับที่มีความสามารถดูดซับที่ต่างกัน และงานวิจัยในเรื่องนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัด

2.7.7 Han และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำเปลือกถั่ว 10 กรัมที่บดแล้วไปแช่ในสารละลาย 2 โมลาร์  $FeCl_3$  80 มิลลิลิตร 0.5 ชั่วโมง ใช้แห้งปั่นกวนแม่เหล็กและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70°C เขย่าต่ออีก 0.5 ชั่วโมง นำไปกรองสารละลายทิ้งไป นำตัวดูดซับไปเผาในอุณหภูมิที่ต่างกันดังนี้คือ 450°C, 500°C, 550°C, 600°C และ 650 °C โดยในช่วงแรกให้ความร้อนที่อัตรา 5°C ต่อนาที เผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น ล้างน้ำหลายครั้ง นำไปอบให้แห้งที่ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปทดสอบการดูดซับ ผลการทดลองคือ biochar/ $Fe_2O_3$  มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า biochar 1-2 เท่า การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะดีขึ้น เมื่อเผาที่ 650°C ประสิทธิภาพการดูดซับจะเป็น 77.542 มิลลิกรัมต่อกรัม ในทางกลับกันถ้าเป็นถ่านชีวภาพที่ไม่เป็นสภาพแม่เหล็กเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับจะแยกลง ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าค่า  $R^2$  ของ Elovich > second order > first order การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์

2.7.8 Shang และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำกากสมุนไพร Astragalus mongholicus มาเผาที่ 400°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในสภาพไร้อากาศ จะได้ถ่านชีวภาพนำไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ เพื่อล้างขี้เถ้าออก จากนั้นเทสารละลายผสมเฟอร์ริกและเฟอร์รัสไอออน (ในสารละลายประกอบด้วย  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ , 30 g และ  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , 16.7 กรัม ละลายในน้ำ 900 มิลลิลิตร) ลงในน้ำ 300 มิลลิลิตรที่มีถ่านชีวภาพอยู่ 30 กรัม ปรับ pH ของของผสมให้เป็น 10.5 ด้วย 10 โมลาร์ NaOH เขย่าที่ 25°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน ให้ความร้อนต่ออีก 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ 1 คืนที่อุณหภูมิห้อง กรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลหลายๆครั้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C - 60°C จนแห้ง จะได้ biochar/ $Fe_2O_3$  นำไปดูดซับ Cr (VI) ได้ค่า  $Q_m$  เท่ากับ 23.85 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ pH 2 การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับ 2

2.7.9 Trakal และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำเปลือกถั่ว ฟางข้าว ฟาง ก้านองุ่น กากองุ่น และเมล็ดลูกพลัม ไปล้างและอบแห้ง นำไปเผาที่ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ตั้งทิ้งไว้ 1 คืนภายใต้ก๊าซไนโตรเจน จะได้ถ่านชีวภาพ นำไปบดและร่อนผ่าน

ตะแกรงขนาด 0.25 – 0.50 มิลลิเมตร ล้างและอบแห้งที่ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักที่คงที่ นำไปปรับปรุงคุณภาพต่อ โดยนำถ่านชีวภาพ ใส่ลงในสารละลายที่มี 1 กรัมของ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ละลายอยู่ในน้ำ 100 มิลลิลิตร เขย่าในเข้ากัน เติม 1 โมลาร์ NaOH ลงไปจนสารละลายมี pH เป็น 12 ระหว่างนี้  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  จะตกตะกอน เจือจางสารละลายจนมีปริมาตรเป็น 200 มิลลิลิตร ใส่เข้าไมโครเวฟตามบ้าน ขนาดกำลัง 700 W, 2450 MHz เป็นเวลา 10 นาที จะได้แม่เหล็กที่เป็นเหล็กออกไซด์ที่มีขนาดนาโนเมตร โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 25 - 100 นาโนเมตร ล้างน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง อบให้แห้งที่ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปดูดซับ Cd (II) และ Pb (II) ผลการทดลองคือสำหรับเปลือกถั่วและเมล็ดพลัม ตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพนี้จะดูดซับ Cd (II) ได้ดีขึ้นกว่าเดิม 10-16 เท่า แต่สำหรับกำมะถัน ดูดซับ Pb (II) ได้น้อยลง

2.7.10 Zhang และคณะ (2015B) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพ โดยนำผักตบชวาที่บดแล้วไปแช่ในสารละลาย  $\text{FeCl}_3$  24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่ 80°C จนแห้ง นำไปเผาที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสภาพไร้อากาศ ล้างและอบจนแห้งที่ 80°C จะได้ biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จากนั้นนำ biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ไปซั่ง 6 กรัมแห้งลงในสารละลายโคโตซาน (ในสารละลายประกอบด้วยโคโตซาน 6 กรัมละลายอยู่ใน 1,000 มิลลิลิตรของ 2% กรดอะซิติก) เขย่า 30 นาทีที่ 40°C จากนั้นเติม กลูตาอัลดีไฮด์ 1% ปริมาตรต่อปริมาตร ลงไปโดยยังคงเขย่าต่ออีก 30 นาทีที่ 40°C เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายจนมี pH เป็น 9 เขย่าต่ออีก 1 ชั่วโมง จะได้ chitosan - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  งานวิจัยพบว่า biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  สามารถดูด Cr (VI) ได้ค่า  $Q_m$  เท่ากับ 167.31 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ 40°C ส่วนถ่านชีวภาพที่ไม่ได้พัฒนาต่อ (biochar) สามารถดูด Cr (VI) ได้ 30 มิลลิกรัมต่อกรัม pH 2 เป็น pH ที่ดีที่สุด การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ เป็นการดูดความร้อน เกิดขึ้นได้เอง และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับ 2 ในการศึกษาผลของไอออนอื่นที่มีต่อการดูด Cr (VI) พบว่า  $\text{PO}_4^{3-}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  ขัดขวางการดูดซับมากที่สุด

2.7.11 Song และคณะ (2016) ได้ทำการปรับปรุงถ่านชีวภาพจากฟางข้าวฟาง โดยนำฟางข้าวไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช อบที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปเผาที่ 700°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในสภาพไร้อากาศ โดยในช่วงแรกให้ความร้อนที่อัตรา 10°C ต่อนาที จากนั้นนำไปร่อนในตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร ล้าง อบที่ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านชีวภาพ (biochar) จากนั้นนำไปแช่ลงในสารละลาย  $\text{FeCl}_3$  (ในสารละลายประกอบด้วย  $\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  40 กรัมละลายอยู่ในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปเผาในแบบเดียวกับข้างต้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  นำไปร่อนให้มีขนาดในช่วง 0.5 - 0.8 มิลลิเมตร แล้วนำไปดูดซับ ส่วน chitosan-biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เตรียมโดยซั่ง biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3 กรัมใส่ลงใน 100 มิลลิลิตร 2% กรดอะซิติก ที่มีโคโตซาน 3 กรัมละลายอยู่ เขย่า 30 นาที จากนั้นค่อยๆเติมสารละลายที่ละลายลงใน 900 มิลลิลิตร 1.2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน กรองเอาสารละลายทิ้งไป แล้วล้าง chitosan - biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งที่ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า chitosan-biochar/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ดูดซับ Cu (II) and Cd (II) ได้ 131.19 และ 105.26 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ และอัตราการดูดซับเป็นไปตามการดูดซับอันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.12 Teixeira และ Arruda (2004) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะจากสารชะล้าง โดยการใช้แกลบเป็นสารดูดซับ เนื่องจากแกลบมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและ ซิลิกา เมื่อศึกษาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีและเทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry) พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของแกลบมีตำแหน่งที่สามารถจับกับไอออนของโลหะได้ โดยในการทดลอง พบว่าแกลบสามารถดูดซับ  $Cd^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ได้นอกจากนี้ยังพบว่าแกลบสามารถดูดซับไอออนของ โลหะตัวอื่นๆได้อีก เช่น  $Al^{3+}$  และ  $Zn^{2+}$  เป็นต้น

2.7.13 Ajmal และคณะ (2003) ได้ศึกษาสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะบางชนิดจากน้ำเสีย ด้วยแกลบ ซึ่งได้นำแกลบที่เติมและไม่เติมฟอสเฟตมาศึกษาการดูดซับ  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cr^{4+}$  ผล พบว่าเมื่อตัดแปลงแกลบโดยเติมฟอสเฟต สารดูดซับที่เตรียมได้สามารถดูดซับ  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  และ  $Cr^{4+}$  ได้โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะบางชนิดบนสารดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส ความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับ และ pH ของสารละลาย รวมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และปัจจัยทางเทอร์โม ไดนามิก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท Science Engineer International Co., LTD. ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker บริษัท Bruker Biospin AG ประเทศไทย
4. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AAS - 200 New บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องกรองลดความดัน (Filter Pressure) รุ่น Aspirator A - 35 ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
6. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort ประเทศเบลเยียม
7. ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital shaker ยี่ห้อ Gallenkamp บริษัท Jepsen & Jessen Technology ประเทศเยอรมนี
10. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
11. กระดาษกรอง (Filter papers) ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 42
12. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
13. ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
14. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ยี่ห้อ DURAN ประเทศเยอรมนี

##### 3.1.2 สารเคมี

1. เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride,  $\text{FeCl}_3$ ) บริษัท QRëC เกรตวึเคาระห์
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรตวึเคาระห์
3. กรดอะซิติก (Acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) บริษัท LAB-SCAN เกรตวึเคาระห์
4. สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลโฟเนต (Sodium dodecyl sulfate (SDS),  $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ ) บริษัท CARLO ERBA เกรตวึเคาระห์
5. แคดเมียมไนเตรตเตตราไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate,  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท Fluka เกรตวึเคาระห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) ยี่ห้อ Loba Chemie, บริษัท Loba Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย เกรดห้องปฏิบัติการ
7. กรดไฮโดรคลอริก (conc. HCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม เกรดวิเคราะห์
8. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม เกรดวิเคราะห์

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ (วิธีปรับปรุงมาจากการทดลองของ Han และคณะ (2016), Song และคณะ (2016) และ Zhang และคณะ (2015))

1. นำผักตบชวามาล้างด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาด
2. ตากแดดให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักแห้งแยกแต่ละส่วน ได้แก่ ราก ใบ และลำต้น เก็บตัวอย่างไปหาความชื้น
3. บดราก ใบ และลำต้นผักตบชวาให้ละเอียด จากนั้นนำไปร่อนในตะแกรงร่อนขนาด 35 mesh
4. นำส่วนของ ราก ใบ และลำต้น มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1.5 แล้วออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### ส่วนที่ 1 เตรียมตัวดูดซับถ่านชีวภาพ

นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่  $400^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลผลิตที่ได้คือถ่านชีวภาพ

#### ส่วนที่ 2 เตรียมตัวดูดซับถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก

นำไปแช่ในสารละลาย 2.5 โมลาร์  $\text{FeCl}_3$  ในอัตราส่วน 10 กรัมต่อปริมาตร 60 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ก่อนนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ที่  $650^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลผลิตที่ได้คือตัวดูดซับถ่านชีวภาพที่มีสภาพแม่เหล็ก

#### ส่วนที่ 3 เตรียมตัวดูดซับที่มีสภาพแม่เหล็กและเคลือบด้วยโซเดียมโตนาคิลซิลโพลีเมท

นำตัวดูดซับที่มีสภาพแม่เหล็กปริมาณ 50 กรัมแช่ลงในสารละลาย SDS 0.7236 กรัม ปริมาณ 250 มิลลิลิตร (~0.01 โมลาร์) นำไปให้ความร้อนที่  $50^\circ\text{C}$  และเขย่า 4 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษ Whatman 0.45 ไมครอน ล้างน้ำหลายครั้ง อบที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

1. ชั่งแคดเมียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) มา 2.7442 กรัม
2. ละลายด้วยน้ำกลั่น
3. เติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ความเข้มข้น 65% จน  $\text{pH} < 2$  เพื่อรักษาสภาพตัวอย่าง
4. ปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร (จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ)
5. จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ  $4^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และหลังการปรับปรุงคุณภาพ

วิเคราะห์ลักษณะรูพรุนและพื้นผิวโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM), ศึกษาหมู่ฟังก์ชันต่างๆในตัวอย่างดูดซับโดยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยวิธี X-ray diffraction (XRD) analysis และหาค่า Zero point charge

#### 3.2.3.1 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่าน (Zero point charge) ของตัวดูดซับ

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปรับ pH ของสารละลายเป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. เมื่อปรับ pH ได้ตามต้องการแล้วจึงใส่ตัวดูดซับ ปริมาณ 0.1000 กรัม ลงไปในขวดรูปชมพู่แล้วปิดฝาขวดให้สนิท
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH ภายหลังจากการเขย่าอีกครั้ง
5. นำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ( $pH_i$ ) และความเป็นกรด - เบสสุดท้าย ( $pH_f$ ) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นและความเป็นกรด - เบสสุดท้ายตัดกับเส้นทแยงมุม
6. ทำการทดลองข้อ 1 - 5 ขึ้น 3 ครั้ง

#### 3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

##### 3.2.4.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

1. น้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรับค่า pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 2 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่ง BC มา 100 มิลลิกรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์
3. นำมาใส่เครื่องเขย่า ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. เก็บน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ครั้งละ 5 มิลลิลิตรทุกชั่วโมง จนครบช่วง 6 ชั่วโมง (ยกเว้น SDS/Fe - BC จะต้องเก็บน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ทุกๆ 2 ชั่วโมงจนครบ 16 ชั่วโมง)
5. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปคโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
6. ทำการทดลองข้อ 1 - 5 ขึ้น 3 ครั้ง
7. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนค่า pH ของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จาก pH 2 เป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ (ยกเว้น BC ศึกษา pH ของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ pH 4 - pH 8) และเปลี่ยน BC เป็น SDS/Fe - BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่ง BC มา 100 มิลลิกรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์
3. นำมาใส่เครื่องเขย่า ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. เก็บน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ในเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1)
5. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
6. ทำการทดลองข้อ 1 - 5 ซ้ำ 3 ครั้ง
7. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับจาก 100 มิลลิกรัม เป็น 25 มิลลิกรัม, 300 มิลลิกรัม, 500 มิลลิกรัม และ 700 มิลลิกรัม ตามลำดับ และเปลี่ยน BC เป็น SDS/Fe - BC

### 3.2.4.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่ง BC ในปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.2) ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์
3. นำมาใส่เครื่องเขย่า ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
4. เก็บน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ในเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1)
5. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
6. ทำการทดลองข้อ 1 - 5 ซ้ำ 3 ครั้ง
7. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนความเข้มข้นจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเปลี่ยน BC เป็น SDS/Fe - BC

### 3.2.4.4 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.3) ปรับค่า pH ที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่ง BC ในปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.2) ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์
3. นำมาใส่เครื่องเขย่า ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เก็บน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ครั้งละ 5 มิลลิลิตรในเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1)

4. นำน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
5. ทำการทดลองข้อ 1 - 5 ซ้ำ 3 ครั้ง
6. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนอุณหภูมิห้อง เป็น 45°C และ 55°C ตามลำดับและเปลี่ยน BC เป็น SDS/Fe - BC

### 3.2.5. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

ศึกษาโดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin - Radushkevich และ Redlich - Peterson isotherm โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.4.3. มาวิเคราะห์

### 3.2.6. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม

โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.4.3. และ 3.2.4.4 มาวิเคราะห์

### 3.2.7. ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์

คำนวณค่า เอลท์ลิป ( $\Delta H^\circ$ ) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ หาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) และหาค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.4.4 มาวิเคราะห์

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมระหว่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารวบรวมลักษณะทางกายภาพด้วย Scanning Electron Microscope (SEM), Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) และ X-ray Diffractometer (XRD) และศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมโดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม อุณหภูมิ ตลอดจนศึกษาไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา

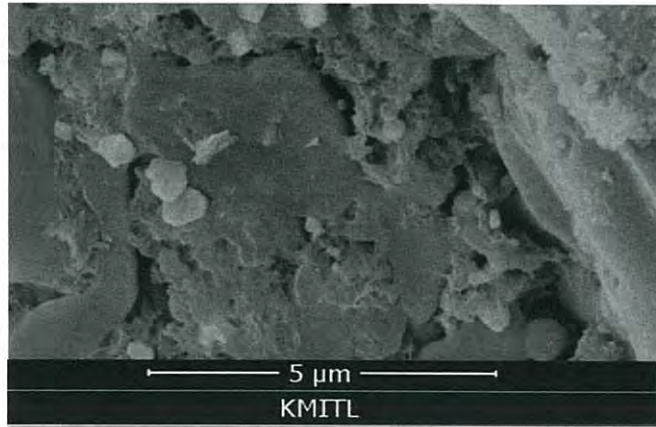
##### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

นำถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพไปบดให้เป็นผงละเอียดขนาด 35 mesh ลักษณะทางกายภาพภายในถ่านชีวภาพสามารถแสดงได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ด้วยกำลังขยาย 9000 เท่า ดังรูปที่ 4.1 (a) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของถ่านชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพ มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ไม่ปรากฏลักษณะความพรุนของพื้นผิว เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.1 (b) จะมีลักษณะพื้นผิวที่มีส่วนผสมของเพอริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ปะปนอยู่บนพื้นผิวหรือแทรกเข้าไปในรูพรุนอยู่ในลักษณะเป็นเศษผงสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตะเตคซิลลิลโฟเนท ดังรูปที่ 4.1 (c) พบช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมต่อกันอยู่อย่างเห็นได้ชัด



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)



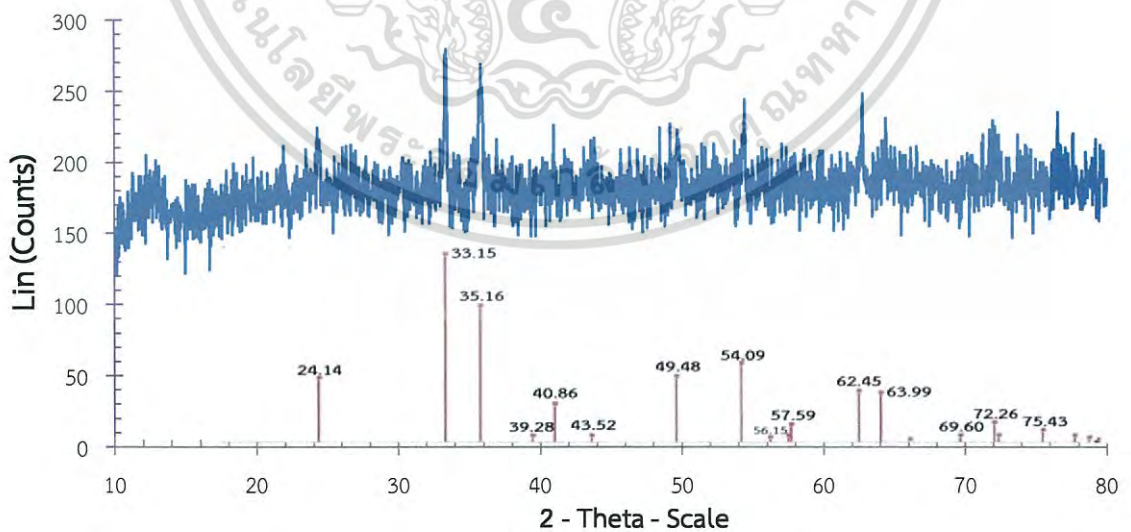
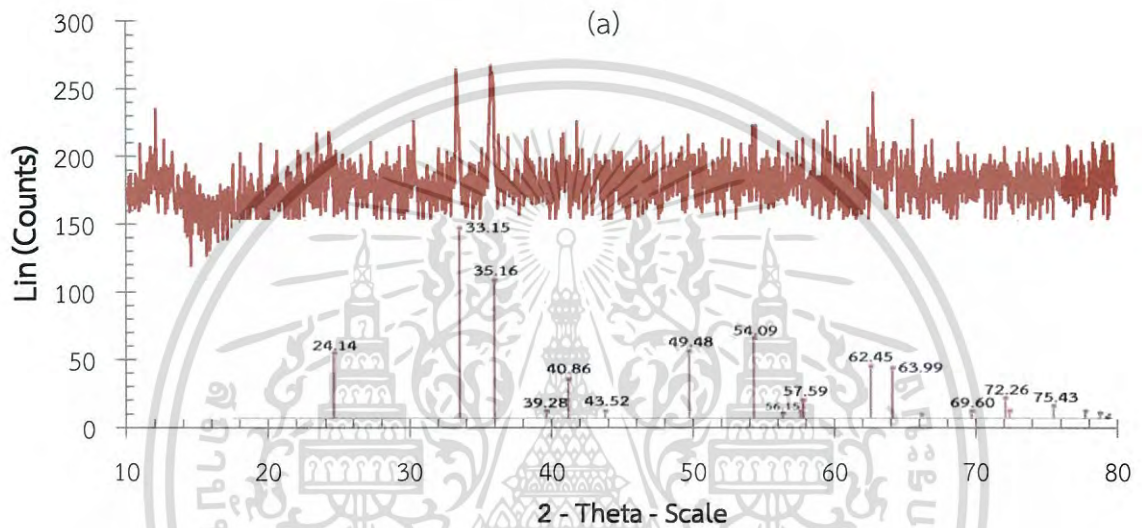
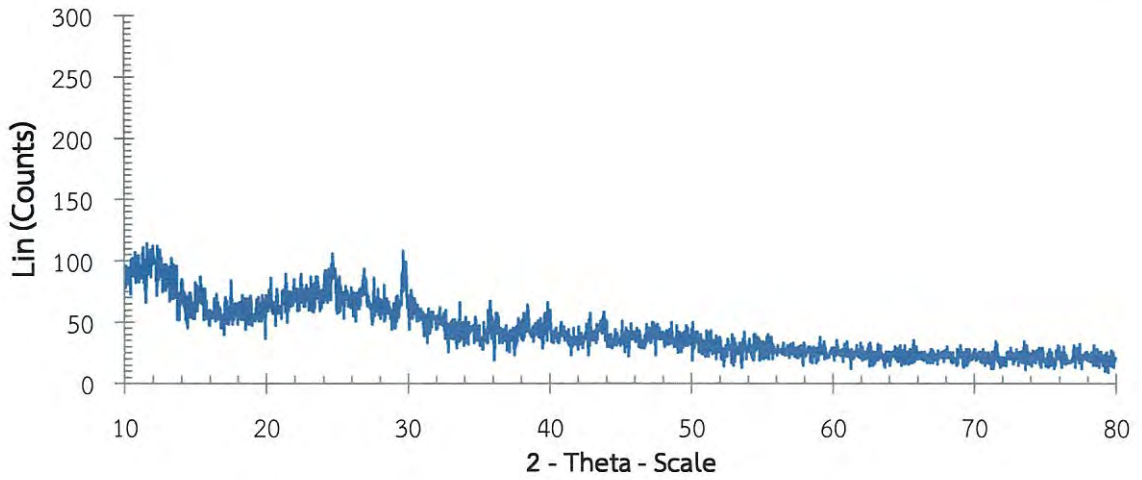
(c)

**รูปที่ 4.1** ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพจากกล้อง SEM กำลังขยาย 9000 เท่า  
(a) BC (b) Fe-BC (c) SDS/Fe-BC

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างและธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างถ่านชีวภาพด้วย X - Ray Diffractometer (XRD)

การศึกษารูปแบบของธาตุต่างๆในตัวอย่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อทำการวิเคราะห์สารประกอบของ BC แสดงดังรูปที่ 4.2 (a) Fe - BC แสดงดังรูปที่ 4.2 (b) และ SDS/Fe - BC แสดงดังรูปที่ 4.2 (c) บ่งบอกได้ว่าหลังการปรับปรุงคุณภาพ Fe - BC และ SDS/Fe - BC พบว่าที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ( $^{\circ}$ ) เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีคอย่างเห็นได้ชัดเด่นที่ช่วง 33.15, 35.61, 55.09, 77.73 และ 62.45 ทำให้ทราบได้ถ่านชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพที่นำมาวิเคราะห์หอยู่ในรูปผลึกออกไซด์ โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



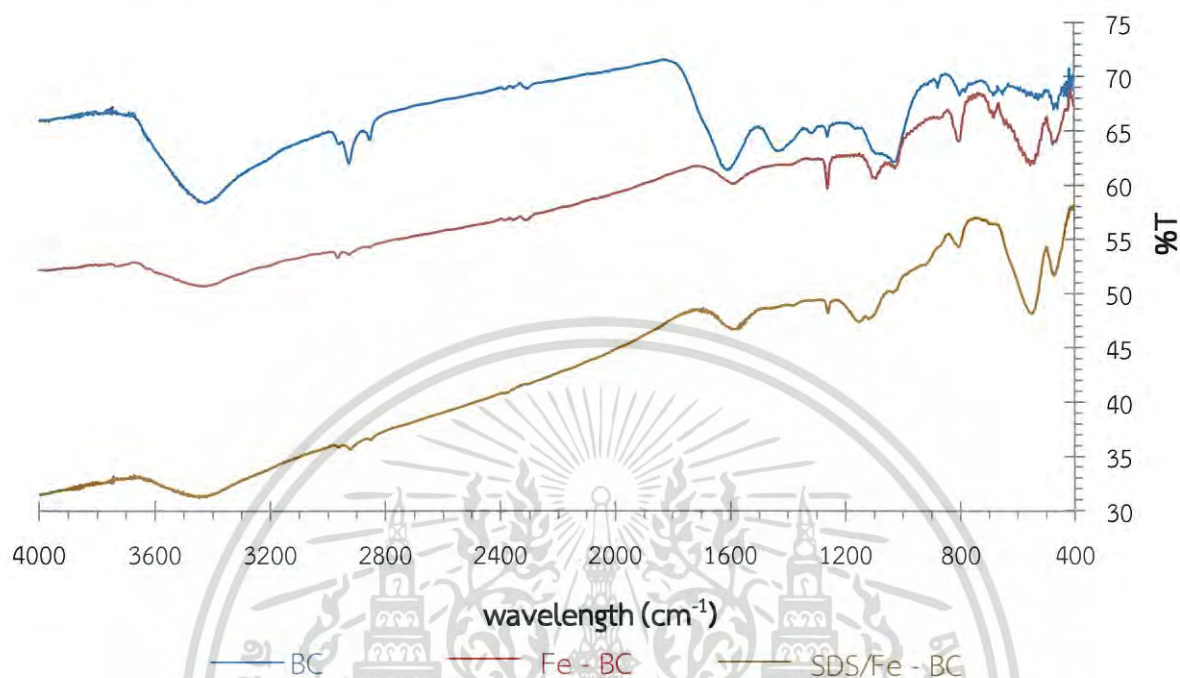
**รูปที่ 4.2** โครงสร้างทางจุลภาคและสารประกอบของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

(a) BC (b) Fe - BC (c) SDS/Fe - BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

นำถ่านผักตบชวาที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพและถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนต มาศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของผักตบชวาวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่างๆ

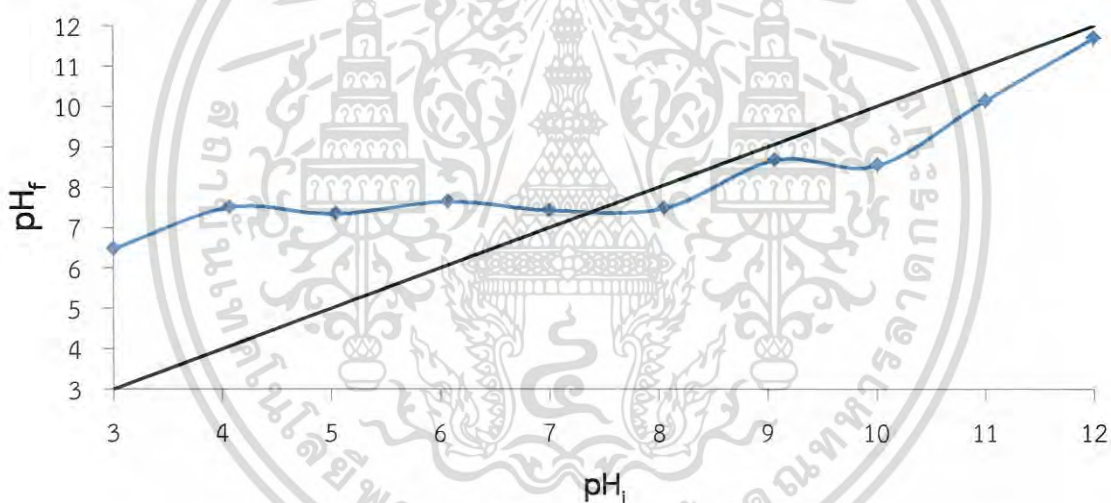
Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )			
ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนต	หมู่ฟังก์ชัน
3416.96	3344.62	3443.96	O-H
2924.13	2895.20	2963.13	C-H
1426.38	1450.56	1589.37	C-O (cellulose)
1262.43	1263.40	1261.47	C-O-C (ether)
-	-	1151.52	S=O (stretch)
-	795.65	804.33	C-Cl
-	-	550.69	Fe-O

จากตารางพบว่า เมื่อนำ BC มาวิเคราะห์สเปกตรัม พบหมู่ฟังก์ชัน O-H ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน, หมู่ C-H, หมู่ C-O และหมู่ C-O-C ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของผักตบชวา

เมื่อนำ Fe - BC และ SDS/Fe - BC มาวิเคราะห์ พบหมู่ฟังก์ชัน O-H, หมู่ C-H, หมู่ C-O และหมู่ C-O-C พบว่ามีเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของถ่านผักตบชวาลงเหลืออยู่ นอกจากนี้ Fe - BC จะพบหมู่ C-Cl ซึ่งเป็นโครงสร้างของเฟอริกคลอไรด์ ในขณะที่ SDS/Fe - BC จะเกิดการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันอื่นๆเพิ่มเติม จากการพบหมู่ S=O (stretching of sulfones) เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตคซิลซัลโฟเนท  $SO_4^- Na^+$  เป็นองค์ประกอบ อีกทั้งยังพบหมู่ C-Cl ซึ่งเป็นโครงสร้างของเฟอริกคลอไรด์ที่อาจเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และพบหมู่ Fe-O ซึ่งเป็นโครงสร้างของเฟอริกออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเฟอริกคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 450 - 480 องศาเซลเซียสแสดงดังสมการ



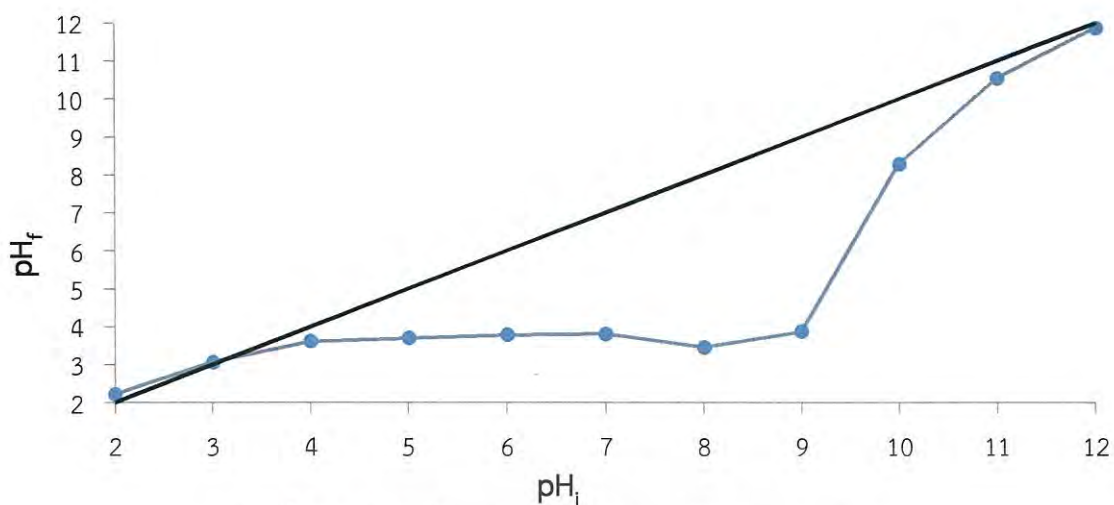
#### 4.2 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, $pH_{PZC}$ )



รูปที่ 4.4 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $pH_{PZC}$ ) ของ BC

จากรูปที่ 4.4 อธิบายได้ว่าเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า  $pH$  7.40 ประจุที่ผิวของ BC แสดงค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี

เมื่อพิจารณาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของ SDS/Fe - BC ดังรูปที่ 4.5 อธิบายได้ว่าเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า  $pH$  3.00 ประจุที่ผิวของ SDS/Fe - BC แสดงค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด - เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่า  $pH$  3.00 ประจุที่ผิวของ SDS/Fe - BC การดูดซับไอออนโลหะที่มีประจุบวกจะดูดซับไม่ดีหรือการดูดซับเกิดได้เพียงเล็กน้อย



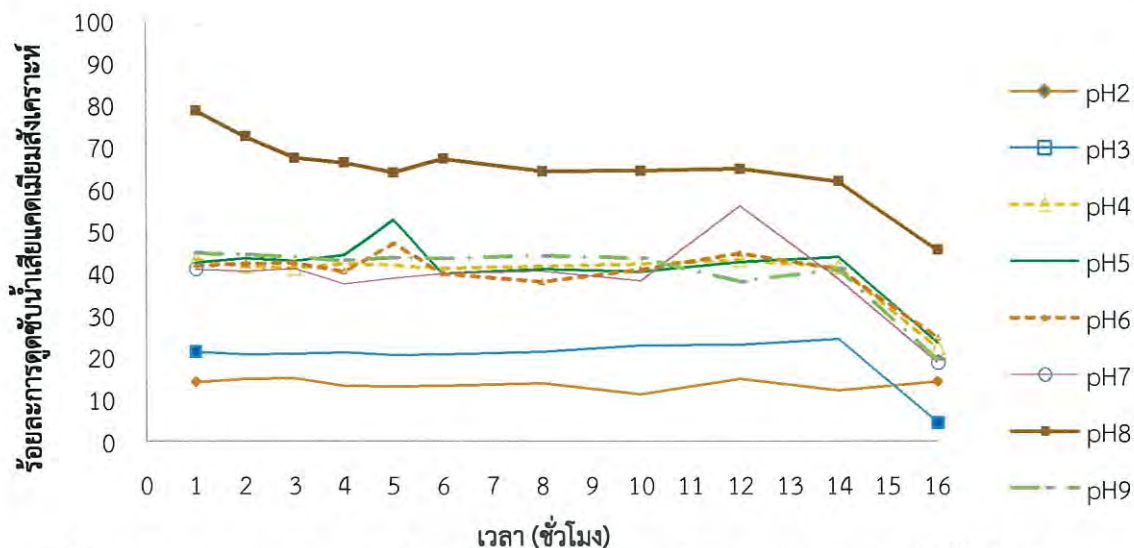
รูปที่ 4.5 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $pH_{PZC}$ ) ของ SDS/Fe - BC

### 4.3 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

#### 4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์



รูปที่ 4.6 ร้อยละการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วย BC เมื่อน้ำเสียมี pH 4 - 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



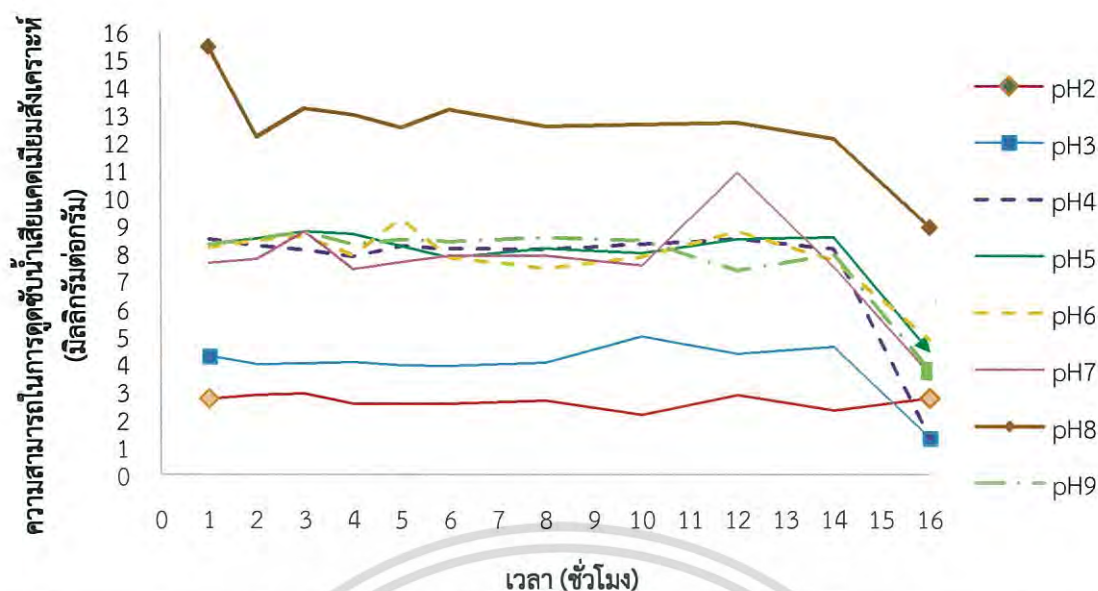
**รูปที่ 4.7** ร้อยละการดูดซับแคตเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วย SDS/Fe – BC เมื่อน้ำเสียมี pH 2 - 9 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเวลาของการดูดซับเพิ่มขึ้น โอกาสที่ไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์จะแพร่ไปยังตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลมาจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพียงพอสำหรับดูดซับแคตเมียม ดังนั้นร้อยละการดูดซับจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเวลาของการดูดซับเพิ่มขึ้น ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ภาวะสมดุล และจากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ชัดว่าช่วงชั่วโมงที่ 16 ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคตเมียมสังเคราะห์ลดลง เนื่องจากตัวดูดซับได้มีการปลดปล่อยไอออนแคตเมียมออกมา ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เวลาการดูดซับแคตเมียมในน้ำเสียด้วย BC ที่เวลา 5 ชั่วโมง และเลือกใช้เวลาการดูดซับแคตเมียมในน้ำเสียด้วยถ่านชีวภาพจาก SDS/Fe – BC ที่เวลา 1 ชั่วโมง เป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับต่อไป



**รูปที่ 4.8** ความสามารถในการดูดซับแคตเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วย BC เมื่อน้ำเสียมี pH 4 - 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

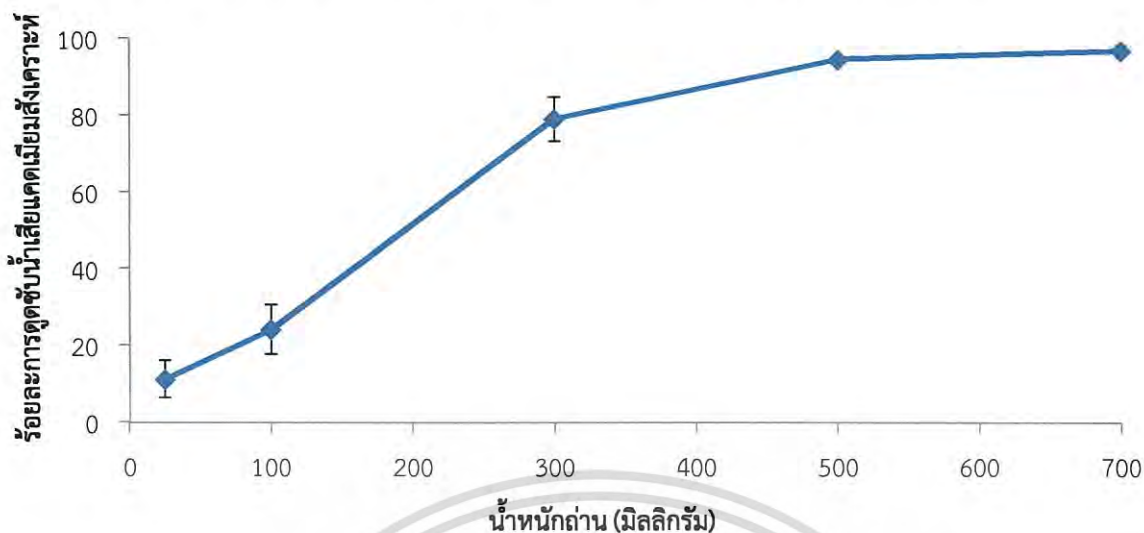
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.9** ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียที่เวลาต่างๆด้วย SDS/Fe – BC เมื่อน้ำเสียมี pH 2 - 9 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาค่า pH ในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ของถ่านทั้งสองชนิด พบว่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) เพิ่มสูงสุดที่ pH เท่ากับ 8 แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 จากการศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของถ่านทั้งสองชนิดมีค่า  $pH_{PZC}$  ต่ำกว่า 8 ดังนั้นในช่วงที่ pH ของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เท่ากับ 8 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีประจุลบเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับมาก ทำให้เกิดความสามารถในการดูดซับสูงสุดในทางตรงกันข้ามหาก pH ของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ลดลง ก่อให้เกิดไฮโดรเจนไอออนมาก จะไปดูดยึดกับหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบ ทำให้ความสามารถดูดซับไอออนแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ลดลง และหากเพิ่ม pH มากกว่า 8 จะไม่ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้น เนื่องจากเกิดการตกตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ajmal และคณะ (2003) ที่ศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกข้าว พบว่าร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ pH เท่ากับ 12 โดยแคดเมียมเกิดการตกตะกอนตั้งแต่ pH 8.3 ซึ่งพบว่าที่ pH 8.3 ร้อยละการดูดซับมีค่ามากกว่าการตกตะกอน (การตกตะกอนที่ pH 8.3 มีค่าน้อยกว่า 10%) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าเท่ากับ 8 ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับต่อไป

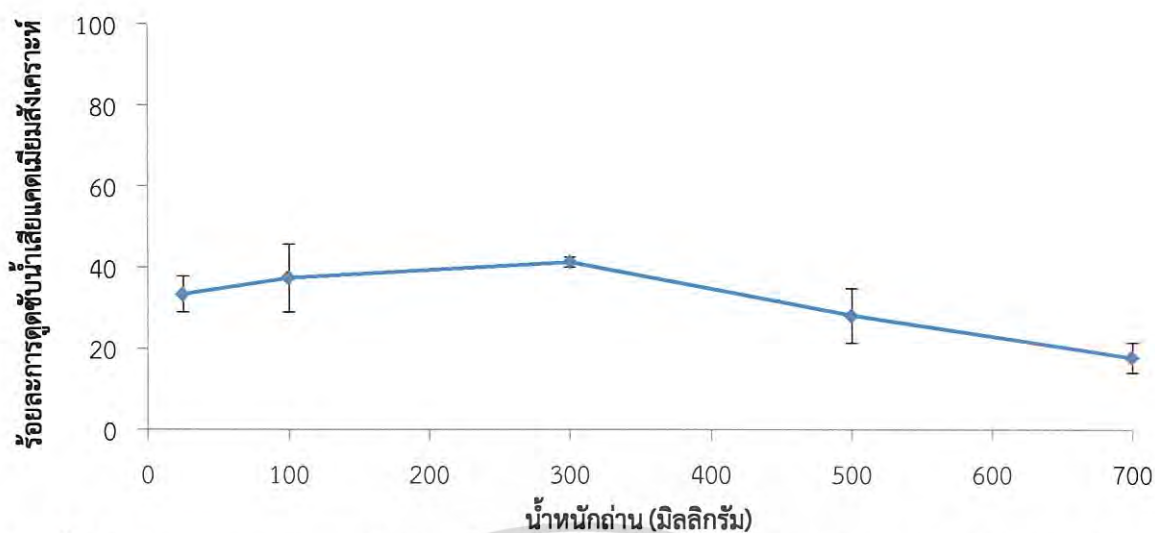
### 4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียม



**รูปที่ 4.10** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของ BC เท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิกรัม ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

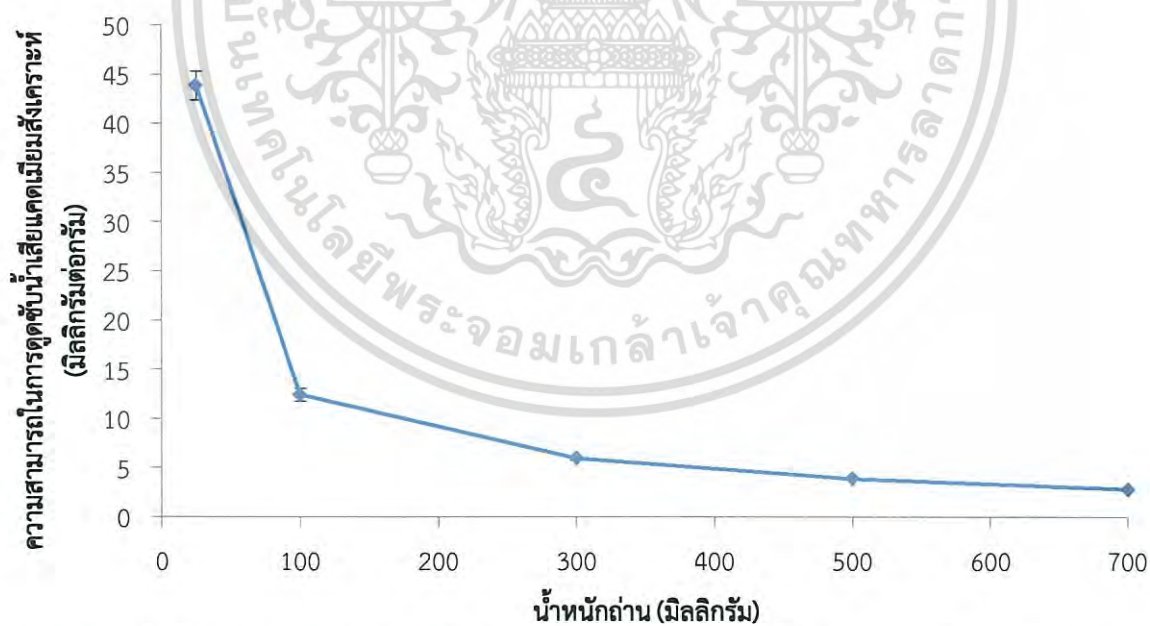
จากรูปที่ 4.10 พบว่าร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณตัวดูดซับ อธิบายคือเมื่อมีพื้นที่ผิวในการดูดซับแคดเมียมไอออนเพิ่มมากขึ้น (บริเวณที่เกิดการดูดซับสูงขึ้น) ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของยุพดี (2557) ที่ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม พบว่าการเพิ่มปริมาณมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับไอออนแคดเมียมและตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเซลล์ลูโลสในมะขามและสารแทนนินในเปลือกทับทิม เป็นสารประกอบที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ดี ทำให้ไอออนของโลหะในน้ำเสียสามารถดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับได้เพิ่มมากขึ้น

ในขณะที่ร้อยละการดูดซับแคดเมียมสังเคราะห์ของ SDS/Fe – BC มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากในการดูดซับแคดเมียม มีกลไกการดูดซับ 2 ชนิด คือ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) และแรงวันเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's Force) เมื่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้ามีผลมากกว่าแรงวันเดอร์วาลส์ จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูดซับ ประจุบวกที่มากเกินไปของ  $Fe^{3+}$  ที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนทจะไปรบกวนหรือแข่งขันกับประจุบวกของ  $Cd^{2+}$  ในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ทำให้เกิดการแข่งขันในการครอบครองประจุลบบนผิวถ่านชีวภาพ จึงเป็นสาเหตุให้ร้อยละการกำจัดน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ลดลง



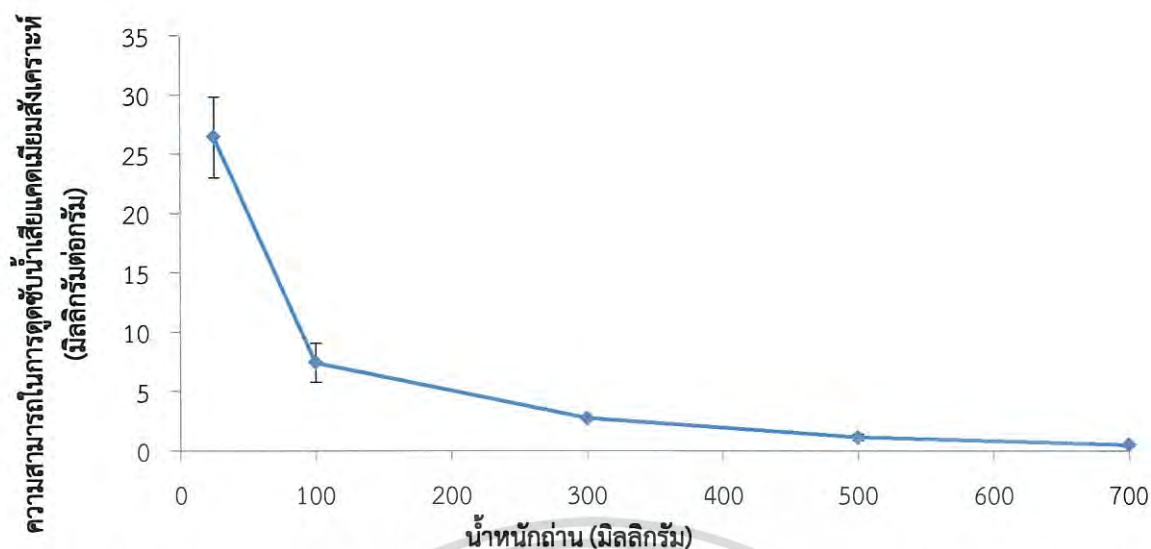
**รูปที่ 4.11** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของ SDS/Fe – BC เท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตรทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 พบว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของลดลงตามลำดับ เนื่องจากน้ำหนักของแคดเมียมต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีค่าลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 25 มิลลิกรัมในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับต่อไป



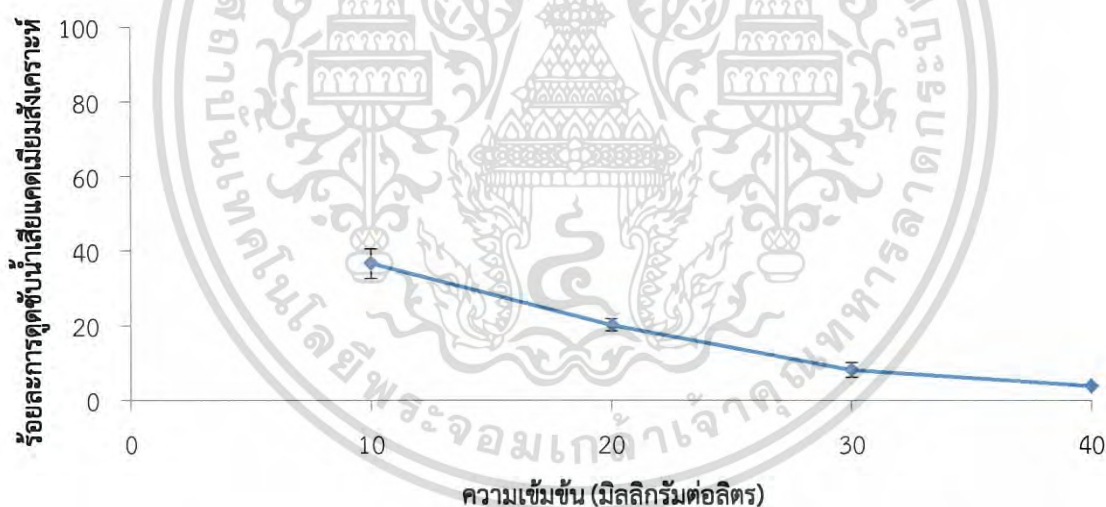
**รูปที่ 4.12** ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของ BC เท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



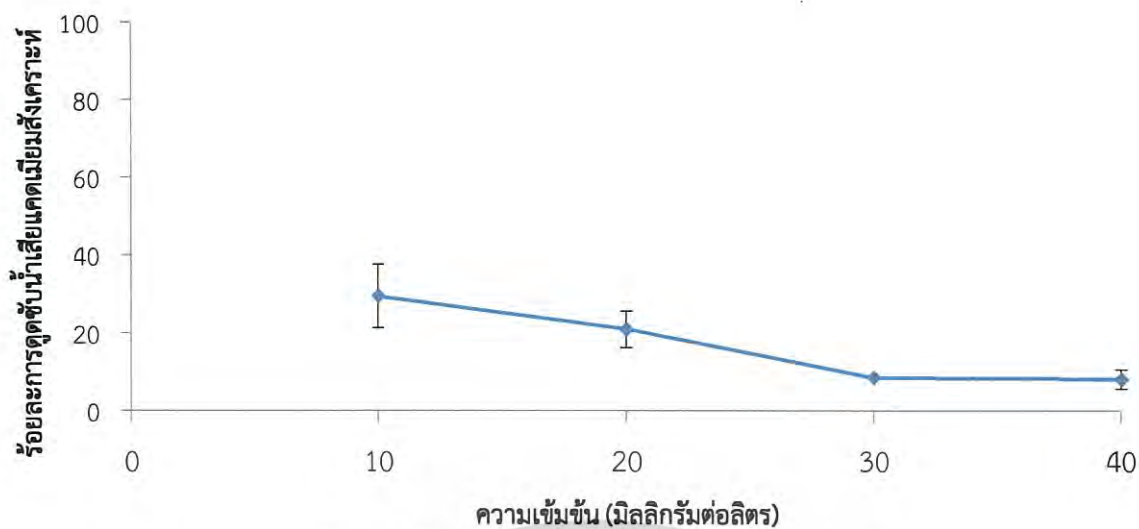
**รูปที่ 4.13** ความสามารถในการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้น้ำหนักของ SDS/Fe – BC เท่ากับ 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัมต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ใช้ความเข้มข้นน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์



**รูปที่ 4.14** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก BC ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

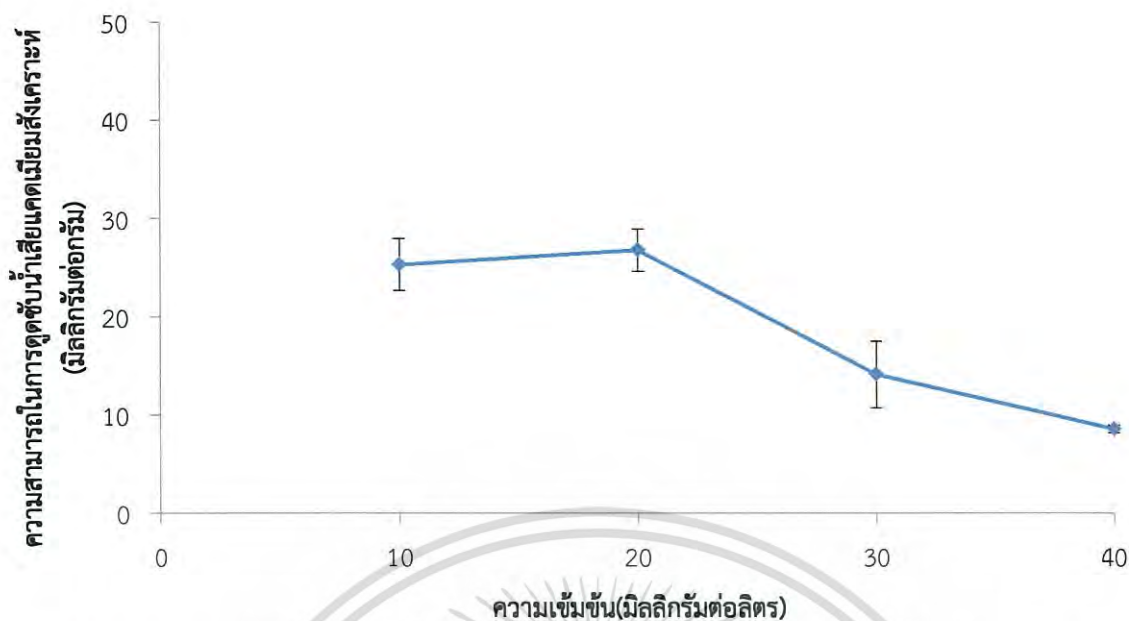
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.15** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก SDS/Fe – BC ต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 พบว่าร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เพราะว่าการแข่งขันของไอออนแคดเมียมในการเข้าสู่พื้นที่ของตัวดูดซับน้อย ในทางตรงกันข้ามหากความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การแข่งขันของไอออนแคดเมียมจะสูงขึ้นในการเข้าสู่พื้นที่ของตัวดูดซับที่มีอย่างจำกัด ในขณะที่เดียวกันตัวดูดซับอาจเกิดการอิ่มตัว ทำให้ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ลดลง ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของ Anzeze และคณะ (2014) ที่ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วจากน้ำเสียด้วยผักตบชวา

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลงตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ทำให้ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดลดลงในภายหลัง



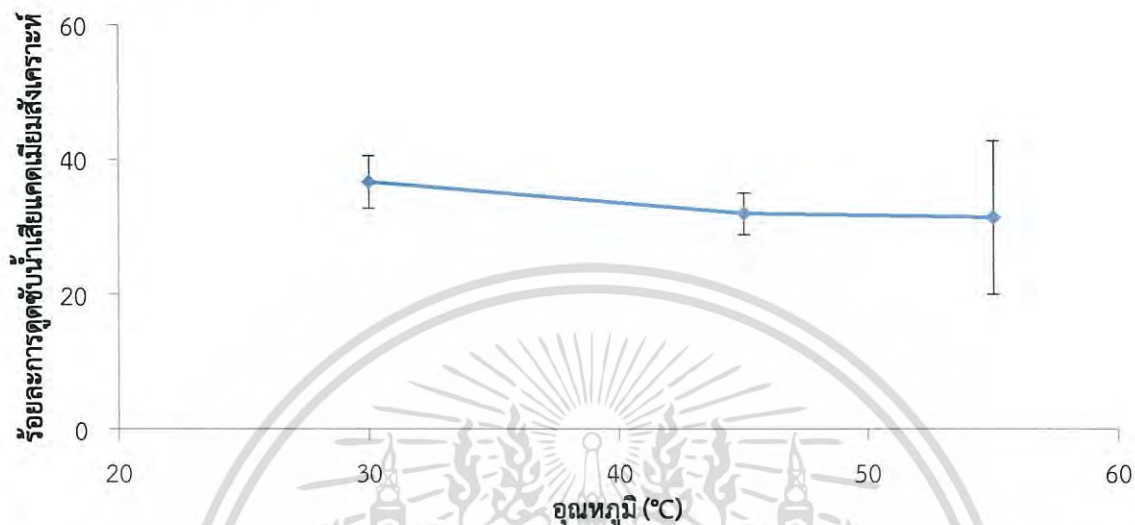
**รูปที่ 4.16** ความสามารถในการดูดซับแคตเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก BC ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



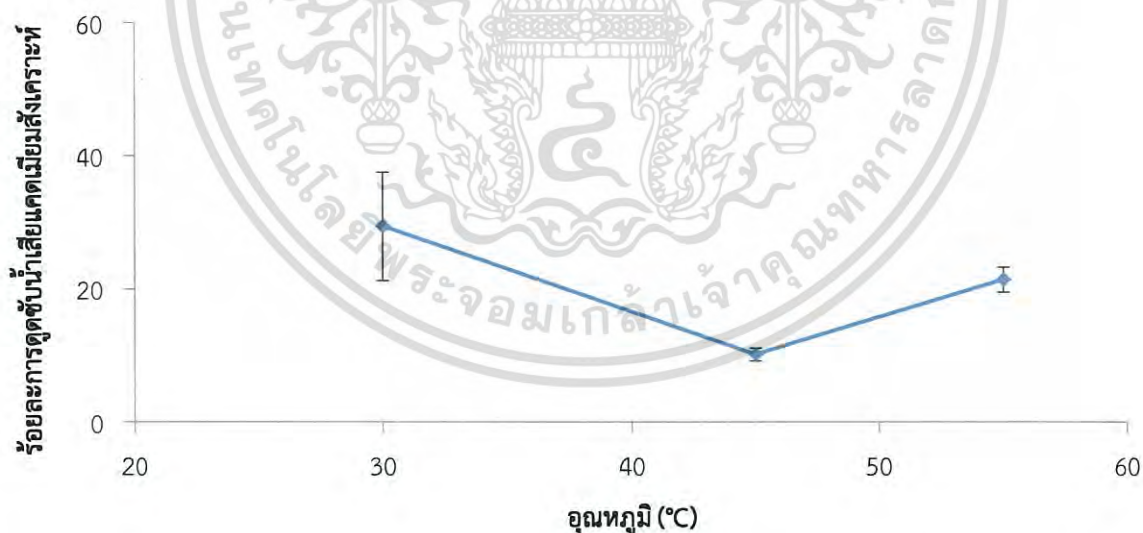
**รูปที่ 4.17** ความสามารถในการดูดซับแคตเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 8 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

#### 4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ไปเป็น 45 และ 55 องศาเซลเซียส ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะลดลงเพียงเล็กน้อยตามลำดับ และเมื่อทดสอบทางสถิติแล้วพบว่าที่อุณหภูมิต่างๆ มีร้อยละการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

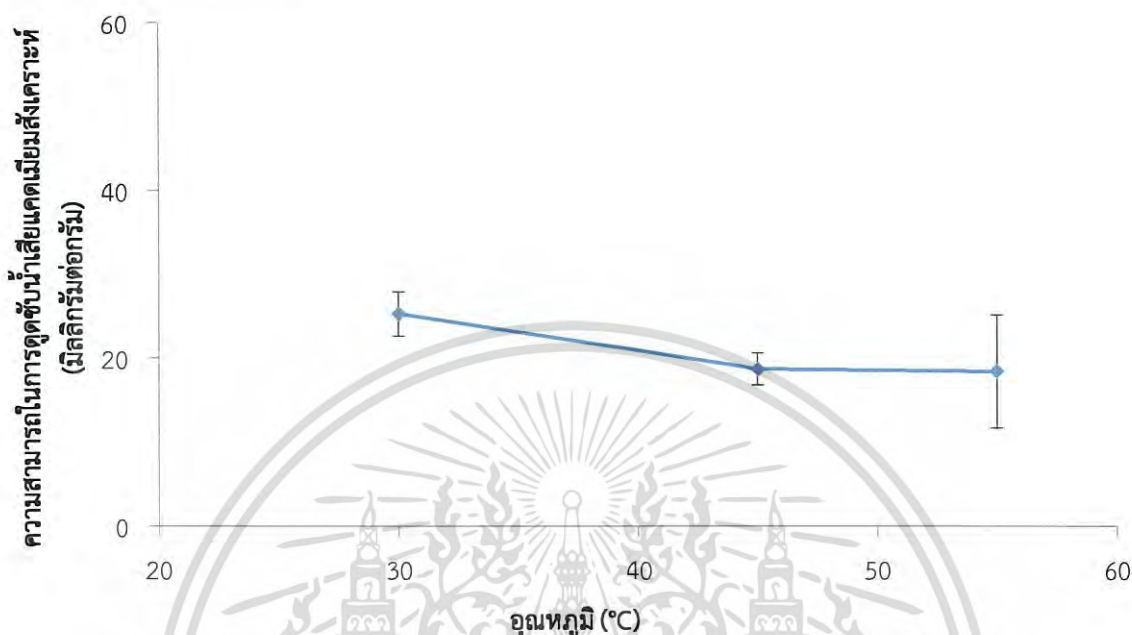


**รูปที่ 4.18** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก BC ต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

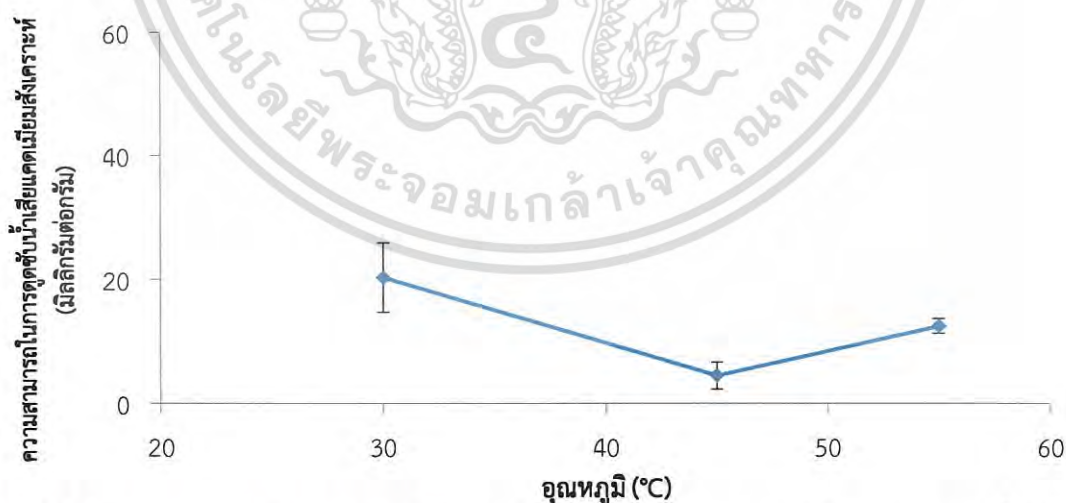


**รูปที่ 4.19** ร้อยละการดูดซับแคดเมียม เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก SDS/Fe - BC ต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 พบว่าความสามารถในการดูดซับในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำจะมีปริมาณการดูดซับที่มากกว่าความสามารถในการดูดซับในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพดาร์ตันและปิยนันท์ (2559) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยผลฝ้ายและไมยราบยักษ์



**รูปที่ 4.20** ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก BC ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และ ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส



**รูปที่ 4.21** ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนัก SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียด้วยถ่านผัดบขวา

ทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้นตั้งนี้คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการดูดซับแคดเมียมใช้ปริมาณ BC และ SDS/Fe - BC 25, 100, 300, 500 และ 700 มิลลิกรัม pH ของน้ำเสียเท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin - Radushkevich และ Redlich - Peterson ผลการคำนวณแสดงได้ดังนี้

### 4.4.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer) สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

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

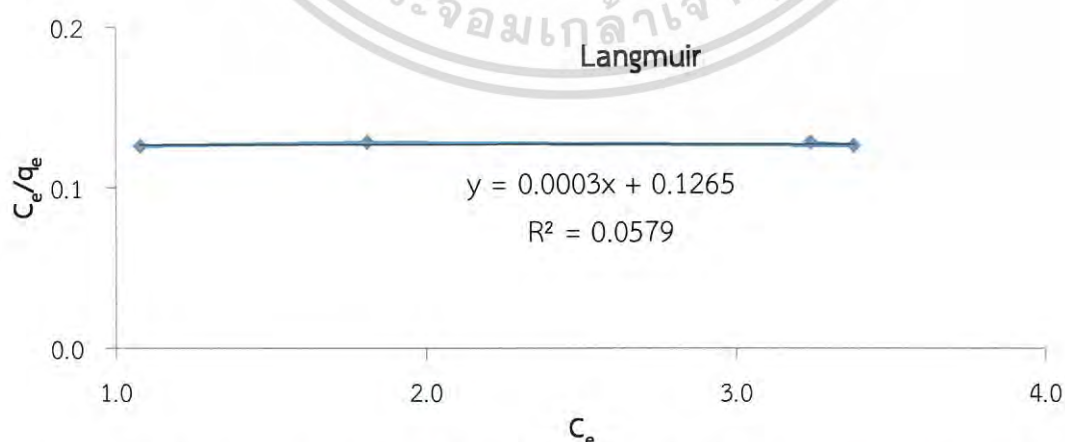
โดย  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$q_e$  = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_m$  = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_L$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

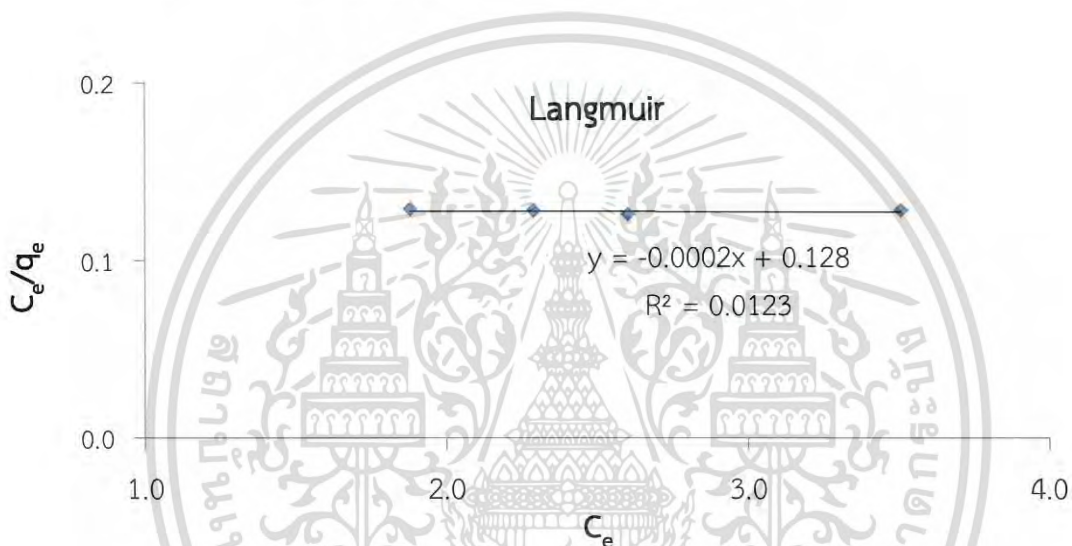


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.003 และจุดตัดแกน  $y = 0.1265$  สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q_m$ ) ค่าคงที่สมการ Langmuir ( $K_L$ ) และค่า  $R_L$  ได้ดังนี้ ความชัน =  $1/q_m$ , หาค่า  $R_L = 1/(1+K_L C_0)$  และหาจุดตัดแกน  $y = 1/K_L q_m$  ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

ความชัน	=	$1/q_m$	$R_L$	=	$1/(1+K_L \cdot C_0)$
0.003	=	$1/q_m$	$R_L$	=	$1/(1+(0.0237 \text{ L/mg})(10 \text{ mg/L}))$
$q_m$	=	333.33 mg/g	$R_L$	=	0.8084
จุดตัดแกน $y$	=	$1/K_L q_m$			
0.1265	=	$1/K_L (333.33 \text{ mg/g})$			
$K_L$	=	0.0237 L/mg			



**รูปที่ 4.23** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.0002 และจุดตัดแกน  $y = 0.128$  สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q_m$ ) ค่าคงที่สมการ Langmuir ( $K_L$ ) และค่า  $R_L$  ได้ดังนี้ ความชัน =  $1/q_m$ , หาค่า  $R_L = 1/(1+K_L C_0)$  และหาจุดตัดแกน  $y = 1/K_L q_m$  ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

ความชัน	=	$1/q_m$	$R_L$	=	$1/(1+K_L \cdot C_0)$
0.0002	=	$1/q_m$	$R_L$	=	$1/(1+(0.0016 \text{ L/mg})(10 \text{ mg/L}))$
$q_m$	=	5000 mg/g	$R_L$	=	0.9843
จุดตัดแกน $y$	=	$1/K_L q_m$			
0.128	=	$1/K_L (5000 \text{ mg/g})$			
$K_L$	=	0.0016 L/mg			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir หรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับจะไม่เป็นแบบ Langmuir (Unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear),  $0 > R_L < 1$  การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (Favorable) และเมื่อ  $R_L = 0$  การดูดซับจะเกิดการผันกลับได้ (Irreversible) ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่า  $R_L$  ของการดูดซับแคดเมียมใน BC และ SDS/Fe - BC เป็น 0.8084 และ 0.9843 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การดูดซับแคดเมียมใน BC และ SDS/Fe - BC นี้เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับ Langmuir และในการดูดซับแคดเมียมของ SDS/Fe - BC มีความใกล้เคียงกับการดูดซับเป็นเส้นตรงมากกว่าการดูดซับแคดเมียมของ BC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Song และคณะ (2016) ที่นำถ่านผิกลบชาวสภาวะแม่เหล็กที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไคโตซานมาดูดซับทองแดงและแคดเมียมที่เป็นแบบจำลองการดูดซับแบบ Langmuir เช่นกัน

#### 4.4.2 สมการการดูดซับของ Freundlich

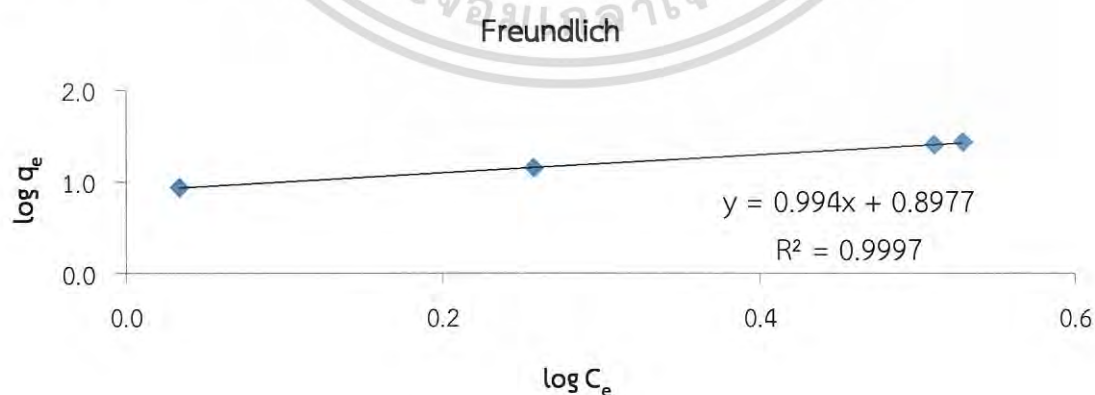
สมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) พื้นผิวดูดซับขรุขระ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งกลไกทางกายภาพและเคมี การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น พื้นผิวและพลังงานในการดูดซับจะมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลังความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของน้ำเสียที่สภาวะสมดุล สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

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

โดย  $K_F$  = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (ลิตรต่อกรัม)

$1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้รูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25

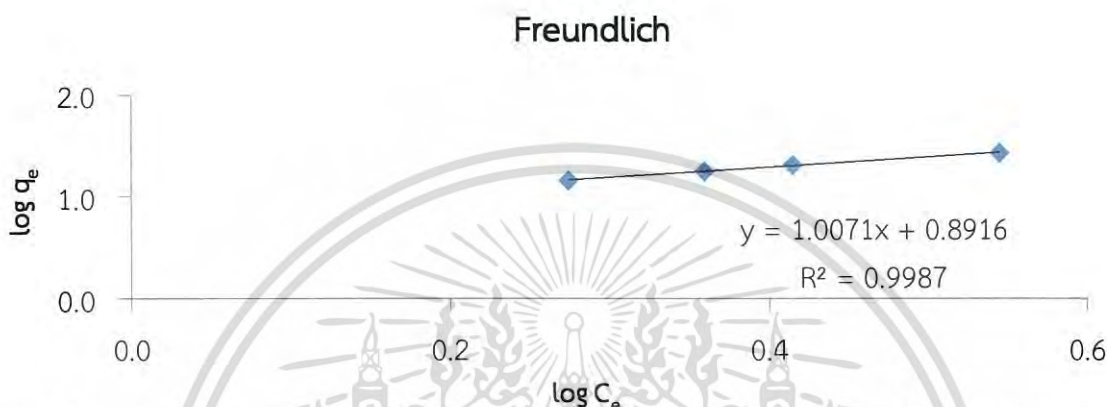


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 0.994 และจุดตัดแกน  $y = 0.8977$  สามารถหาค่าคงที่  $1/n$  และ  $K_f$  ได้ดังนี้ ความชัน =  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y = \log K_f$

ความชัน	=	$1/n$	จุดตัดแกน Y	=	$\log K_f$
0.994	=	$1/n$	0.8977	=	$\log K_f$
			$K_f$	=	7.9013 L/mg



**รูปที่ 4.25** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 1.0071 และจุดตัดแกน  $y = 0.8916$  สามารถหาค่าคงที่  $1/n$  และ  $K_f$  ได้ดังนี้ ความชัน =  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y = \log K_f$

ความชัน	=	$1/n$	จุดตัดแกน Y	=	$\log K_f$
1.0071	=	$1/n$	0.8916	=	$\log K_f$
			$K_f$	=	7.7911 L/mg

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้สูงพอสมควรเมื่อเทียบกับการคำนวณตามแบบจำลองการดูดซับแบบอื่นๆ

#### 4.4.3 สมการการดูดซับของ Temkin

สมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (adsorbent-adsorbate interactions) สมการการดูดซับของ Temkin คือ

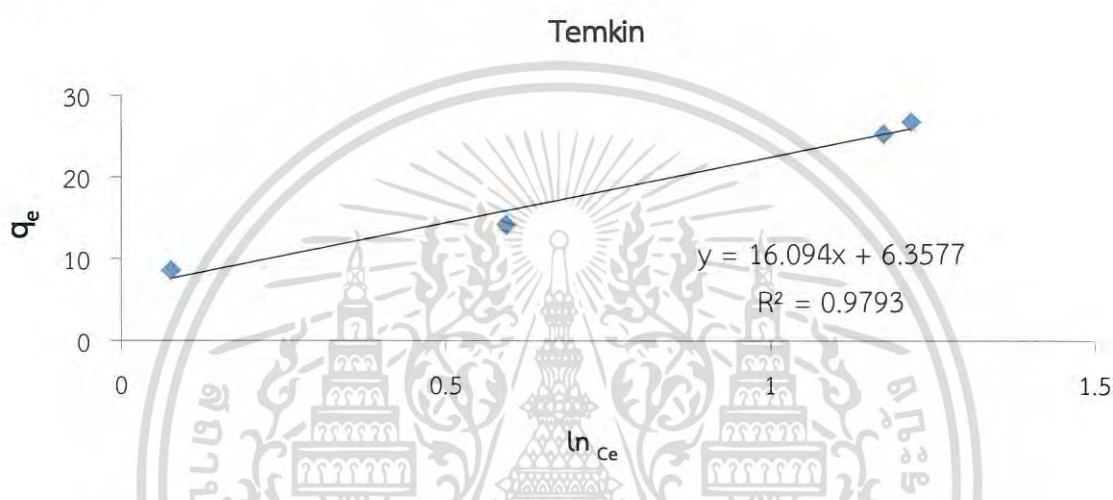
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

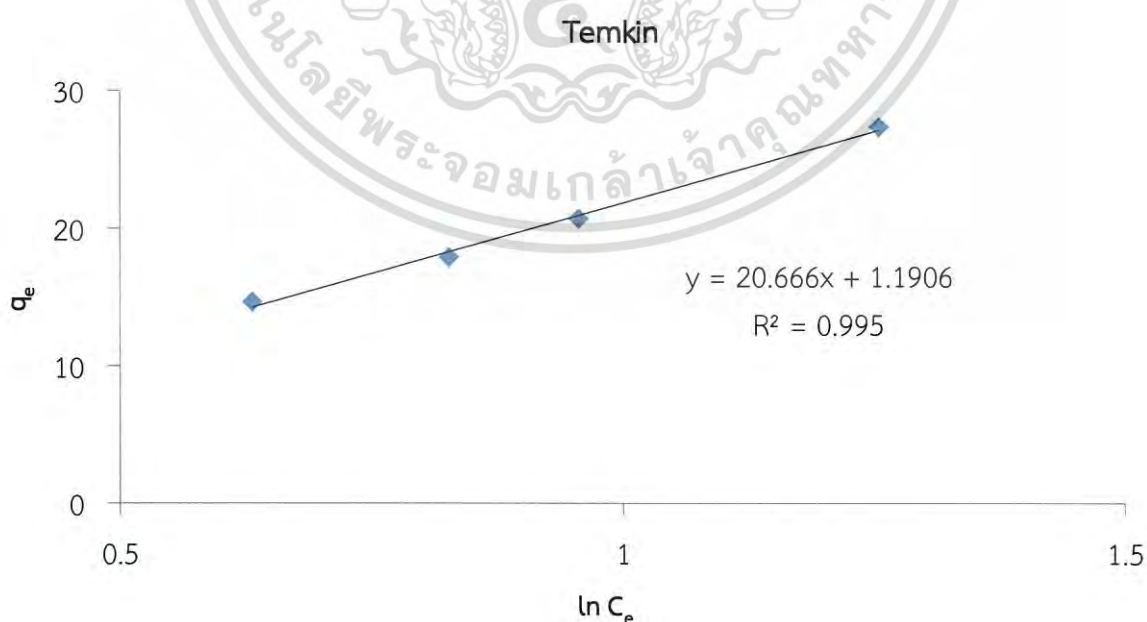
โดย  $b_0$  = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (จุลต่อโมล)

$A$  = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (maximum binding energy)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Temkin และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27



**รูปที่ 4.26** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC



**รูปที่ 4.27** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  กับ  $\ln C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ความชัน (slope) = 20.666 และจุดตัดแกน  $y = 1.1906$  สามารถหาค่าคงที่  $b_0$  และ  $A$  ได้ดังนี้ ความชัน =  $\frac{RT}{b_0}$  และจุดตัดแกน  $y = \frac{RT}{b_0} \ln A$

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ 20.666 &= \frac{RT}{b_0} & 1.1906 &= \frac{(8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol})(303.15\text{K})}{121,9582 \text{ J/mol}} \ln A \\ b_0 &= \frac{(8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol})(303.15\text{K})}{20.666} & A &= e^{(1.1906/20.666)} \\ b_0 &= 121.9582 \text{ J/mol} & A &= 1.0593 \end{aligned}$$

#### 4.4.4 สมการการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich ไอโซเทอร์มได้เสนอการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับว่าเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

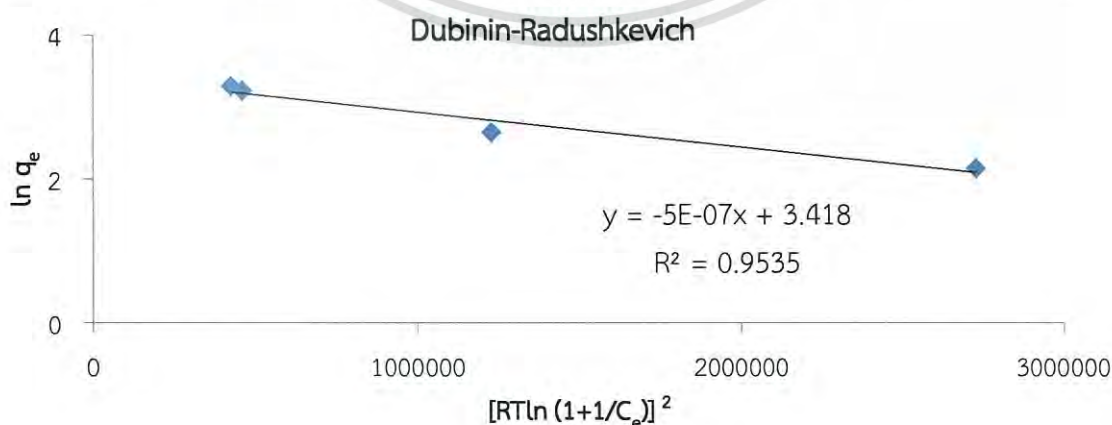
สมการการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich คือ

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} \left( RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \right)^2$$

โดย  $q_D$  = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

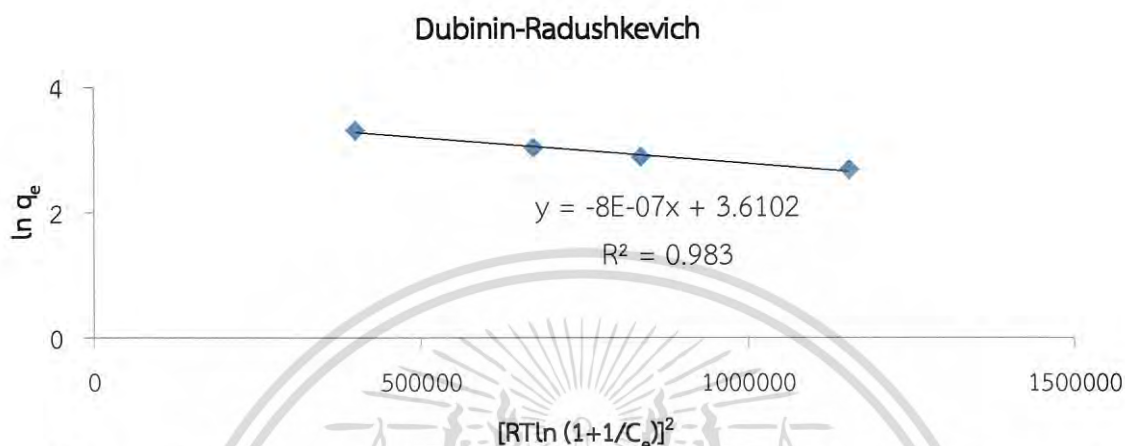
$K_{DR}$  = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin - Radushkevich (โมล<sup>2</sup>ต่อกิโลจูล<sup>2</sup>)

ซึ่งสัมพันธ์กับพลังอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29



**รูปที่ 4.28** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  กับ  $[RT \ln(1+1/C_e)]^2$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้ ความชัน $=K_{DR} = 5 \times 10^{-7}$	จุดตัดแกน y	=	$\ln q_D$
$E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$	$\ln q_D$	=	3.418
$E = 1.0000 \text{ kJ/mol}$	$q_D$	=	30.5083



**รูปที่ 4.29** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  กับ  $[RT \ln(1+1/C_e)]^2$  ของการดูดซับแคตเมียมบน SDS/Fe - BC

จากกราฟ จะได้ความชัน $=K_{DR} = 8 \times 10^{-7}$	จุดตัดแกน y	=	$\ln q_D$
$E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$	$\ln q_D$	=	3.6102
$E = 0.7906 \text{ kJ/mol}$	$q_D$	=	36.9735

ในการคำนวณพลังงานอิสระจากไอโซเทอร์มการดูดซับของ D - R เมื่อได้ค่า E ระหว่าง 8 - 16 กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน,  $E < 8$  กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อ  $E > 16$  กิโลจูลต่อโมล จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี จากผลการทดลองที่ได้คือค่า E ของการดูดซับแคตเมียมบน BC และการดูดซับแคตเมียมบน SDS/Fe - BC เท่ากับ 1.0000 และ 0.7906 kJ/mol ตามลำดับ แสดงว่าเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ

#### 4.4.5 สมการการดูดซับของ Redlich - Peterson (R - P)

สมการการดูดซับของ Redlich - Peterson ซึ่งจะผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่าง Langmuir และ Freundlich สมการการดูดซับของ Redlich - Peterson คือ

$$\ln \left( K_R \frac{C_e}{q_e} - 1 \right) = b_R \ln C_e + \ln a_R$$

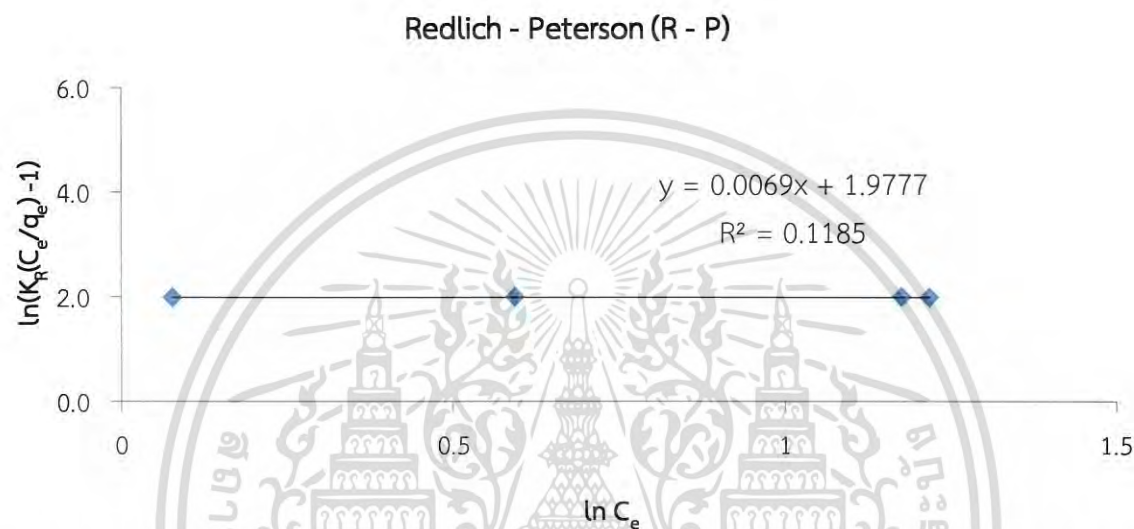
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $K_R$  = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับจากวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$a_R$  = ค่าคงที่ไอโซเทอร์ม Redlich - Peterson

$b_R$  = เลขชี้กำลังระหว่าง 0 ถึง 1

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Redlich - Peterson และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31



**รูปที่ 4.30** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln (K_R(C_e/q_e) - 1)$  กับ  $\ln C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.0069 และจุดตัดแกน  $y = 1.9777$  สามารถหาค่าคงที่  $K_R$ ,  $a_R$  และ  $b_R$  ได้ดังนี้

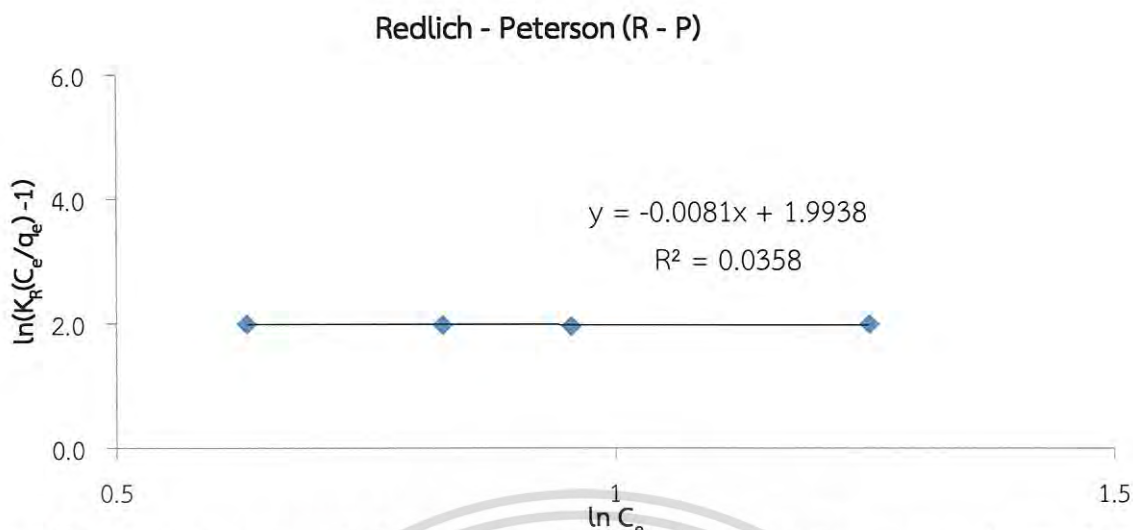
ความชันเมื่อ  $K_R$  เป็น 65 =  $b_R = 0.0069$

จุดตัดแกน  $y = \ln a_R$

$1.9777 = \ln a_R$

$a_R = 7.2261 \text{ mg/L}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.31** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln (K_R(C_e/q_e) - 1)$  กับ  $\ln C_e$  ของการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.0081 และจุดตัดแกน  $y = 1.9938$  สามารถหาค่าคงที่  $K_R$ ,  $a_R$  และ  $b_R$  ได้ดังนี้

ความชันเมื่อ  $K_R$  เป็น 65 =  $b_R = 0.0081$

จุดตัดแกน  $y = \ln a_R$

$1.9938 = \ln a_R$

$a_R = 7.3434 \text{ mg/L}$

การศึกษามากมายที่บอกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของ R - P มีความแม่นยำมากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich เนื่องจากเป็นไอโซเทอร์มที่ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ เมื่อ  $b_R = 1$  สมการของ R-P จะเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และเมื่อ  $b_R = 0$  สมการของ R - P จะเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich จากผลการทดลองที่ได้คือค่า  $b_R$  ของการดูดซับแคดเมียมบน BC และการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC เท่ากับ 0.0069 และ 0.0081 ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับแคดเมียมของทั้งสองตัวดูดซับเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich

**ตารางที่ 4.2** ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin - Radushkevich และ Redlich - Peterson สำหรับการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ (BC) และการดูดซับแคดเมียมบนถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนท (SDS/Fe - BC)

	ค่าที่ได้		ค่าที่ได้
<b>Langmuir isotherm</b> ของ BC		<b>Langmuir isotherm</b> ของ SDS/Fe - BC	
$q_{max}$ (mg/g)	333.33	$q_{max}$ (mg/g)	5,000
$K_L$ (L/mg)	0.0237	$K_L$ (L/mg)	0.0016
$R_L$	0.8084	$R_L$	0.9843
$R^2$	0.0579	$R^2$	0.0123
<b>Freundlich isotherm</b> ของ BC		<b>Freundlich isotherm</b> ของ SDS/Fe - BC	
$K_F$ (L/g)	7.9013	$K_F$ (L/g)	7.7911
$1/n$	0.9940	$1/n$	1.0071
$R^2$	0.9997	$R^2$	0.9987
<b>Temkin isotherm</b> ของ BC		<b>Temkin isotherm</b> ของ SDS/Fe - BC	
$b_0$ (J/mol)	156.6043	$b_0$ (J/mol)	121.9582
A	1.4844	A	1.0593
$R^2$	0.9793	$R^2$	0.9950
<b>Dubinin-Radushkevich isotherm</b> ของ BC		<b>Dubinin-Radushkevich isotherm</b> ของ SDS/Fe-BC	
$K_{Dr}$	$5 \times 10^{-7}$	$K_{Dr}$	$8 \times 10^{-7}$
$q_D$ (mg/g)	30.5083	$q_D$ (mg/g)	36.9735
E (kJ/mol)	1.0000	E (kJ/mol)	0.7906
$R^2$	0.9535	$R^2$	0.9830
<b>Redlich-Peterson isotherm</b> ของ BC		<b>Redlich-Peterson isotherm</b> ของ SDS/Fe - BC	
$K_R$ (mg/g)	65	$K_R$ (mg/g)	65
$a_R$ (mg/L)	7.2261	$a_R$ (mg/L)	7.3434
$b_R$	0.0069	$b_R$	0.0081
$R^2$	0.1185	$R^2$	0.0358

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และสมการแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich จากตารางที่ 4.2 พบว่าจากสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ใกล้เคียง 1 ซึ่งมากกว่าสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir แสดงว่าการดูดซับแคดเมียมบน BC และการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC เป็นแบบ Freundlich ซึ่งแบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัว โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(multilayer) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Temkin ของ BC และ SDS/Fe - BC เท่ากับ 0.9793 และ 0.9950 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สูง แบบจำลองการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich ได้ค่า E ของการดูดซับแคดเมียมบน BC และการดูดซับแคดเมียมบน SDS/Fe - BC เท่ากับ 1.0000 และ 0.7906 kJ/mol ตามลำดับ แสดงว่าเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich ของ BC และ SDS/Fe -BC เท่ากับ 0.9535 และ 0.9830 ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Freundlich ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Redlich - Peterson isotherm ของ BC และ SDS/Fe - BC มีค่า  $b_R$  เท่ากับ 0.0069 และ 0.0081ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Freundlich ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan และคณะ (2014) ที่ศึกษาการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วโดยใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กและถ่านชีวภาพจากเปลือกไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

#### 4.5 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ด้วยถ่านชีวภาพผักตบชวา

จากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย BC และ SDS/Fe - BC โดยมีการแปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมและอุณหภูมิในการดูดซับ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณามี 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order model), แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order model), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) แสดงได้ดังนี้

##### แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order model) อธิบายได้ว่า หากสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งในปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินพอการเกิดปฏิกิริยาจะถือว่าความเข้มข้นของสารนั้นคงที่ตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวภายนอกมีขอบเขตอย่างจำกัด สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

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

โดย  $K_1$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/min)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{k_1}{2.303}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\log q_e$

### แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order model) อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดจากแรงทางเคมีที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นที่ผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างจำกัด สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเป็นดังนี้

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

โดย  $K_2$  = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/(mg.min))

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{q_e}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\left( \frac{1}{k_2 q_e} \right)^2$

### แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งสมการนี้เหมาะสำหรับการพิจารณาการดูดซับที่พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich เป็นดังนี้

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

โดย  $\alpha$  = อัตราเร็วในการดูดซับ (mg/g min)

$\beta$  = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ (g/mg)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\beta}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta)$

### แบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ

แบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra - particle diffusion) อธิบายถึงอัตราเร็วของการแพร่ของสารเข้าไปในรูพรุน

สมการตามแบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ เป็นดังนี้

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

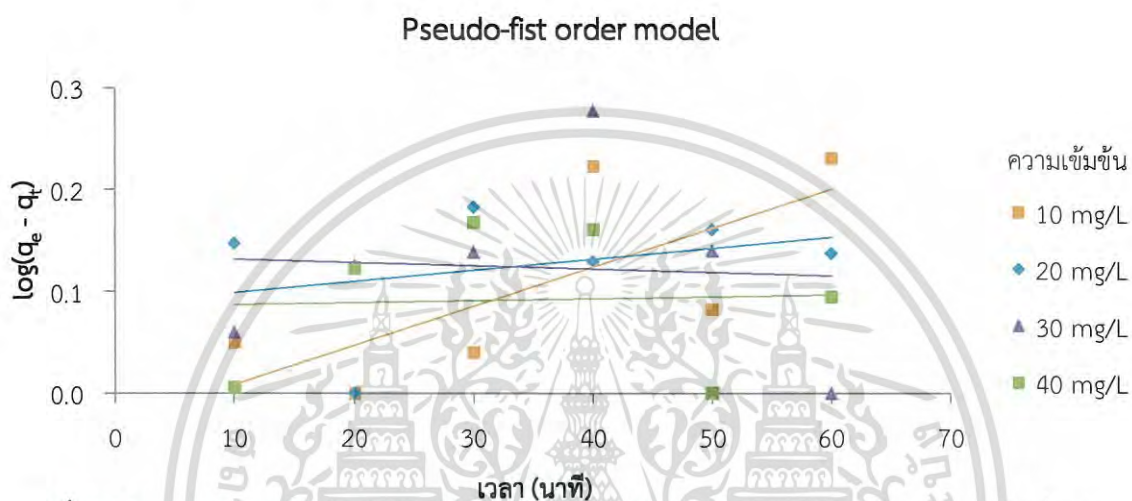
โดย  $k_{id}$  = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ  $k_{id}$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ C

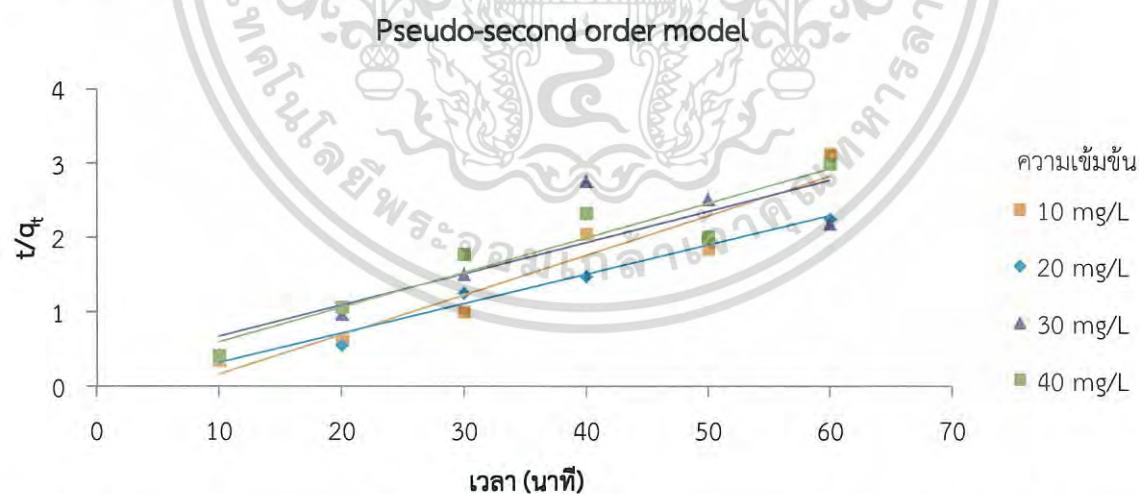
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน BC ดังนี้ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

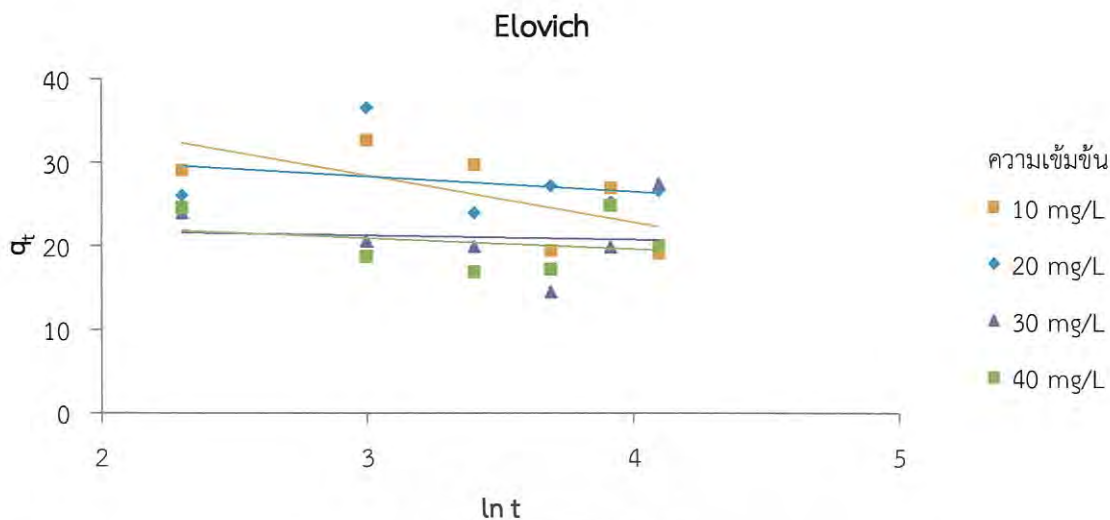
เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันความเข้มข้นในการดูดซับแคดเมียม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วย BC ที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_0$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ทำให้ค่าการดูดซับสูงที่สุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.32, รูปที่ 4.33, รูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 ตามลำดับ ดังนี้



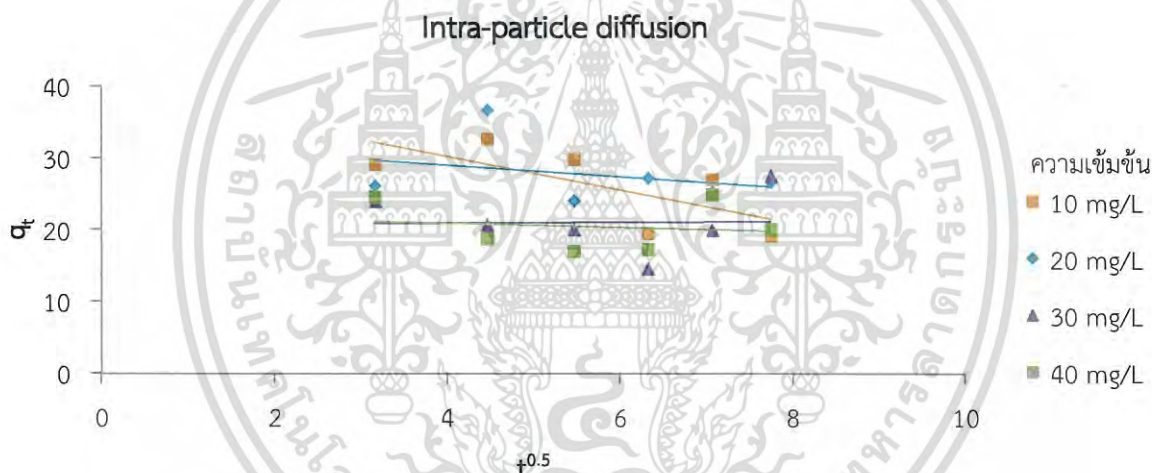
**รูปที่ 4.32** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log(q_e - q_t)$ ) กับเวลา ( $t$ )



**รูปที่ 4.33** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา ( $t$ )



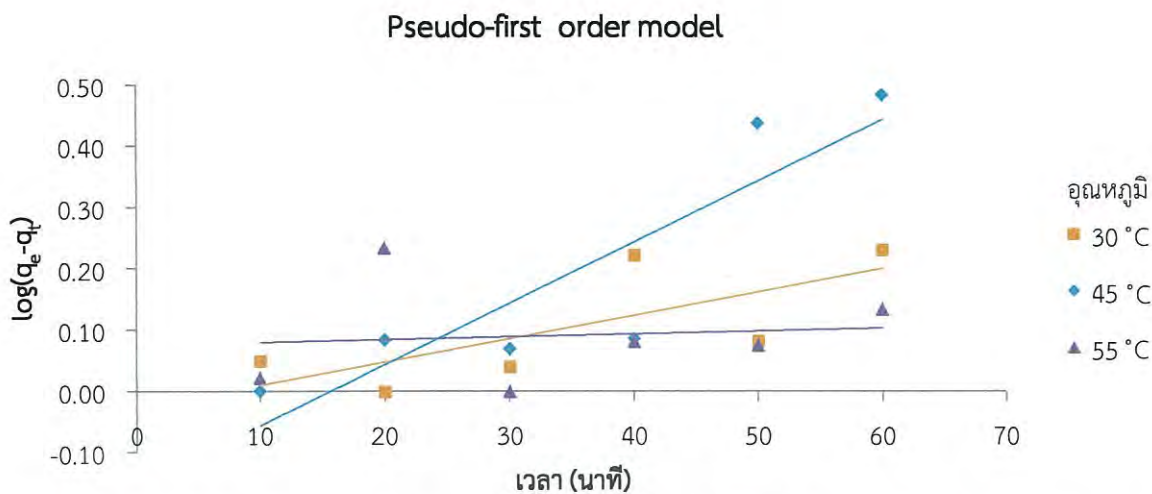
**รูปที่ 4.34** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ ลอการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ )



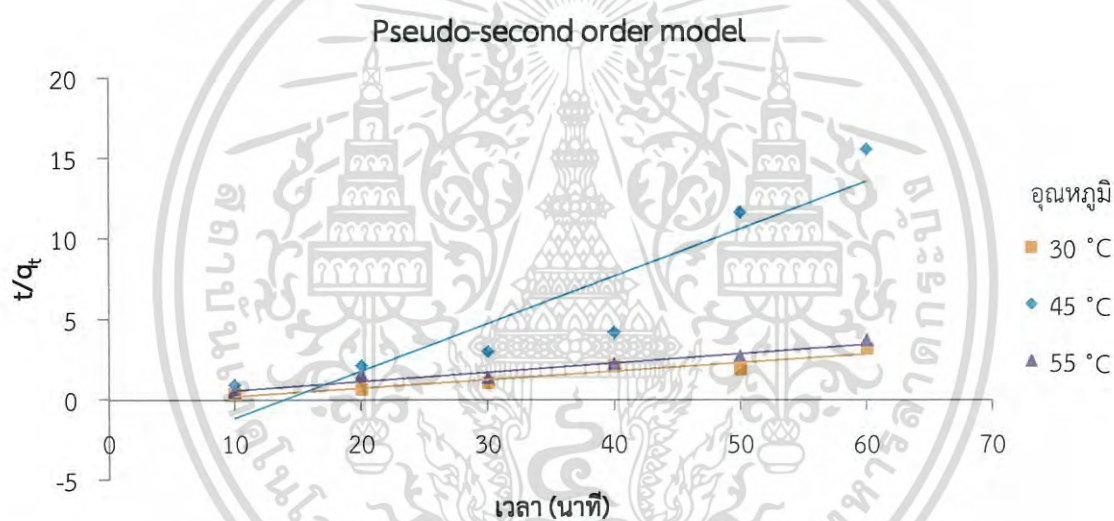
**รูปที่ 4.35** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ  $t^{0.5}$

4.5.2 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน BC ดังนี้ 30°C, 45°C และ 55 °C เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วย BC ที่เวลาต่าง ๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ทำให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.36, รูปที่ 4.37 , รูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 ตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

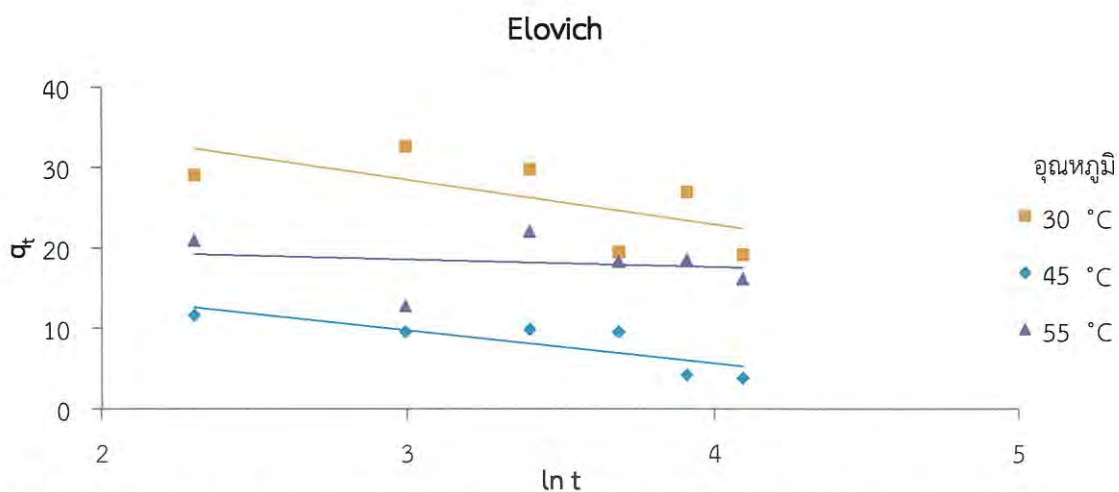


**รูปที่ 4.36** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - q_t)$ ) กับเวลา (t)

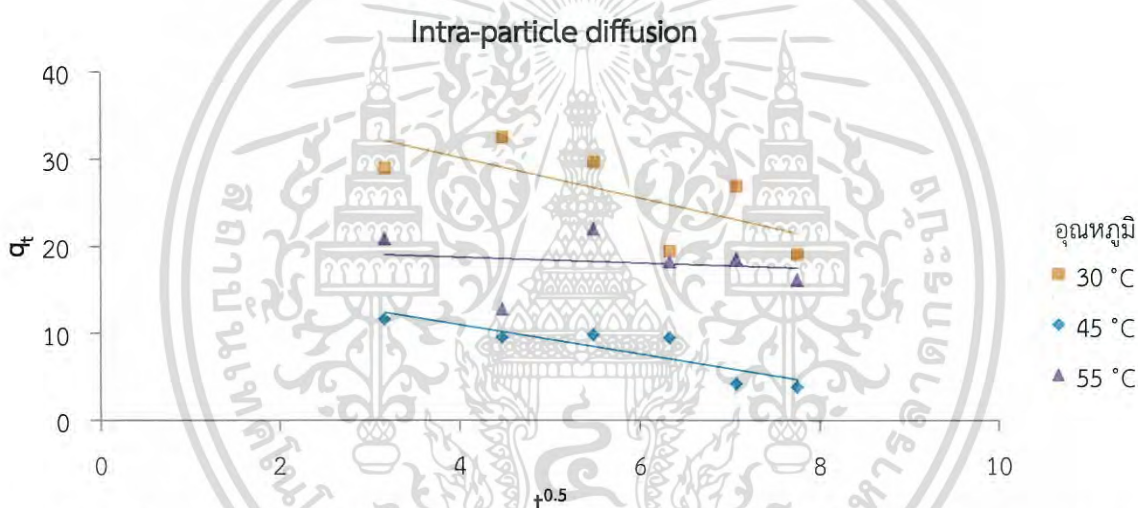


**รูปที่ 4.37** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา (t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.38** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ( $q_t$ ) กับ ล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ )

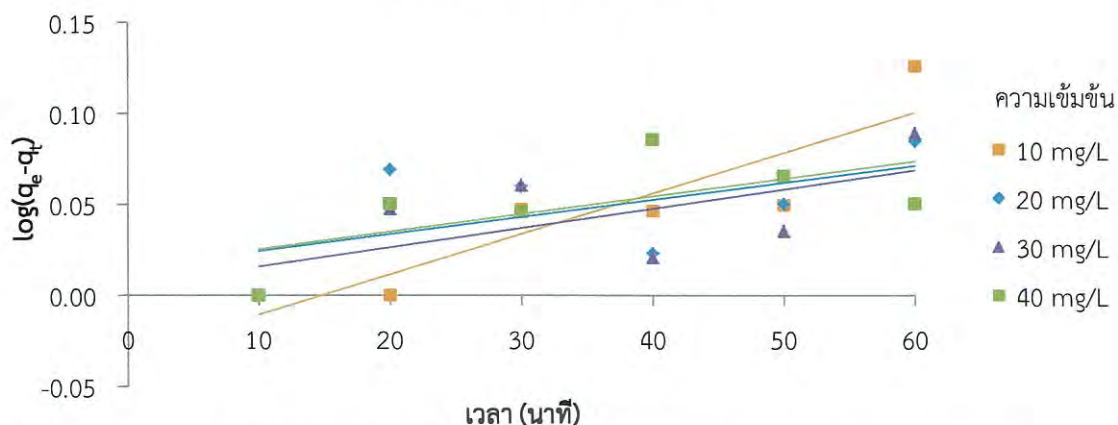


**รูปที่ 4.39** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ  $t^{0.5}$

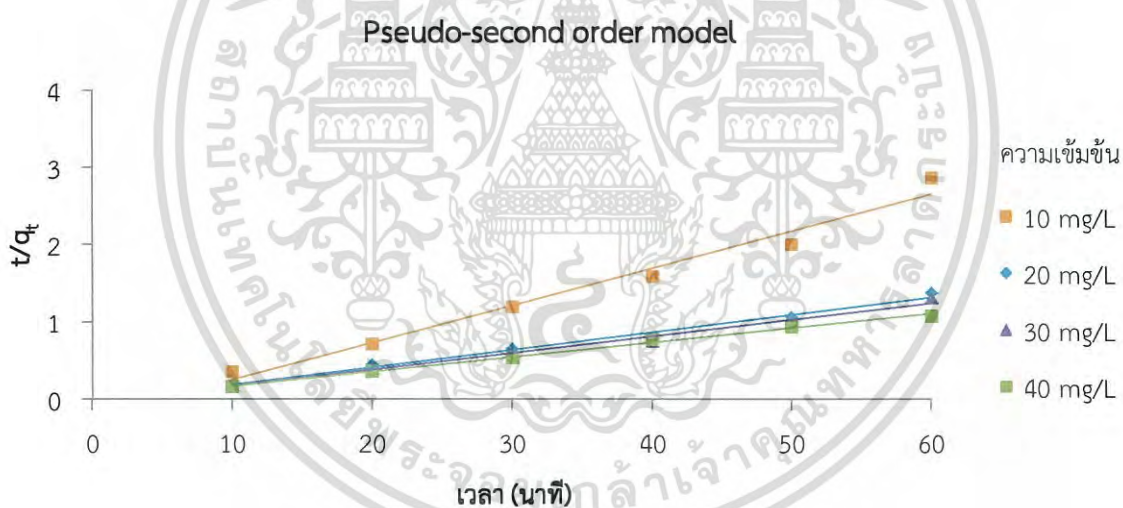
4.5.3 แปรผันความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน SDS/Fe – BC ดังนี้ 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันความเข้มข้นในการดูดซับแคดเมียม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วย SDS/Fe – BC ที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_0$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงที่สุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.40, รูปที่ 4.41, รูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 ตามลำดับ ดังนี้

## Pseudo - first order model

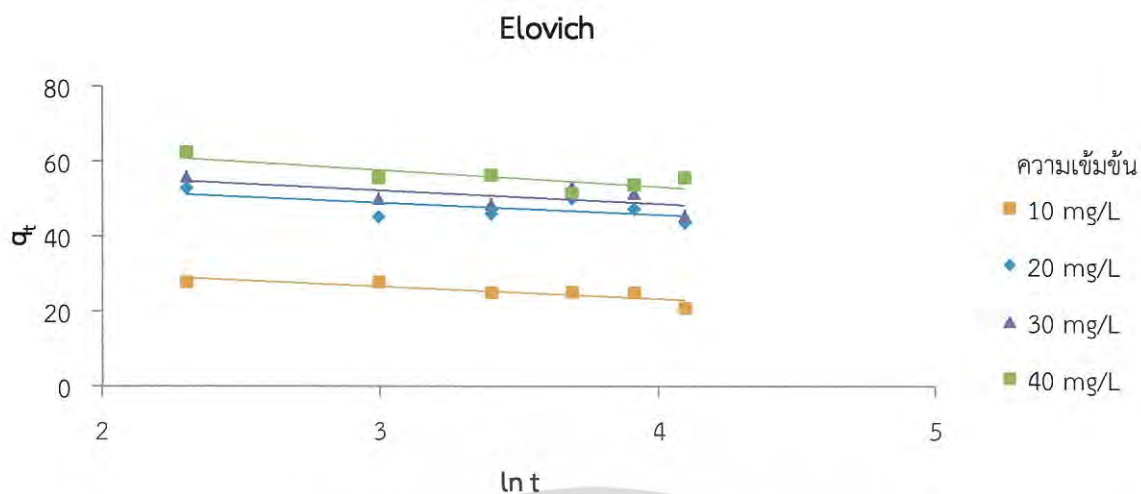


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - q_t)$ ) กับเวลา (t)

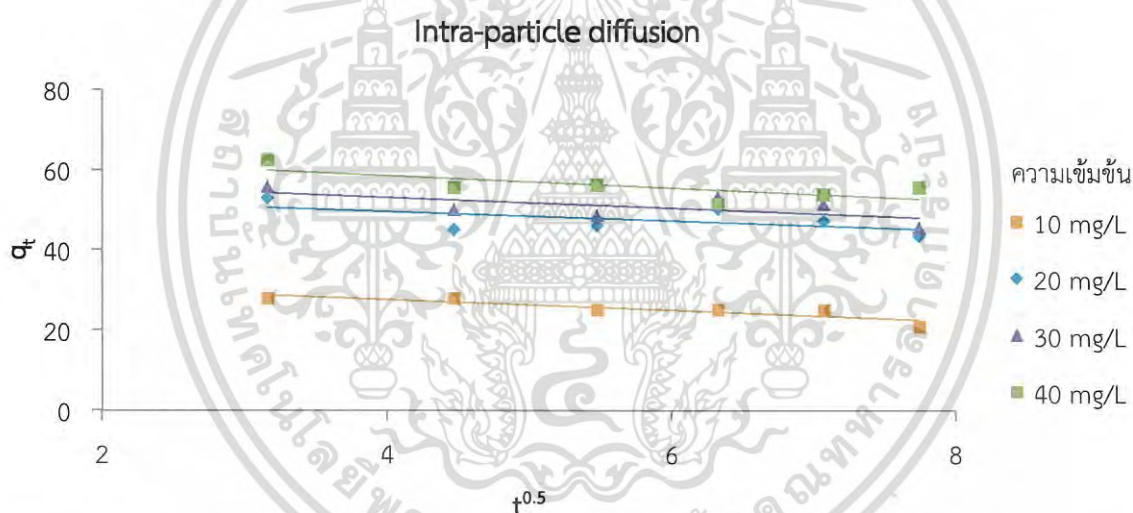


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา (t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.42** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ( $q_t$ ) กับ ล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ )

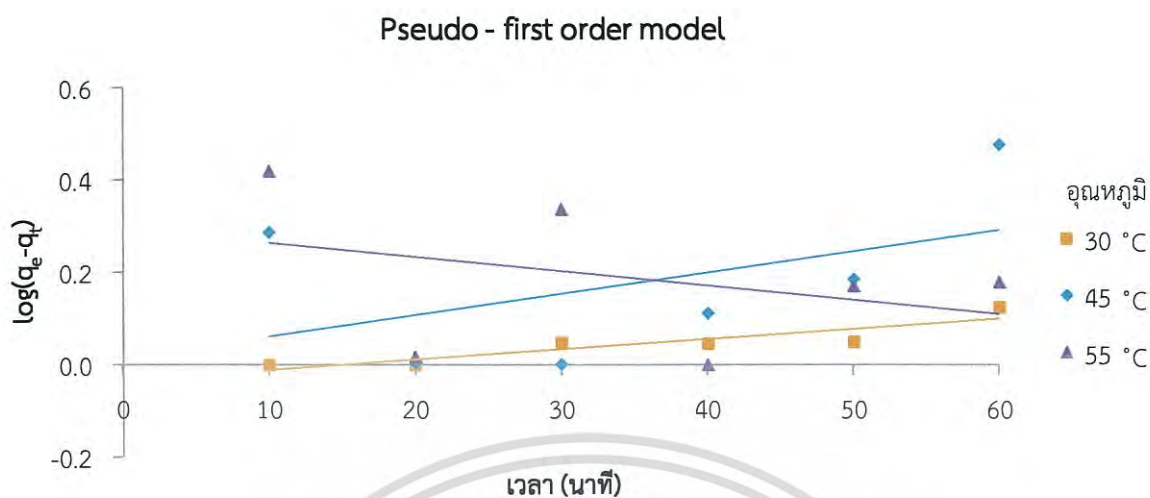


**รูปที่ 4.43** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ( $q_t$ ) กับ  $t^{0.5}$

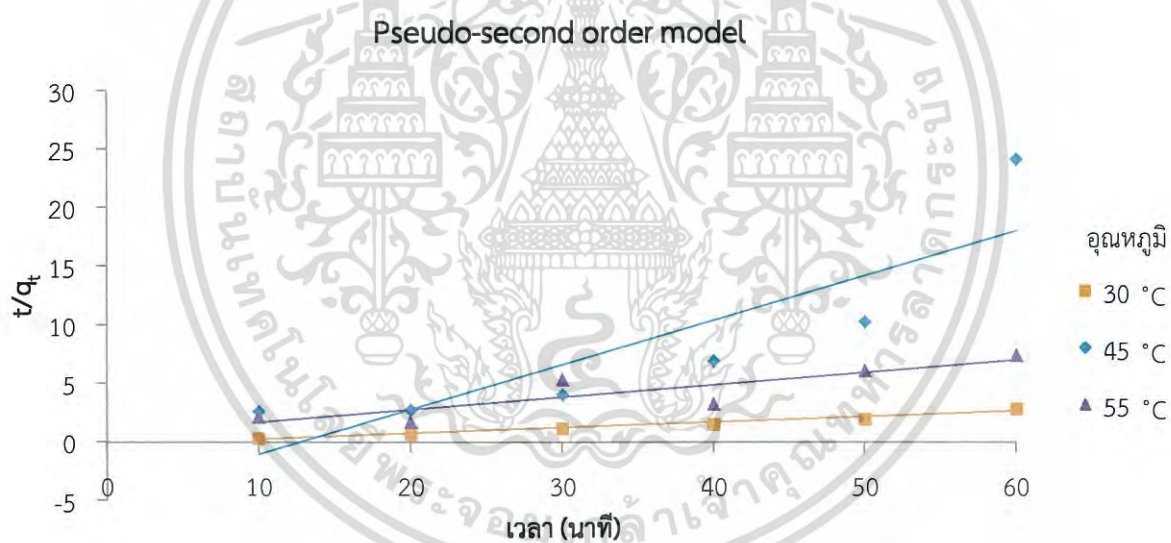
4.5.4 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน SDS/Fe - BC ดังนี้ 30 °C, 45 °C และ 55 °C

เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมด้วย SDS/Fe - BC ที่เวลาต่าง ๆ ( $q_t$ ) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงที่สุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.44, รูปที่ 4.45, รูปที่ 4.46 และ รูปที่ 4.47 ตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

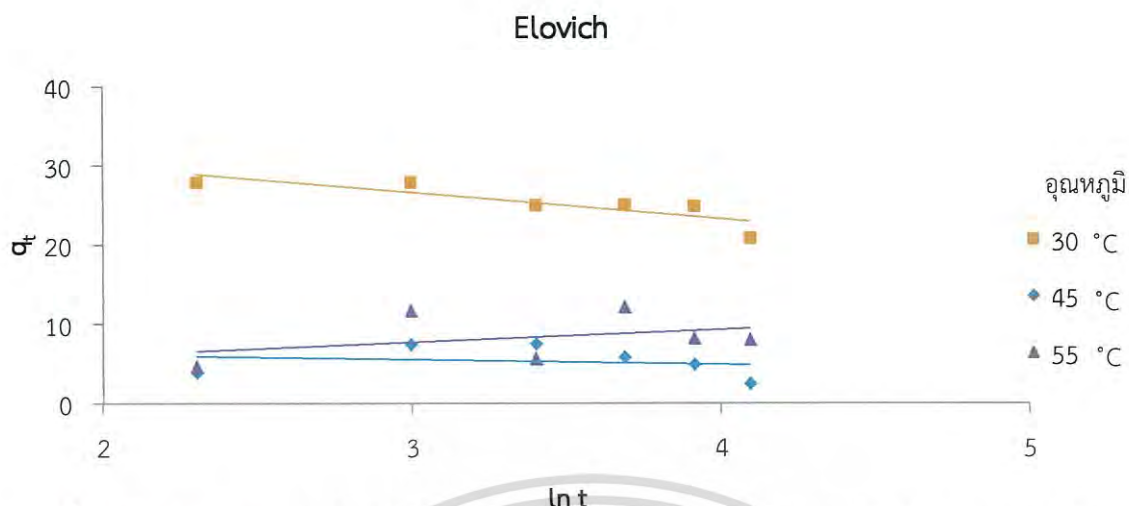


**รูปที่ 4.44** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $\log (q_e - q_t)$ ) กับเวลา ( $t$ )

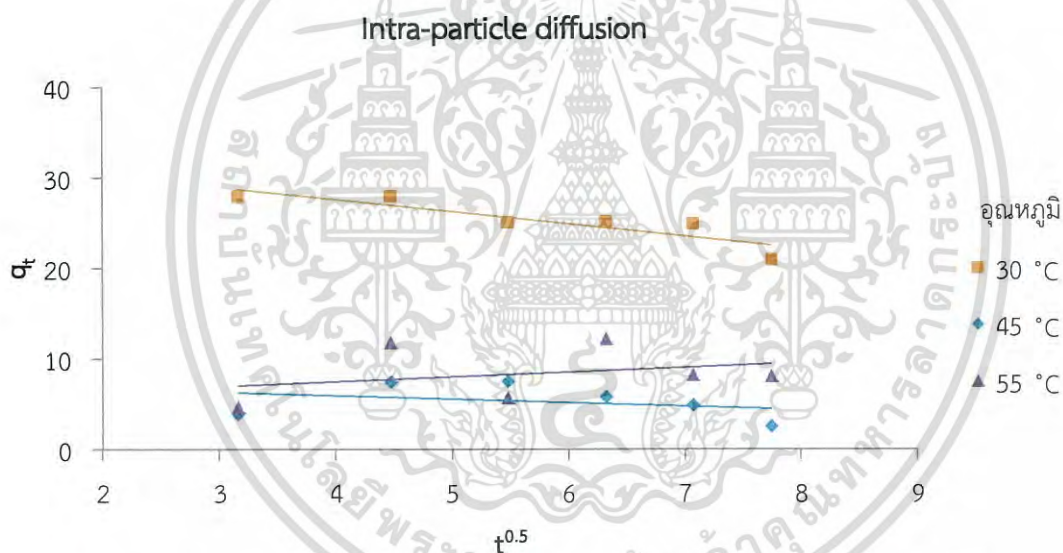


**รูปที่ 4.45** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $t/q_t$ ) กับเวลา ( $t$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.46** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ ล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ( $\ln t$ )



**รูปที่ 4.47** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ ( $q_t$ ) กับ  $t^{0.5}$

ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟที่ 4.32 - กราฟที่ 4.47 สามารถสรุปและแสดงดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.3** ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน BC

	ความเข้มข้น (mg/l)				อุณหภูมิ (°C)		
	10	20	30	40	30	45	55
<b>Pseudo first order</b>							
$K_1$ (1/min)	0.0088	0.0025	-0.0007	0.0005	0.0088	0.0230	0.0012
$q_e$ (mg/g)	32.7173	36.5951	27.4793	24.9125	32.7173	11.6468	22.0849
$R^2$	0.5243	0.0984	0.0044	0.0024	0.5243	0.7931	0.0107
<b>Pseudo second order</b>							
$K_2$ (g/mg min)	-0.0025	-0.0103	0.0052	0.0123	-0.0025	-0.0017	-0.0515
$q_e$ (mg/g)	32.7173	36.5951	27.4793	24.9125	32.7173	11.6468	22.0849
$R^2$	0.9158	0.9788	0.7316	0.9014	0.9158	0.8609	0.9330
<b>Elovich</b>							
$\alpha$ (mg/g min)	-0.0017	$-1.15 \times 10^{-8}$	$-1.75 \times 10^{-22}$	$-4.93 \times 10^{-9}$	-0.0017	-0.0189	$-1.19 \times 10^{-10}$
$\beta$ (mg/g)	-0.1799	-0.5597	-2.1805	-0.7828	-0.1799	-0.2437	-1.0669
$R^2$	0.4295	0.0682	0.0048	0.0568	0.4295	0.6940	0.0348
<b>Intra particle diffusion</b>							
$K_{id}$ (mg/g min)	-2.3240	-0.8121	0.0661	-0.3042	-2.3240	-1.6850	-0.3378
$R^2$	0.494	0.0928	0.0007	0.0212	0.4940	0.7701	0.0297

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน BC ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order model) มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order model) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ruthiraan และคณะ (2015) ที่ศึกษาจลนศาสตร์ระหว่างท่อนานคาร์บอนกับถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงสภาพแม่เหล็กในการกำจัดไอออนแคดเมียมจากน้ำเสีย

สำหรับสมการของ Elovich และสมการการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีค่าไม่สูงนักจึงอาจไม่เป็นสมการที่ดีที่จะอธิบายจลนศาสตร์ของการดูดซับได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน SDS/Fe - BC

	ความเข้มข้น (mg/l)				อุณหภูมิ (°C)		
	10	20	30	40	30	45	55
<b>Pseudo first order</b>							
$K_1$ (1/min)	0.0051	0.0021	0.0023	0.0025	0.0051	0.0106	-0.0071
$q_e$ (mg/g)	27.9640	52.9443	55.8968	62.4575	27.9640	7.4463	12.1791
$R^2$	0.8134	0.3170	0.4030	0.3993	0.8134	0.2221	0.1176
<b>Pseudo second order</b>							
$K_2$ (g/mg min)	-0.0057	-0.0087	-0.0066	-0.0172	-0.0057	-0.0037	0.0114
$q_e$ (mg/g)	27.9640	52.9443	55.8968	62.4575	27.9640	7.4463	12.1791
$R^2$	0.9769	0.9887	0.9836	0.9945	0.9769	0.7509	0.7575
<b>Elovich</b>							
$\alpha$ (mg/g min)	$-5.27 \times 10^{-5}$	$-4.85 \times 10^{-8}$	$-8.53 \times 10^{-8}$	$-5.03 \times 10^{-7}$	$-5.27 \times 10^{-5}$	$-2.80 \times 10^{-6}$	9.7332
$\beta$ (mg/g)	-0.3021	-0.3077	-0.2786	-0.2256	-0.3021	-1.6742	0.6183
$R^2$	0.7202	0.3862	0.4299	0.6219	0.7202	0.0403	0.1211
<b>Intra particle diffusion</b>							
$K_{id}$ (mg/g min)	-1.3500	-1.2045	-1.3707	-1.5785	-1.3500	-0.3788	0.5205
$R^2$	0.7884	0.3491	0.4126	0.5194	0.7884	0.1067	0.0826

เมื่อพิจารณารางที่ 4.4 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมบน SDS/Fe - BC ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order model) มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order model) เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anzeze และคณะ (2014) ที่ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วจากน้ำเสียด้วย ผักตบชวา

สำหรับสมการของ Elovich และสมการการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีค่าไม่สูงนักจึงอาจไม่เป็นสมการที่ดีที่จะอธิบาย จลนศาสตร์ของการดูดซับได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี

การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย BC และ SDS/Fe - BC เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 25 มิลลิกรัม และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อกรัม ปรับค่า pH เท่ากับ 8 ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ ( $\Delta H^0$ ) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ )

##### 4.6.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ( $\Delta H^0$ ) ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ ( $K$ ) คำนวณได้จากสมการ

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

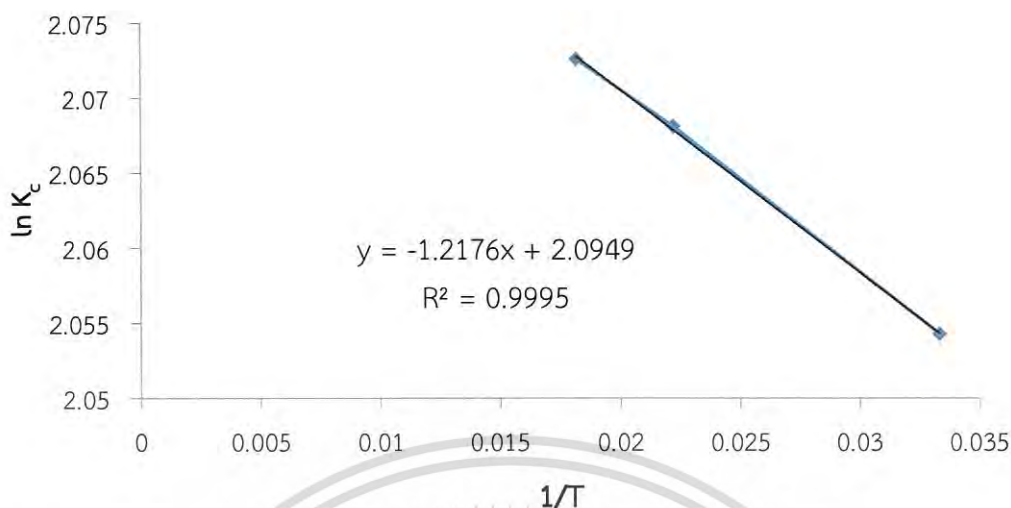
$$\ln K_c = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT}$$

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆของ BC

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ ( $K_c$ )
30	7.8010
45	7.9095
55	7.9454

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย BC ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $\frac{1}{T}$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ  $-\frac{\Delta H^0}{R}$  และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{\Delta S^0}{R}$



**รูปที่ 4.48** กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

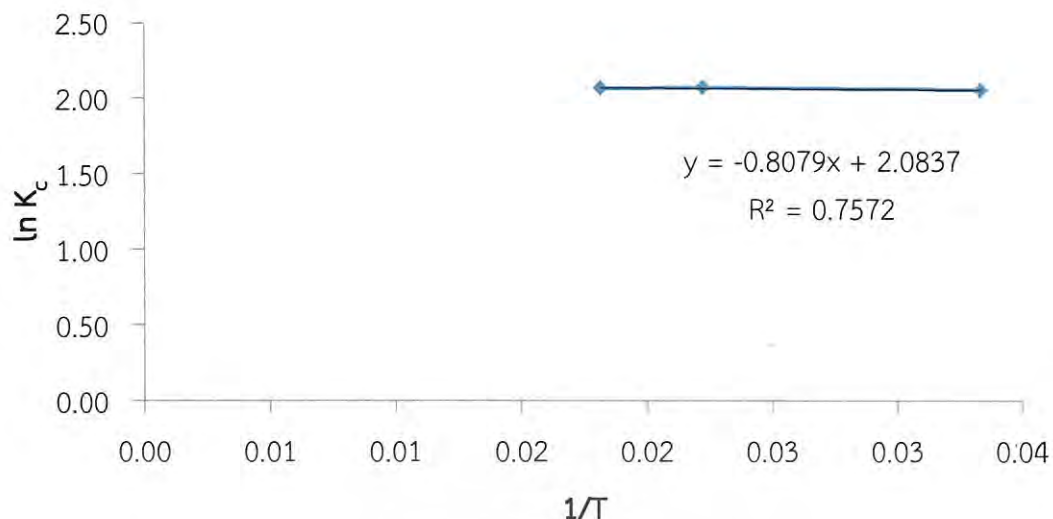
จากความชันที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์สามารถคำนวณค่าเอนทาลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) เท่ากับ 10.1231 J/mol ค่าเอนทาลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ( $\Delta H^0 =$  บวก) แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย BC เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับลดลงจะทำให้การดูดซับลดลง

**ตารางที่ 4.6** ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆของ SDS/Fe - BC

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K <sub>c</sub> )
30	7.81
45	7.92
55	7.89

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย SDS/Fe - BC ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $\frac{1}{T}$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ  $-\frac{\Delta H^0}{R}$  และ

จุดตัดแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{\Delta S^0}{R}$



**รูปที่ 4.49** กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากความชันที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์สามารถคำนวณค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ( $\Delta H^0$ ) เท่ากับ 6.7169 J/mol ค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ( $\Delta H^0 =$  บวก) แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย SDS/Fe - BC เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับลดลงจะทำให้การดูดซับลดลง

4.6.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

จากจุดตัดแกน y ของรูปที่ 4.48 ซึ่งจากสมการของแวนฮอฟฟ์เท่ากับ  $\frac{\Delta S^0}{R}$  ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) เท่ากับ 17.4170 J/mol.K และจากรูปที่ 4.49 เอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) เท่ากับ 17.3239 J/mol.K ซึ่งค่าเอนโทรปีของการดูดซับบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) และตัวถูกดูดซับ (Absorbate) โดยที่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ( $\Delta S^0 = +$ ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอกละถึงการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นลบ ( $\Delta S^0 = -$ ) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอกละถึงการเกิดพันธะหรือไม่มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้ของทั้งสองถ่านชีวภาพมีค่าเป็นบวก แสดงว่า โมเลกุลของแคดเมียมที่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีความตึงแน่นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

4.6.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับ

จากค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) นำมาแทนค่าในสมการ  $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย BC ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -5.2698, -5.5311 และ -5.7053 kJ/mol โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานอยู่ในช่วง -20 ถึง 0 kJ/mol และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับทางเคมีจะมีค่าอยู่ในช่วง -80 ถึง -400 kJ/mol ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีเท่ากับลบ การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ (Spontaneous Reaction) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน ( $\Delta G^0$ ) ของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วย SDS/Fe - BC ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -5.2450, -5.5049 และ -5.6781 kJ/mol โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานอยู่ในช่วง -20 ถึง 0 kJ/mol และการดูดซับทางเคมีจะมีค่าอยู่ในช่วง -80 ถึง -400 kJ/mol ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีเท่ากับลบ การดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมด้วยถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ (Spontaneous Reaction) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ

**ตารางที่ 4.7** ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของ BC

$\Delta H^0$ (J/mol)	$\Delta S^0$ (J/mol.K)	$\Delta G^0$ (kJ/mol)		
		30°C	45°C	55°C
10.1231	17.4170	-5.2698	-5.5311	-5.7053

**ตารางที่ 4.8** ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์ของ SDS/Fe - BC

$\Delta H^0$ (J/mol)	$\Delta S^0$ (J/mol.K)	$\Delta G^0$ (kJ/mol)		
		30°C	45°C	55°C
6.7169	17.3239	-5.2450	-5.5049	-5.6781

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. BC มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ไม่ปรากฏลักษณะความพรุนของพื้นผิว เมื่อเปรียบเทียบกับ SDS/Fe - BC จะมีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมต่อกันอยู่ และเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีส่วนผสมของเหล็กออกไซด์ปะปนอยู่บนพื้นผิวหรือแทรกเข้าไปในรูพรุน

2. SDS/Fe - BC ที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์ โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal

3. BC มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ) ที่  $\text{pH}$  7.40 ในทางตรงกันข้าม SDS/Fe - BC มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ) ที่ 3.00

4. ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC สูงที่สุดเมื่อน้ำเสียมีค่า  $\text{pH}$  เท่ากับ 8

5. ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC สูงที่สุดเมื่อเวลาเท่ากับ 5 ชั่วโมง ในทางตรงกันข้ามความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน SDS/Fe - BC สูงที่สุดเมื่อเวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมง

6. การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้น (% removal) แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) จะลดลง ในทางตรงกันข้ามการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน SDS/Fe - BC เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลง (% removal) มีค่าจาก 33.33 ไปเป็น 37.35, 41.30, 28.11 และ 17.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) จะลดลงเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC

7. การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะลดลง แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) เพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลง จาก 25.28 ไปเป็น 26.77, 14.12 และ 8.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน SDS/Fe - BC เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์จะลดลงเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลงจาก 20.68 ไปเป็น 27.38, 14.63 และ 17.89 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC

8. การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน SDS/Fe - BC เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และค่าความสามารถในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ เมื่อคิดเป็นมิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของตัวดูดซับจะลดลงและเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

9. ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC โดยพิจารณาสมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich และ Redlich - Peterson พบว่าการดูดซับในครั้งนี้เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบ Freundlich เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) สูงที่สุด เท่ากับ 0.9997 และ 0.9987 ตามลำดับ เมื่อเทียบการคำนวณตามแบบจำลองอื่น มีค่า  $K_F$  เท่ากับ 7.9013 และ 7.7911 ลิตรต่อมิลลิกรัมตามลำดับ จากสมการการดูดซับของ Dubinin - Radushkevich ค่า  $E$  ที่ได้บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากสมการการดูดซับของ Redlich - Peterson ค่า  $b_R$  เท่ากับ 0.0069 และ 0.0081 ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Freundlich

10. ในการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC โดยใช้แบบจำลองในการพิจารณา 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo - first order model), แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order model), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion) พบว่าการดูดซับในครั้งนี้เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี เกิดจากการดูดซับแคดเมียมบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า

11. จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้นทั้งสองแบบคือ กลไกการดูดซับทางกายภาพและเคมี อธิบายได้ว่ากลไกการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นมาจากการดูดซับแคดเมียมบนพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนของตัวดูดซับ ส่วนกลไกการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นมาจากการดูดซับแคดเมียมจากประจุลบของสารเคลือบ SDS บนตัวดูดซับ

12. ค่า  $\Delta H^0$  ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC เท่ากับ 10.1231 J/mol และ 6.7169 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลการดูดซับที่ได้เป็นการดูดความร้อน

13. ค่า  $\Delta S^0$  ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC และ SDS/Fe - BC มีค่าเป็นบวกคือเท่ากับ 17.4170 J/mol.K และ 17.3239 J/mol.K แสดงว่าเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

14. ค่า  $\Delta G^0$  ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน BC ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -5.2698, -5.5311 และ -5.7053 kJ/mol ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $\Delta G^0$  ของการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์บน SDS/Fe - BC 30, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ

-5.2450, -5.5049 และ -5.6781 kJ/mol ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ของถ่านทั้ง 2 ชนิด สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ (Spontaneous Reaction) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ

15. SDS/Fe – BC มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ได้ดีกว่า BC เนื่องจาก SDS/Fe – BC มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เท่ากับ 78.60 ในขณะที่ BC มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เท่ากับ 67.25 อีกทั้ง SDS/Fe – BC ใช้เวลาในการบำบัดที่น้อยกว่าและง่ายต่อการแยกถ่านออกจากสารละลาย เนื่องจาก SDS/Fe – BC มีสถานะเป็นแม่เหล็ก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของตัวดูดซับด้วยสารเคมีชนิดอื่น เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมโอดีเตคซิลซัลโฟเนท
2. ควรมีการศึกษาการเปรียบเทียบถ่านที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่มีขั้นตอนกระบวนการแบบเดียวกับถ่านที่ปรับปรุงคุณภาพ
3. ควรมีการศึกษาการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวภาพก่อนการดูดซับและถ่านชีวภาพหลังการดูดซับ
4. ควรมีการศึกษาการใช้วัสดุธรรมชาติชนิดอื่น ๆ มาใช้ในการดูดซับโลหะแคดเมียม นอกเหนือจากผักตบชวา
5. ควรนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในโรงงานอุตสาหกรรม
6. ควรมีการศึกษาการเติมสารเคมีที่ใช้จริงในโรงงานบำบัดเตอรัลงไปในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับ
7. ควรมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่น ๆ นอกเหนือโลหะแคดเมียม
8. ควรมีการศึกษาการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาใช้ให้เป็นประโยชน์ หรือทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กุลธิดา สะอาด. 2557. “ประสิทธิภาพการดูดติดผิวไอออนทองแดงของถ่านชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม) คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- โกวิทย์ ปิยะมังคลา, จารุวรรณ ตาพวัฒน์, ปิยวัฒน์ โพธิมงคลกุล และฉัฐรส คงสมภักดิ์. 2551. “จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน”. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 18(1).
- ฉัฐพร จันท์ประภา. 2556. “การดูดซับไอออนของโลหะหนักด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมจากเปลือกหอยทะเล”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นภดล ไชยคา, พีรวรรณ พันธุ์นาวัน และลัดดา ผดุงทรัพย์, ผู้แปล. 2542. เคมี. 1. กรุงเทพฯ : แมคกรอฮิล.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานุกรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539. (2539, 13 กุมภาพันธ์). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 113 ตอนที่ 13 ง. หน้า 1-5.
- พดาร์ตน์ นิลเจียรนัย และปียนันท์ น้อยรอด. 2559. “ประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (VI) ด้วยผลฝ้ายและไมยราบยักษ์”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ. 2(2) : 5-9.
- ภานุมาศ พรหมเทศ. 2549. “การดูดซับทองแดงออกจากสารละลายโดยใช้กากองุ่น”. รายงานวิจัย คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.
- ยุพดี เส้นขาว. 2557. “การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(2) : 1-18.
- ยุวรัตน์ ประมีศนาภรณ์. 2544. “การพัฒนาวัสดุดูดซับจากไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลลิตา แสงอาทิตย์. 2554. “การดูดซับยาปฏิชีวนะ Norfloxacin โดยใช้แกลบที่ pH 5 – 8”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. 2555. “การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ”. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 60(189) : 1-3.
- อรทัย ศุกรีย์พงศ์. 2541. “โลหะหนักในดินนาของประเทศไทย”. *วารสารนิเวศวิทยา*. 1(25) : 37-49.
- César Ricardo Teixeira Tarley and Marco Aurélio Zezzi Arruda. 2004. “Biosorption of heavy metals using rive milling by-products. Characterisation and application for removal of metals from aqueous effluents”. *Chemosphere*. 54 : 987-995.
- Davis Amboga Anzeze, John Mmari Onyari, Paul Mwanza Shiundu and John W Gichuki. 2014. “Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) : Equilibrium and kinetic studies”. *International Journal of Environmental Pollution and Remediation (IJEPR)*. 2 : 89-95.
- Dinesh Mohan, Hemant Kumar, Ankur Sarswat, M. Alexandre-Franco and Charles U. Pittman Jr. 2014. “Cadmium and lead remediation using magnetic oak wood and oak bark fast pyrolysis biochars”. *Chemical Engineering Journal*. 236 : 513-528.
- Feng Zhang, Xin Wang, Daixia Yin, Bo Peng, Changyin Tan, Yunguo Liu ,Xiaofei Tan and Shixue Wu. 2015A. “Efficiency and mechanisms of Cd removal from aqueous solution by biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*).” *Journal of Environmental Management*. 153 : 68–73.
- Irina Morosanu, Carmen Teodosiu, Carmen Paduraru, Dumitrita Ibanescu and LaviniaTofan. 2017. “Biosorption of lead ions from aqueous effluents by rapeseed biomass”. *New Biotechnology*. 39 : 110-124.
- J. Shang, J. Pi, M. Zong, Y. Wang, W. Li and Q. Liao. 2016. “Chromium removal using magnetic biochar derived from herb-residue”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 68 : 289–294.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J. Zheng, H. Liu, H. Feng, W. Li, M. H. Lam, P. K. Lam and H. Yu. 2016. “Competitive sorption of heavy metals by water hyacinth roots”. *Environmental Pollution*. 219 : 837–845.

Kalhorinia S, Naseeruddin S, Yadav KS, Goli JK and Rao LV. 2013. “Optimization of acid and enzymatic saccharification of lignocellulosic substrate Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)”. *ISRJ*. 3(9) : 1–10.

Kawamura S. 2000. **Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities**. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley and Sons.

Lukáš Trakal, Veronika Veselská, Ivo Šafarčík, Martina Vitková, Sylva Číhalová and Michael Komárek. 2016. “Lead and cadmium sorption mechanisms on magnetically modified biochars”. *Bioresource Technology*. 203 : 318–324.

Manimaran Ruthiraan, Nabisab Mujawar Mubarak, Raj Kogiladas Thines, Ezzat Chan Abdullah, Jaya Narayan Sahu, Natesan Subramanian Jayakumar and Poobalan Ganesan. 2015. “Comparative kinetic study of functionalized carbon nanotubes and magnetic biochar for removal of Cd<sup>2+</sup> ions from wastewater”. *Korea J. Chem. Eng.* 32(3) : 446-457.

Mohammad Boshir Ahmed, John L. Zhou, Huu H. Ngo, Wenshan Guo and Mengfang Chen. 2016. “Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater”. *Bioresource Technology*. 214 : 836–851.

Mohammad Ajmal, Rifaqat Ali Khan Rao, Shahana Anwar, Jameel Ahmad and Rais Ahmad. 2003. “Adsorption studies on rice husk : removal and recovery of Cd(II) from wastewater”. *Bioresource Technology*. 86 : 147-149.

M. Sarkar, A .K. M. L. Rahman and N. C. Bhoumik. 2017. “Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder”. *Water Resources and Industry*. 17 : 1–6.

M. Zhang, Y. Liu, T. Li, W. Xu, B. Zheng, X. Tan, H. Wang, Y. Guo, F. Guo and S. Wang. 2015B. “Chitosan modification of magnetic biochar produced from *Eichhornia crassipes* for enhanced sorption of Cr (VI) from aqueous solution”. *RSC Adv.* 5 : 46955–46964.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Phoochinda W. 1999. "Removal of Emulsified Oil from Wastewater using Froth Flotation". M.Sc. Thesis, Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University in Academic Partnership with the University of Michigan, the University of Oklahoma and Case Western Reserve University.
- Q. Cheng, Q. Huang, S. Khan, Y. Liu, Z. Liao, G. Li and Y. S. Ok. 2016. "Adsorption of Cd by peanut husks and peanut husk biochar from aqueous solutions". *Ecological Engineering*. 87 : 240–245.
- Qixuan Song, Baoshan Yang, Hui Wang, Shipeng Xu and Yanan Cao. 2016. "Effective removal of copper (II) and cadmium (II) by adsorbent prepared from chitosan-modified magnetic biochar". *Journal of Residuals Science & Technology*. 13 : 197-205.
- R. Azargohar, K.L. Jacobson, E.E. Powell and A.K. Datal. 2013. "Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained from Canadian waste biomass". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 104 : 330–340.
- Sadeek A. Sadeek, Nabel A. Negm, Hassan H.H. Hefni and Mostafa M. Abdel Wahab. 2015. "Metal adsorption by agricultural biosorbents: Adsorption isotherm, kinetic and biosorbents chemical structures". *International Journal of Biological Macromolecules*. 81 : 400–409.
- Syed Zaghum Abbas, Mohd Rafatullah, Norli Ismail and Japareng Lalung. 2014. "Isolation, Identification and Characterization of Cadmium Resistant *Pseudomonas* sp. M3 from Industrial Wastewater". *Journal of Waste Management*. 2014 : 1-6.
- X. Cui, S. Fang, Y. Yao, T. Li, Q. Ni, X. Yang and Z. He. 2016. "Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by *Canna indica* derived biochar". *Science of The Total Environment*. 562 : 517–525.
- Y. Han, X. Cao, X. Ouyang, S. P. Sohi and J. Chen. 2016. "Adsorption kinetics of magnetic biochar derived from peanut hull on removal of Cr (VI) from aqueous solution: Effects of production conditions and particle size". *Chemosphere*. 145 : 336-341.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## กราฟมาตรฐานสารละลายแคดเมียม

## ก.1 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาณ 10 มิลลิ - ลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐาน แคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มิลลิลิตร ตามลำดับ นำมาเจือจางด้วย น้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

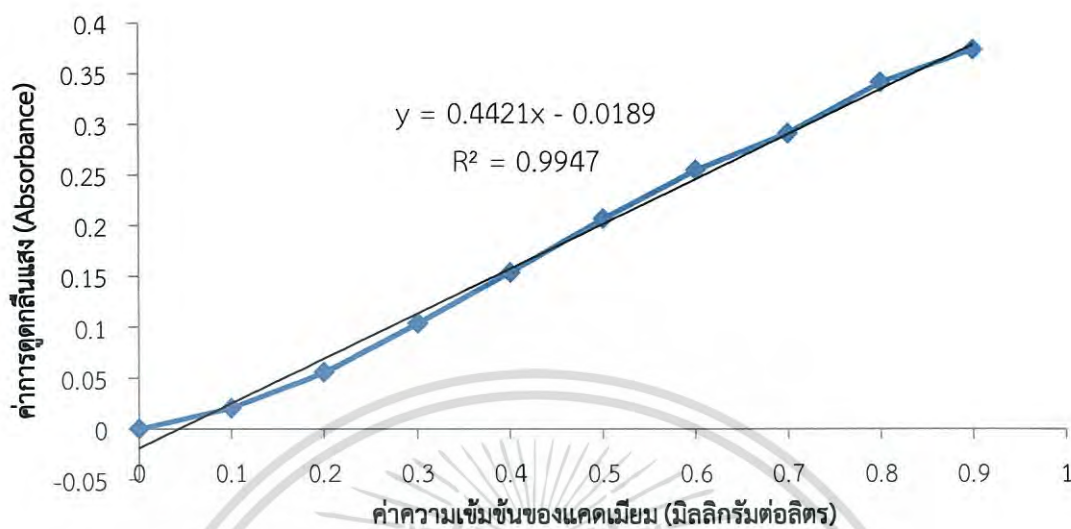
3. เก็บสารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ในขวดพลาสติก ไว้ในตู้เย็น รอนำไปวัดหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษา ปัจจัย pH ของ BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.020
0.2	0.056
0.3	0.104
0.4	0.154
0.5	0.207
0.6	0.255
0.7	0.291
0.8	0.341
0.9	0.374

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของ BC

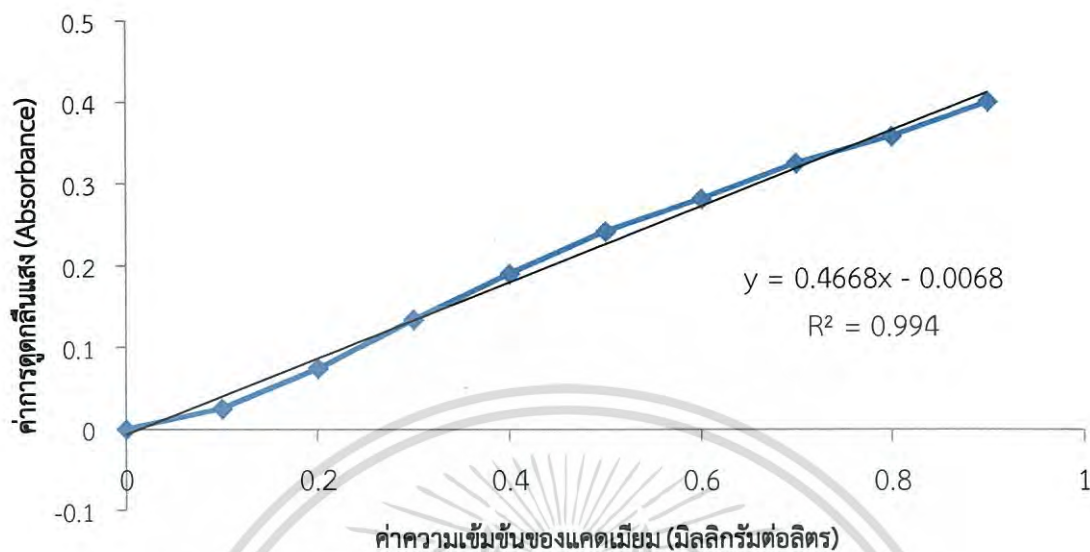


ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของ SDS/Fe - BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.025
0.2	0.074
0.3	0.134
0.4	0.190
0.5	0.242
0.6	0.282
0.7	0.326
0.8	0.359
0.9	0.401

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัย pH ของ SDS/Fe - BC

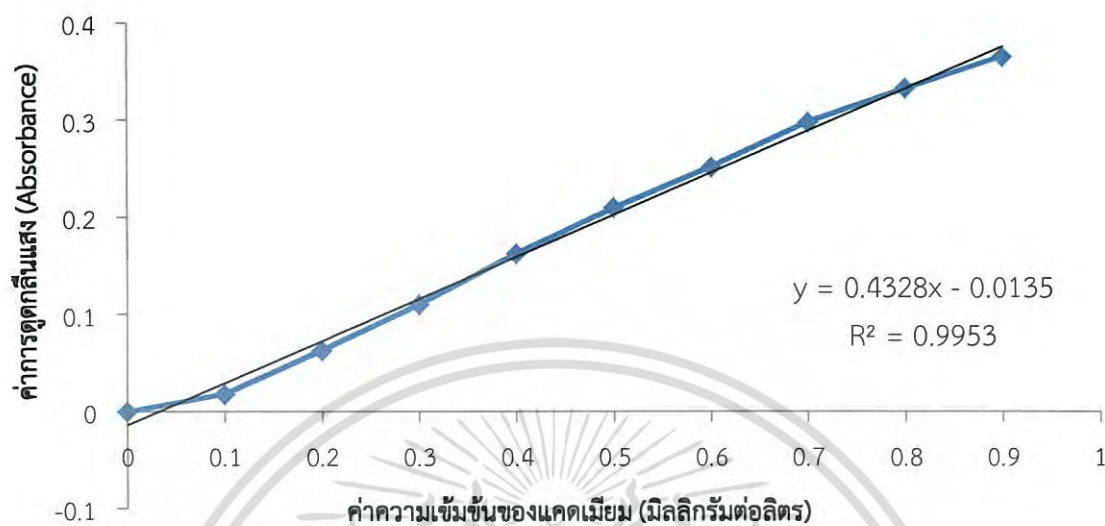


ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.0182
0.2	0.0629
0.3	0.1103
0.4	0.1625
0.5	0.2101
0.6	0.2518
0.7	0.2982
0.8	0.3329
0.9	0.3655

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ BC

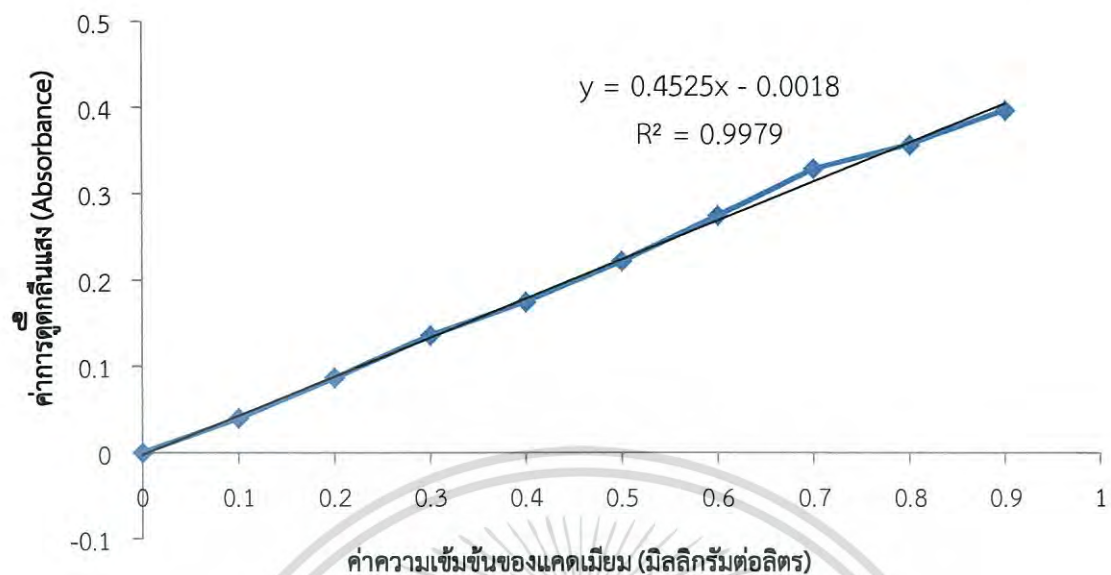


ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ SDS/Fe - BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.040
0.2	0.087
0.3	0.136
0.4	0.175
0.5	0.222
0.6	0.275
0.7	0.329
0.8	0.357
0.9	0.397

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับของ SDS/Fe - BC

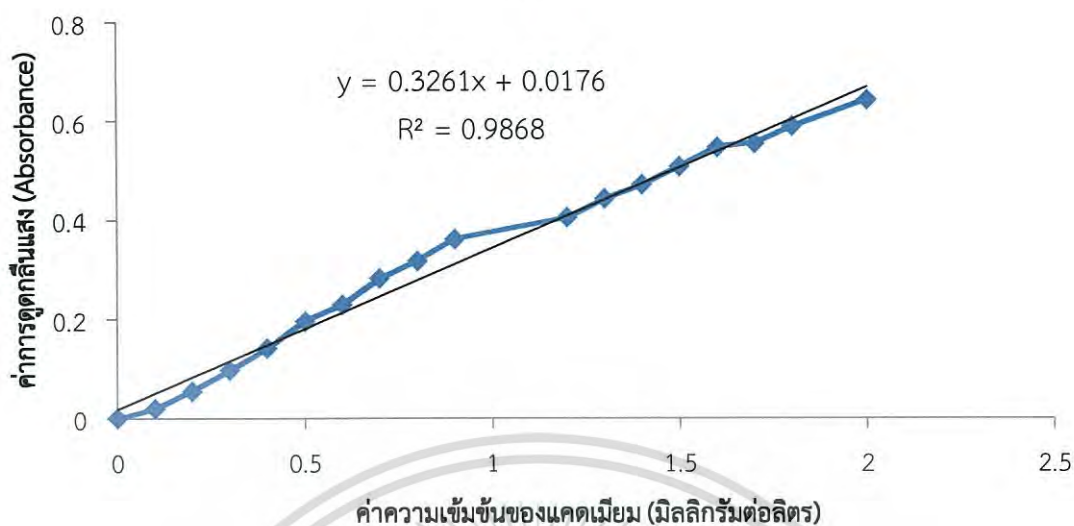


ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.019
0.2	0.055
0.3	0.097
0.4	0.141
0.5	0.196
0.6	0.229
0.7	0.282
0.8	0.318
0.9	0.362
1.2	0.405
1.3	0.443
1.4	0.471
1.5	0.508
1.6	0.547
1.7	0.555
1.8	0.589
2.0	0.643

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ BC

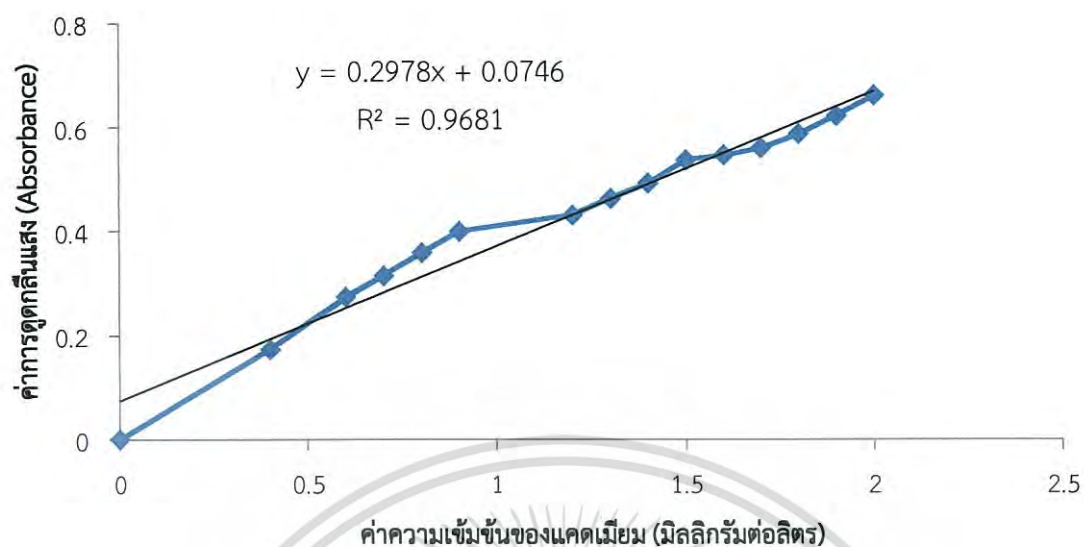


ตารางที่ ก.6 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ SDS/Fe - BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.4	0.173
0.6	0.274
0.7	0.315
0.8	0.359
0.9	0.400
1.2	0.431
1.3	0.463
1.4	0.492
1.5	0.537
1.6	0.546
1.7	0.560
1.8	0.587
1.9	0.622
2.0	0.661

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.6 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของ SDS/Fe - BC

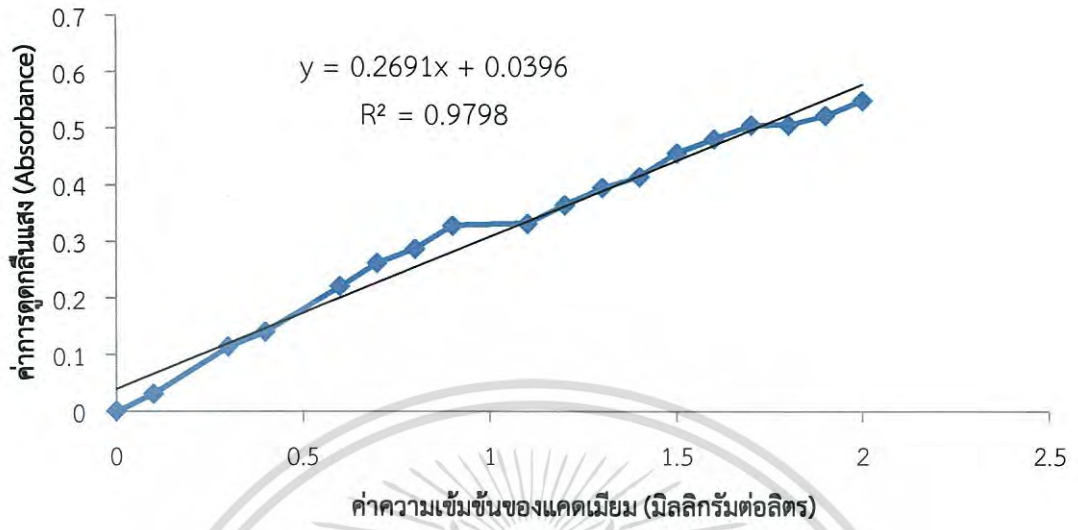


ตารางที่ ก.7 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยอุณหภูมิของ BC และ SDS/Fe - BC

ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0.1	0.031
0.3	0.114
0.4	0.141
0.6	0.221
0.7	0.262
0.8	0.287
0.9	0.328
1.1	0.331
1.2	0.364
1.3	0.394
1.4	0.414
1.5	0.456
1.6	0.481
1.7	0.505
1.8	0.506
1.9	0.522
2.0	0.549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.7 กราฟมาตรฐานของสารละลายแคดเมียมในการศึกษาปัจจัยอุณหภูมิของ BC และ SDS/Fe - BC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการ ดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

**ข.1** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

**รูปที่ ข.1.1** ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ BC เมื่อน้ำเสียมี pH เท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.1** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้น ที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	0	4.420	-	-	-
1	1	3.460	0.1016	16.29	1.41919
2		4.380	0.1001		
3		3.940	0.1012		
1	2	3.240	0.1016	24.89	2.17838
2		3.380	0.1001		
3		3.340	0.1012		
1	3	3.220	0.1016	22.85	2.00028
2		3.600	0.1001		
3		3.620	0.1012		
1	4	4.000	0.1016	24.43	2.15165
2		2.680	0.1001		
3		4.700	0.1012		
1	5	2.860	0.1016	36.43	3.19377
2		2.760	0.1001		
3		3.320	0.1012		
1	6	2.260	0.1016	40.12	3.51030
2		2.860	0.1001		
3		2.820	0.1012		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.2** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	0	4.000	-	-	-
1	1	3.680	0.1027	12.00	0.9272
2		3.320	0.1022		
3		3.560	0.1063		
1	2	3.380	0.1027	14.67	1.1345
2		3.320	0.1022		
3		3.540	0.1063		
1	3	3.420	0.1027	16.25	1.2693
2		3.280	0.1022		
3		3.960	0.1063		
1	4	4.040	0.1027	40.00	3.0730
2		2.340	0.1022		
3		2.460	0.1063		
1	5	2.280	0.1027	40.17	3.1095
2		2.060	0.1022		
3		2.840	0.1063		
1	6	2.180	0.1027	46.25	2.9722
2		2.120	0.1022		
3		3.100	0.1063		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.3** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้น ที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	0	4.540	-	-	-
1	1	3.520	0.1027	27.75	2.4606
2		2.740	0.1003		
3		3.580	0.1063		
1	2	3.080	0.1027	27.90	2.4393
2		3.900	0.1003		
3		2.840	0.1063		
1	3	2.720	0.1027	40.68	3.5812
2		2.760	0.1003		
3		2.600	0.1063		
1	4	2.100	0.1027	46.11	4.0837
2		2.100	0.1003		
3		3.140	0.1063		
1	5	1.580	0.1027	62.85	5.5303
2		1.960	0.1003		
3		1.520	0.1063		
1	6	1.740	0.1027	56.39	4.9697
2		2.100	0.1003		
3		2.100	0.1063		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.4** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	0	3.900	-	-	-
1	1	3.840	0.1001	2.56	0.1989
2		3.840	0.1003		
3		3.720	0.1008		
1	2	3.600	0.1001	5.30	0.4120
2		3.720	0.1003		
3		3.760	0.1008		
1	3	3.920	0.1001	20.00	1.5484
2		3.740	0.1003		
3		2.500	0.1008		
1	4	2.360	0.1001	42.56	3.3055
2		2.460	0.1003		
3		1.900	0.1008		
1	5	1.840	0.1001	46.67	3.6332
2		2.320	0.1003		
3		1.520	0.1008		
1	6	1.860	0.1001	50.94	3.9572
2		2.100	0.1003		
3		1.780	0.1008		

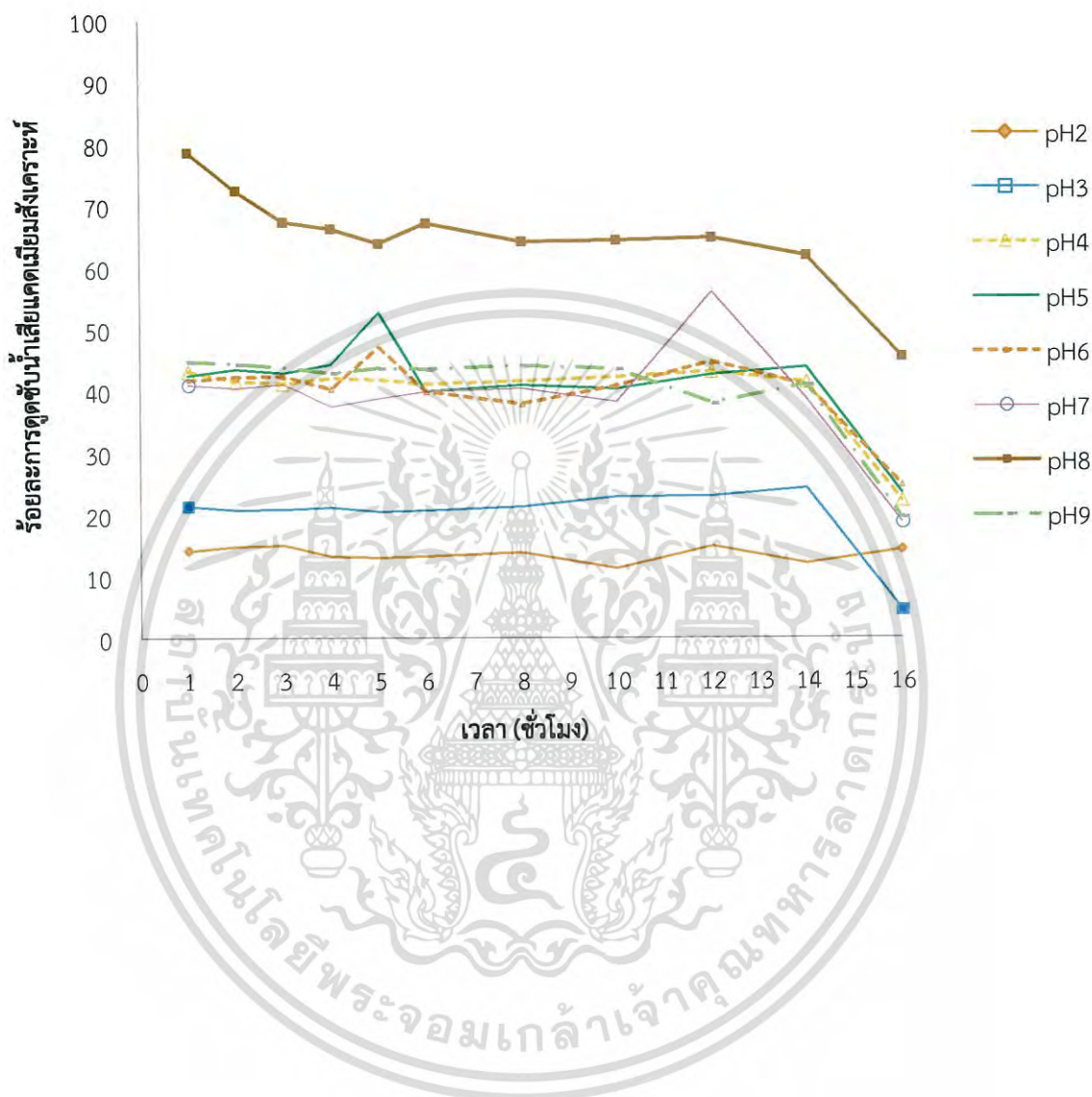
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.5** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	0	4.580	-	-	-
1	1	3.120	0.1022	28.82	2.6105
2		3.140	0.1006		
3		3.520	0.1004		
1	2	2.280	0.1022	46.58	4.2201
2		2.580	0.1006		
3		2.480	0.1004		
1	3	2.640	0.1022	46.72	4.2376
2		2.600	0.1006		
3		2.080	0.1004		
1	4	2.400	0.1022	47.89	4.3410
2		2.560	0.1006		
3		2.200	0.1004		
1	5	1.400	0.1022	67.25	6.0738
2		1.600	0.1006		
3		1.320	0.1004		
1	6	1.960	0.1022	57.21	5.1680
2		1.960	0.1006		
3		1.520	0.1004		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ ข.1.2** ร้อยละการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ SDS/Fe - BC เมื่อน้ำเสียมี pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้นของน้ำเสีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.6** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยอัตราส่วน SDS/Fe - BC ต่อปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.466	0.1003	14.10	2.7404
2		0.428	1.1032		
3		0.431	0.1026		
1	2	0.640	0.1003	14.80	2.8850
2		0.012	0.1032		
3		0.426	0.1026		
1	3	0.452	0.1003	15.00	2.9153
2		0.423	0.1032		
3		0.427	0.1026		
1	4	0.660	0.1003	13.20	2.5659
2		0.437	0.1032		
3		0.431	0.1026		
1	5	0.444	0.1003	13.00	2.5448
2		0.42	0.1032		
3		0.441	0.1026		
1	6	0.595	0.1003	13.20	2.5662
2		0.439	0.1032		
3		0.429	0.1026		
1	8	0.304	0.1003	13.80	2.6744
2		0.431	1.1032		
3		0.513	0.1026		
1	10	0.831	0.1003	11.20	2.1705
2		0.444	0.1032		
3		0.575	0.1026		
1	12	0.567	0.1003	14.80	2.8682
2		0.426	0.1032		
3		0.662	0.1026		
1	14	0.580	0.1003	12.00	2.3256
2		0.440	0.1032		
3		0.567	0.1026		
1	16	0.489	0.1003	14.20	2.7581
2		0.369	0.1032		
3		0.679	0.1026		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.7** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.384	0.1033	21.27	4.2815
2		0.400	0.1068		
3		0.397	0.1012		
1	2	0.391	0.1033	20.67	3.9867
2		0.401	0.1068		
3		0.398	0.1012		
1	3	0.369	0.1033	20.80	4.0091
2		0.402	0.1068		
3		0.390	0.1012		
1	4	0.369	0.1033	21.07	4.0682
2		0.413	0.1068		
3		0.402	0.1012		
1	5	0.405	0.1033	20.40	3.9399
2		0.404	0.1068		
3		0.385	0.1012		
1	6	0.400	0.1033	20.60	3.9211
2		0.394	0.1068		
3		0.355	0.1012		
1	8	0.391	0.1033	21.20	4.0392
2		0.397	0.1068		
3		0.366	0.1012		
1	10	0.376	0.1033	22.80	4.9897
2		0.413	0.1068		
3		0.369	0.1012		
1	12	0.373	0.1033	22.90	4.3690
2		0.398	0.1068		
3		0.550	0.1012		
1	14	0.359	0.1033	24.20	4.6213
2		0.399	0.1068		
3		0.295	0.1012		
1	16	0.441	0.1033	4.40	1.3260
2		0.478	0.1068		
3		0.478	0.1012		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1.8** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.294	0.1001	43.13	8.5063
2		0.263	0.1009		
3		0.296	0.1034		
1	2	0.295	0.1001	41.50	8.2584
2		0.290	0.1009		
3		0.304	0.1034		
1	3	0.275	0.1001	41.13	8.1141
2		0.305	0.1009		
3		0.303	0.1034		
1	4	0.271	0.1001	42.07	7.8763
2		0.290	0.1009		
3		0.308	0.1034		
1	5	0.273	0.1001	41.73	8.2387
2		0.281	0.1009		
3		0.320	0.1034		
1	6	0.301	0.1001	41.00	8.1584
2		0.289	0.1009		
3		0.306	0.1034		
1	8	0.262	0.1001	41.50	8.1301
2		0.285	0.1009		
3		0.300	0.1034		
1	10	0.300	0.1001	42.13	8.3055
2		0.278	0.1009		
3		0.290	0.1034		
1	12	0.291	0.1001	43.07	8.4899
2		0.278	0.1009		
3		0.285	0.1034		
1	14	0.298	0.1001	41.33	8.1488
2		0.287	0.1009		
3		0.295	0.1034		
1	16	0.385	0.1001	22.20	1.3260
2		0.393	0.1009		
3		0.409	0.1034		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.9 ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	-	0.1015	42.40	8.3200
2		0.294	0.1027		
3		0.282	0.1012		
1	2	0.222	0.1015	43.40	8.5150
2		0.285	0.1027		
3		0.281	0.1012		
1	3	0.28	0.1015	42.87	8.77
2		0.272	0.1027		
3		0.305	0.1012		
1	4	0.271	0.1015	44.20	8.6818
2		0.269	0.1027		
3		0.297	0.1012		
1	5	0.231	0.1015	52.60	8.2387
2		0.243	0.1027		
3		0.077	0.1012		
1	6	0.308	0.1015	39.87	7.8297
2		0.284	0.1027		
3		0.310	0.1012		
1	8	0.304	0.1015	40.80	8.1590
2		0.284	0.1027		
3		0.300	0.1012		
1	10	0.296	0.1015	40.27	7.9920
2		0.301	0.1027		
3		0.299	0.1012		
1	12	0.284	0.1015	42.53	8.4899
2		0.290	0.1027		
3		0.288	0.1012		
1	14	0.293	0.1015	43.70	8.5579
2		0.270	0.1027		
3		0.348	0.1012		
1	16	0.369	0.1015	23.40	4.4186
2		0.397	0.1027		
3		0.432	0.1012		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.10 ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.275	0.1011	41.60	8.1888
2		0.261	0.1017		
3		0.309	0.1022		
1	2	0.286	0.1011	42.20	8.4616
2		0.285	0.1017		
3		0.296	0.1022		
1	3	0.286	0.1011	42.33	8.6170
2		0.303	0.1017		
3		0.276	0.1022		
1	4	0.295	0.1011	40.27	7.9219
2		0.300	0.1017		
3		0.301	0.1022		
1	5	0.061	0.1011	47.00	9.2429
2		0.265	0.1017		
3		0.702	0.1022		
1	6	0.282	0.1011	39.80	7.8323
2		0.302	0.1017		
3		0.319	0.1022		
1	8	0.304	0.1011	37.80	7.4390
2		0.332	0.1017		
3		0.318	0.1022		
1	10	0.302	0.1011	40.73	7.8504
2		0.288	0.1017		
3		0.299	0.1022		
1	12	0.268	0.1011	44.60	8.7774
2		0.231	0.1017		
3		0.286	0.1022		
1	14	0.307	0.1011	40.80	7.7233
2		0.319	0.1017		
3		0.285	0.1022		
1	16	0.379	0.1011	24.70	4.8715
2		0.374	0.1017		
3		0.429	0.1022		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.11 ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่ อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.278	0.1012	40.93	7.6393
2		0.306	0.1005		
3		0.302	0.1048		
1	2	0.296	0.1012	40.40	7.7721
2		0.294	0.1005		
3		0.304	0.1048		
1	3	0.298	0.1012	41.00	8.7751
2		0.266	0.1005		
3		0.321	0.1048		
1	4	0.306	0.1012	37.40	7.4161
2		0.320	0.1005		
3		0.330	0.1048		
1	5	0.295	0.1012	38.70	7.6733
2		0.318	0.1005		
3		0.326	0.1048		
1	6	0.293	0.1012	39.80	7.8919
2		0.309	0.1005		
3		0.340	0.1048		
1	8	0.283	0.1012	40.33	7.9032
2		0.302	0.1005		
3		0.310	0.1048		
1	10	0.293	0.1012	38.10	7.5536
2		0.326	0.1005		
3		0.334	0.1048		
1	12	0.183	0.1012	55.90	10.8925
2		0.225	0.1005		
3		0.216	0.1048		
1	14	0.301	0.1012	38.60	7.5015
2		0.330	0.1005		
3		0.313	0.1048		
1	16	0.562	0.1012	18.70	3.6414
2		0.411	0.1005		
3		0.402	0.1048		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.12 ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.021	0.1017	78.60	15.4334
2		0.099	0.1035		
3		0.115	0.1002		
1	2	0.036	0.1017	72.40	12.1975
2		0.158	0.1035		
3		0.220	0.1002		
1	3	0.041	0.1017	67.30	13.2117
2		0.152	0.1035		
3		0.175	0.1002		
1	4	0.044	0.1017	66.20	12.9908
2		0.150	0.1035		
3		0.188	0.1002		
1	5	0.039	0.1017	63.80	12.5290
2		0.177	0.1035		
3		0.185	0.1002		
1	6	0.046	0.1017	67.10	13.1698
2		0.149	0.1035		
3		0.180	0.1002		
1	8	0.066	0.1017	64.10	12.5780
2		0.160	0.1035		
3		0.199	0.1002		
1	10	0.082	0.1017	64.30	12.6320
2		0.182	0.1035		
3		0.175	0.1002		
1	12	0.060	0.1017	64.70	12.6984
2		0.161	0.1035		
3		0.192	0.1002		
1	14	0.082	0.1017	61.80	12.1349
2		0.185	0.1035		
3		0.197	0.1002		
1	16	0.107	0.1017	45.50	8.9285
2		0.259	0.1035		
3		0.286	0.1002		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1.13 ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 9 ที่อุณหภูมิห้อง

ขวดที่	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	1	0.275	0.1032	44.70	8.3200
2		0.343	0.1034		
3		0.278	0.1025		
1	2	0.260	0.1032	44.30	8.5150
2		0.297	0.1034		
3		0.358	0.1025		
1	3	0.276	0.1032	43.73	8.7751
2		0.292	0.1034		
3		0.276	0.1025		
1	4	0.277	0.1032	42.87	8.3211
2		0.293	0.1034		
3		0.287	0.1025		
1	5	0.290	0.1032	43.60	8.4795
2		0.329	0.1034		
3		0.274	0.1025		
1	6	0.280	0.1032	43.40	8.4028
2		0.286	0.1034		
3		0.315	0.1025		
1	8	0.271	0.1032	44.00	8.5417
2		0.293	0.1034		
3		0.276	0.1025		
1	10	0.292	0.1032	43.47	8.4403
2		0.300	0.1034		
3		0.256	0.1025		
1	12	0.350	0.1032	37.90	7.3639
2		0.316	0.1034		
3		0.305	0.1025		
1	14	0.315	0.1032	40.90	7.9457
2		0.295	0.1034		
3		0.296	0.1025		
1	16	0.390	0.1032	19.40	3.7565
2		0.416	0.1034		
3		0.437	0.1025		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข.2** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสีย แคลเดียมสังเคราะห์

**ตารางที่ ข.2.1** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคลเดียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคลเดียมสังเคราะห์ 200 มิลลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 5 ชั่วโมง

ขวดที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	-	5.000	-	-
1	0.0256	4.200	11.20	43.8515
2	0.0258	5.220		
3	0.0251	4.680		
1	0.1003	4.140	24.13	12.3854
2	0.1004	3.880		
3	0.1000	3.360		
1	0.3002	0.880	78.93	5.9564
2	0.3008	0.820		
3	0.3002	1.460		
1	0.5009	0.300	94.40	3.8728
2	0.5043	0.220		
3	0.5007	0.320		
1	0.7015	0.080	96.67	2.8026
2	0.7011	0.160		
3	0.7026	0.260		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.2.2** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 1 ชั่วโมง

ขวดที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $\sigma_c$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	-	9.960	-	-
1	0.0254	9.560	33.33	26.4406
2	0.0252	6.200		
3	0.0250	7.080		
1	0.1000	7.380	37.35	7.4195
2	0.1002	5.940		
3	0.1005	5.400		
1	0.3002	6.000	41.30	2.7410
2	0.3001	5.840		
3	0.3001	5.700		
1	0.5005	7.860	28.11	1.1190
2	0.5007	6.260		
3	0.5001	7.360		
1	0.7009	7.820	17.77	0.5053
2	0.7001	8.560		
3	0.7003	13.260		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข.3** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

**ตารางที่ ข.3.1** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 5 ชั่วโมง

ขวดที่	ค่าความเข้มข้นก่อนการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้นหลังการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	8.840	0.0257	5.160	36.65	25.28
2	8.840	0.0256	5.640		
3	8.840	0.0256	6.000		
1	14.340	0.0253	16.160	20.17	26.77
2	14.340	0.0252	13.660		
3	14.340	0.0253	13.100		
1	22.240	0.0257	20.860	8.14	14.12
2	22.240	0.0256	20.000		
3	22.240	0.0257	21.540		
1	28.400	0.0250	26.520	3.80	8.57
2	28.400	0.0254	27.360		
3	28.400	0.0250	27.280		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.3.2** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10, 20, 30 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe - BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 1 ชั่วโมง

ขวดที่	ค่าความเข้มข้นก่อนการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้นหลังการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	8.840	0.0250	9.160		
2	8.840	0.0250	5.520	29.41	20.68
3	8.840	0.0254	6.960		
1	14.340	0.0257	12.140		
2	14.340	0.0258	13.740	20.92	27.38
3	14.340	0.0253	13.880		
1	22.240	0.0258	21.220		
2	22.240	0.0257	20.360	8.45	14.63
3	22.240	0.0256	21.620		
1	28.400	0.0257	25.460		
2	28.400	0.0254	27.080	8.05	17.89
3	28.400	0.0255	25.800		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข.4** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์

**ตารางที่ ข.4.1** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย BC ต่อ ปริมาณน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่ อุณหภูมิห้อง เวลา 5 ชั่วโมง

ขวดที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้น ที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $q_e$ (มิลลิกรัมต่อ กรัม)
Blank	30	-	8.840	-	-
1	30	0.0257	5.160	36.65	25.2752
2	30	0.0256	5.640		
3	30	0.0256	6.000		
Blank	45	-	7.400	-	-
1	45	0.0254	5.340	31.98	18.7192
2	45	0.0255	4.960		
3	45	0.0250	4.800		
Blank	55	-	7.380	-	-
1	55	0.0250	4.700	31.44	18.4333
2	55	0.0255	6.220		
3	55	0.0252	4.260		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.4.2** ผลต่อการดูดซับน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย SDS/Fe-BC ต่อปริมาตรน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 1 ชั่วโมง

ขวดที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ย $d_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
Blank	30	-	8.840	-	-
1	30	0.0256	9.160	29.41	20.3125
2	30	0.0257	5.520		
3	30	0.0256	6.960		
Blank	45	-	7.400	-	-
1	45	0.0254	7.220	10.135	4.4369
2	45	0.0250	6.720		
3	45	0.0255	6.580		
Blank	55	-	7.380	-	-
1	55	0.0252	8.200	21.409	12.4725
2	55	0.0250	5.940		
3	55	0.0255	5.660		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้ ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

**ตารางที่ ค.1** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของแคดเมียม ที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
10	8.840	5.600	25.2752
20	14.340	13.380	26.7680
30	22.240	20.430	14.1196
40	28.400	27.320	8.5745

**ตารางที่ ค.2** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย SDS/Fe – BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของแคดเมียม ที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
10	8.840	6.240	20.6816
20	14.340	13.253	27.3770
30	22.240	20.360	14.6304
40	28.400	26.113	17.8884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยศึกษา อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

**ตารางที่ ง.1** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของแคดเมียม ที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
10	8.840	5.600	25.2752
20	14.340	13.380	26.7680
30	22.240	20.430	14.1196
40	28.400	27.320	8.5745

**ตารางที่ ง.2** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย SDS/Fe – BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียม ( $C_0$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของแคดเมียม ที่เหลือ ( $C_e$ ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
10	8.840	6.240	20.6816
20	14.340	13.253	27.3770
30	22.240	20.360	14.6304
40	28.400	26.113	17.8884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง.3** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C <sub>0</sub> ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย (C <sub>e</sub> ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q <sub>e</sub> (มิลลิกรัมต่อกรัม)
30	8.840	5.600	25.2752
45	7.400	5.033	18.7192
55	7.380	5.060	18.4333

**ตารางที่ ง.4** ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์และความเข้มข้นของน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ที่เหลือที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยด้วย SDS/Fe – BC ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.125 กรัมต่อลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C <sub>0</sub> ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย (C <sub>e</sub> ) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	q <sub>e</sub> (มิลลิกรัมต่อกรัม)
30	8.840	6.240	20.3125
45	7.400	6.840	4.4369
55	7.380	5.800	12.4725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### การคำนวณ

#### จ-1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### จ1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียม

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสารละลาย Stock ( $\text{Cd}^{2+}$ ) เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร  
หาปริมาณ  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้  
น้ำหนักโมเลกุล  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = 308.48$  กรัมต่อโมล  
ปริมาตรที่ใช้คำนวณจาก

$\text{Cd}^{2+}$  มีมวลอะตอม 112.41 g/mol จากสารตั้งต้น  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  มีมวลโมเลกุล 308.48 g/mol

$$\begin{aligned} \text{ต้องการ } \text{Cd}^{2+} \text{ เข้มข้น } 1,000 \text{ mg/L} \text{ ต้องชั่งสาร } \text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} &= \frac{308.48 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 1,000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{112.41 \text{ g/mol}} \\ &= 2,744.23 \text{ mg} \\ &= 2.7442 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย  
ชั่ง  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ประมาณ 2.7442 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 65% ให้  
pH น้อยกว่า 2 เพื่อรักษาสภาพสารละลาย แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัด  
ปริมาตรขนาด 1 ลิตร

##### จ1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์

เตรียมสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{40\text{g/mol}} &= \frac{(0.1\text{M}) \cdot 100\text{mL}}{1000} \end{aligned}$$

$$\text{g} = 4 \text{ g}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

### จ1.3 สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์

เตรียมสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จาก HCl ความเข้มข้น 35.4 %

ความหนาแน่น HCl = 1.19 กรัมต่อมิลลิลิตร

น้ำหนักโมเลกุล HCl = 36.5 กรัมต่อโมล

$$\text{จากสูตร} \quad M = \frac{\% \times 10 \times D}{MW}$$

$$M = \frac{35.4 \times 10 \times 1.19}{36.5}$$

$$M = 11.5414 \text{ mol/L}$$

$$\begin{aligned} \text{และ} \quad C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ (11.5414 \text{ mol/L}) V_1 &= (0.1 \text{ mol/L}) (100 \text{ mL}) \\ V_1 &= 0.87 \text{ mL} \\ &= 87 \mu\text{L} \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 35.4 % มา 87  $\mu\text{L}$  ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

### จ1.4 สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนต (SDS) เข้มข้น 0.01 โมลาร์

เตรียมสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนต (SDS) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{g}{MW} &= \frac{CV}{1000} \\ \frac{g}{289.43 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.01 \text{ M}) \cdot 500 \text{ mL}}{1000} \\ g &= 1.4472 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนต (SDS) เข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยชั่งโซเดียมโดเดคซิลซัลโฟเนต (SDS) จำนวน 1.4472 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร

### จ1.5 สารละลายเฟอริกคลอไรด์ 2.5 โมลาร์

หาปริมาณ  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้

น้ำหนักโมเลกุล  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 270.32$  กรัมต่อโมล

$$\text{จากสูตร} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} = \frac{\text{CV}}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{162.2 \text{ g/mol}} = \frac{(2.5 \text{ M}) \cdot 250\text{mL}}{1000}$$

$$\text{g} = 101.38 \text{ g}$$

ปริมาตรที่ใช้คำนวณจาก

$\text{FeCl}_3$  มีมวลโมเลกุล 162.2 g/mol จากสารตั้งต้น  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  มีมวลโมเลกุล 270.32 g/mol

$$\begin{aligned} \text{ต้องการ } \text{FeCl}_3 \quad 101.38 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่งสาร } \text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= \frac{270.32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 101.38 \text{ g}}{162.2 \text{ g/mol}} \\ &= 168.9583 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 2.5 โมลาร์ โดยชั่ง  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  มา 168.9583 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

## ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าคงที่ผลคูณการละลายของสารละลาย ( $K_{sp}$ )การคำนวณการตกตะกอนของสารประกอบ  $Cd(OH)_2$  ตั้งแต่ pH 2 - 10

การศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ในการทดลองได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ทำการปรับ pH ซึ่งเมื่อถึง pH ที่ค่าหนึ่งๆจะเกิดการตกตะกอนซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นคือ ตะกอนของสารประกอบ ( $Cd(OH)_2$ ) โดยสามารถหาได้จาก การคำนวณค่าของผลคูณไอออนเปรียบเทียบกับค่า  $K_{sp}$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ผลคูณสารละลาย

ถ้าค่าผลคูณไอออนมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$  แสดงว่า เกิดการตกตะกอน

ถ้าค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$  แสดงว่า ไม่เกิดการตกตะกอน

1.การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH ต่างๆ ของ  $Cd^{2+}$ 

ไอออนในที่นี้คือ  $Cd^{2+}$  และ  $OH^-$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



กำหนดค่าคงที่ผลคูณสารละลาย ( $K_{sp}$ ) ของ  $Cd(OH)_2$  เท่ากับ  $2 \times 10^{-14}$  โมลาร์

## 1.1 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 2

โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-12}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-12})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-29}$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$

สรุป pH 2 ไม่เกิดการตกตะกอน  $Cd(OH)_2$

### 1.2 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 3

โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-11}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-11})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-27}$
แสดงว่า	ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า $K_{sp}$		
<b>สรุป</b>	pH 3 ไม่เกิดการตกตะกอน $Cd(OH)_2$		

### 1.3 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 4

โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-10}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-10})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-25}$
แสดงว่า	ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า $K_{sp}$		
<b>สรุป</b>	pH 4 ไม่เกิดการตกตะกอน $Cd(OH)_2$		

### 1.4 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 5

โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-9}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-9})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-23}$
แสดงว่า	ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า $K_{sp}$		
<b>สรุป</b>	pH 5 ไม่เกิดการตกตะกอน $Cd(OH)_2$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 6

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & [\text{Cd}^{2+}] & = 8.89 \times 10^{-5} \\
 & [\text{OH}^-] & = 10^{-8} \\
 \text{จาก} & K_{sp} & = [\text{Cd}^{2+}][\text{OH}^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} & 2 \times 10^{-14} & = (8.89 \times 10^{-5})(10^{-8})^2 \\
 & & = 8.89 \times 10^{-21}
 \end{array}$$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$

**สรุป** pH 6 ไม่เกิดการตกตะกอน  $\text{Cd}(\text{OH})_2$

### 1.6 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 7

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & [\text{Cd}^{2+}] & = 8.89 \times 10^{-5} \\
 & [\text{OH}^-] & = 10^{-7} \\
 \text{จาก} & K_{sp} & = [\text{Cd}^{2+}][\text{OH}^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} & 2 \times 10^{-14} & = (8.89 \times 10^{-5})(10^{-7})^2 \\
 & & = 8.89 \times 10^{-19}
 \end{array}$$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$

**สรุป** pH 7 ไม่เกิดการตกตะกอน  $\text{Cd}(\text{OH})_2$

### 1.7 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 8

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & [\text{Cd}^{2+}] & = 8.89 \times 10^{-5} \\
 & [\text{OH}^-] & = 10^{-6} \\
 \text{จาก} & K_{sp} & = [\text{Cd}^{2+}][\text{OH}^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} & 2 \times 10^{-14} & = (8.89 \times 10^{-5})(10^{-6})^2 \\
 & & = 8.89 \times 10^{-17}
 \end{array}$$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$

**สรุป** pH 8 ไม่เกิดการตกตะกอน  $\text{Cd}(\text{OH})_2$

### 1.8 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 9

โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-5}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-5})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-15}$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า  $K_{sp}$

**สรุป** pH 9 ไม่เกิดการตกตะกอน  $Cd(OH)_2$

### 1.9 การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 10

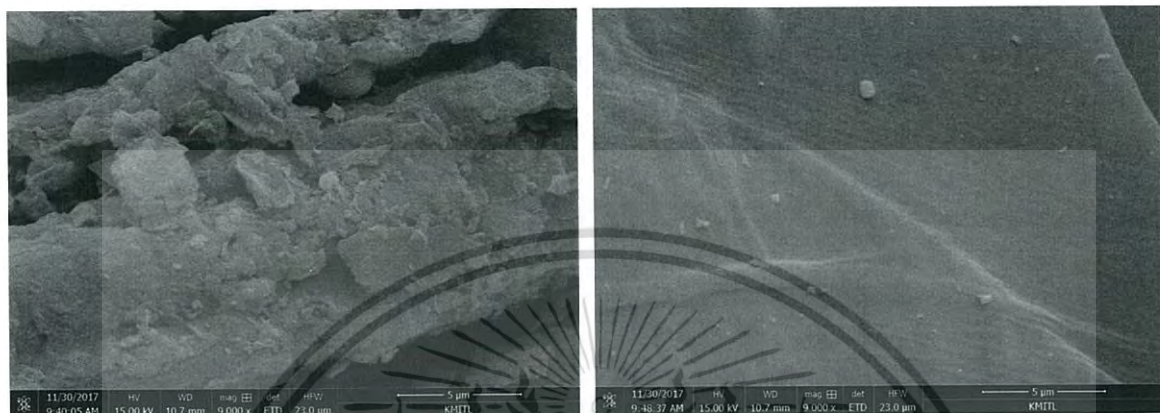
โดย	$[Cd^{2+}]$	=	$8.89 \times 10^{-5}$
	$[OH^-]$	=	$10^{-4}$
จาก	$K_{sp}$	=	$[Cd^{2+}][OH^-]^2$
ดังนั้น	$2 \times 10^{-14}$	=	$(8.89 \times 10^{-5})(10^{-4})^2$
		=	$8.89 \times 10^{-12}$

แสดงว่า ค่าผลคูณไอออนมีค่ามากกว่าค่า  $K_{sp}$

**สรุป** pH 10 เกิดการตกตะกอน  $Cd(OH)_2$

## ภาคผนวก ช

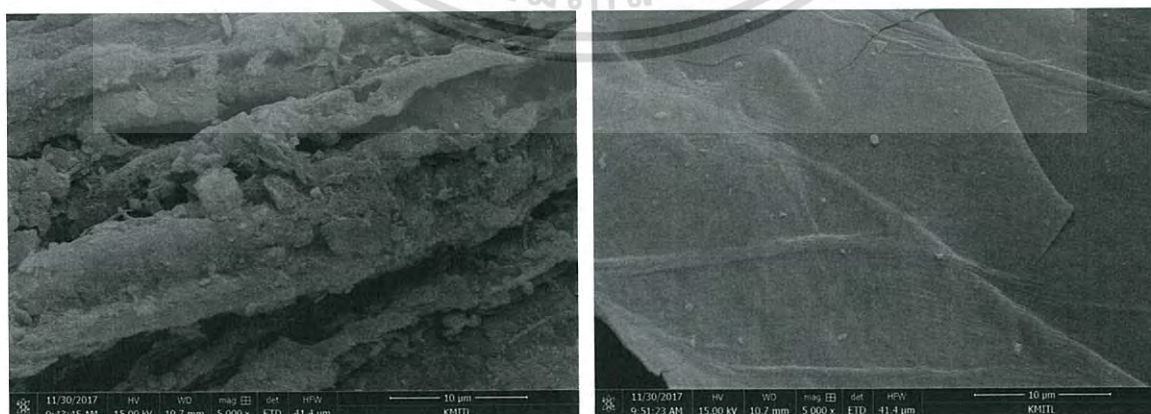
# ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope



(a)

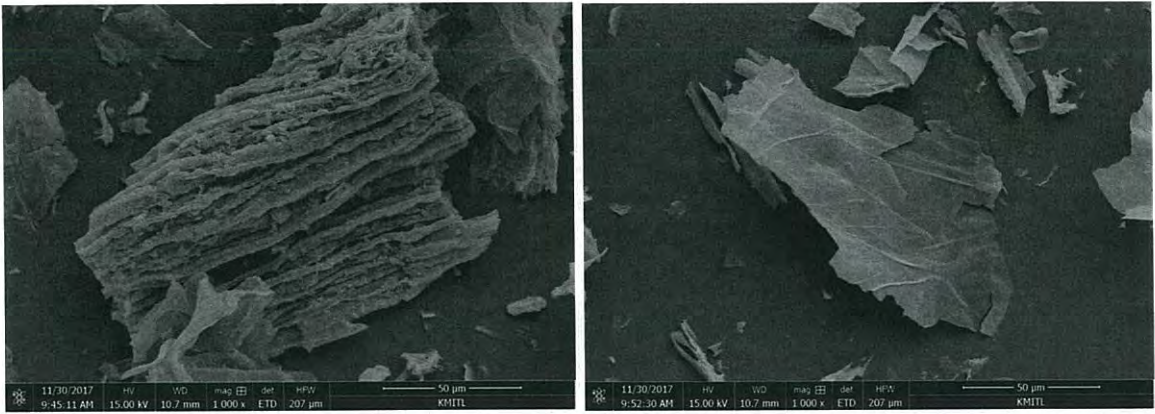


(b)

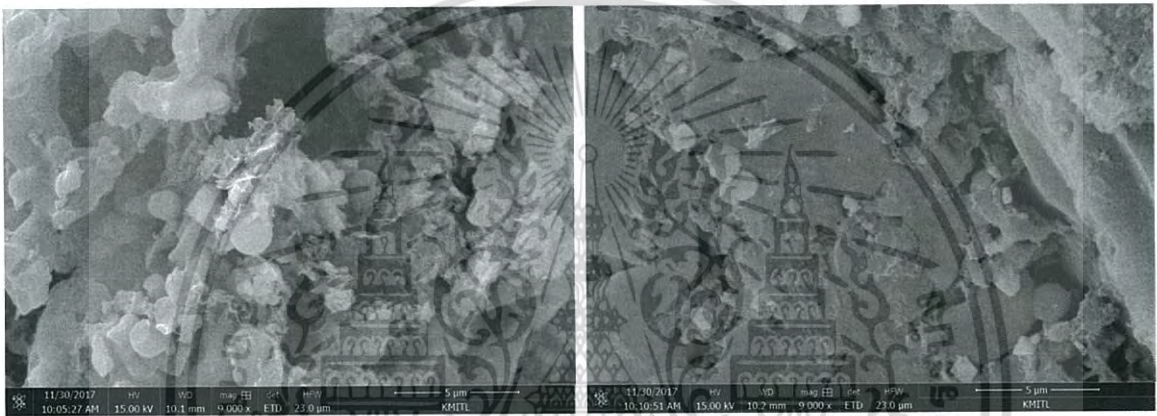


(c)

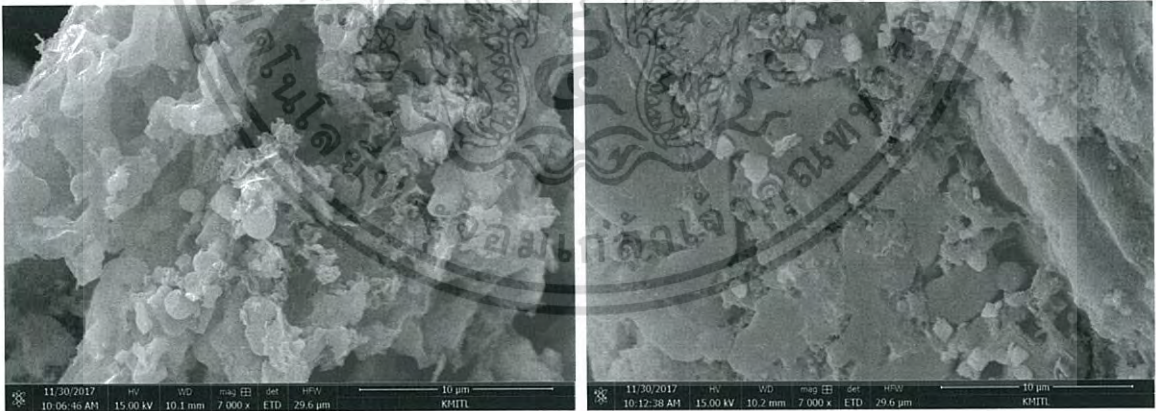
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)

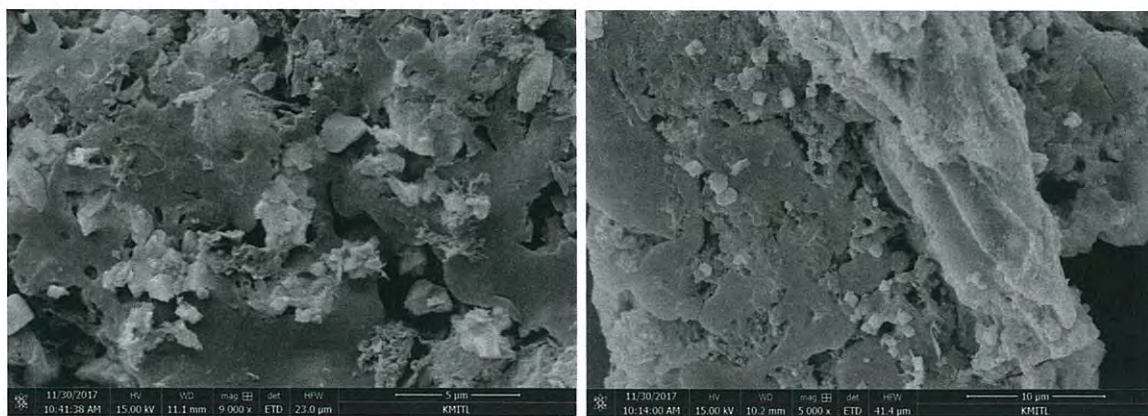


(e)

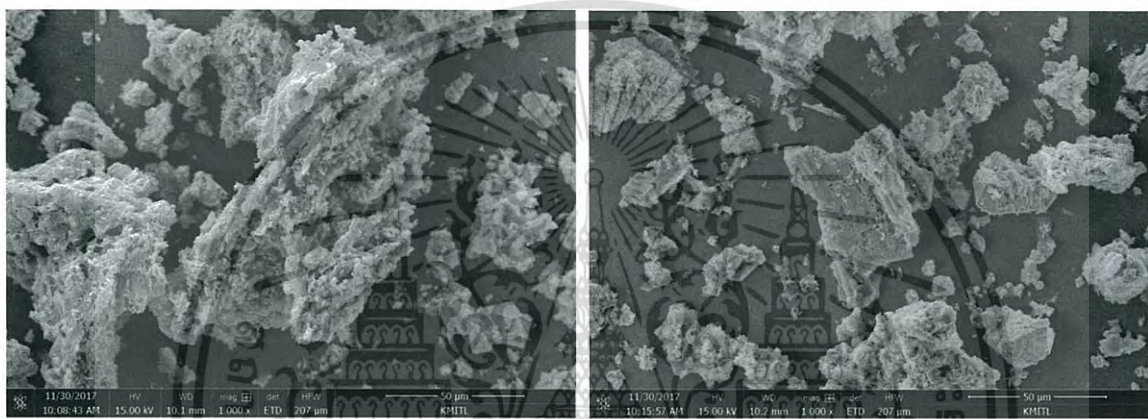


(f)

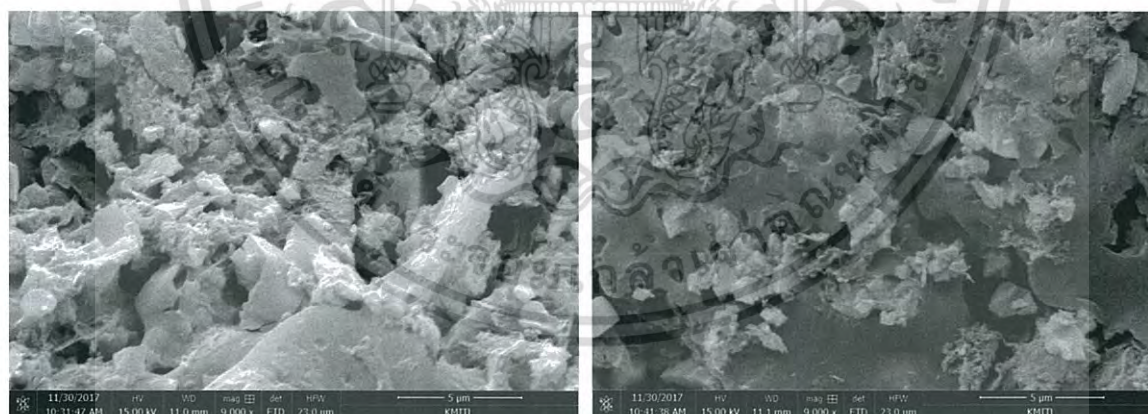
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g)

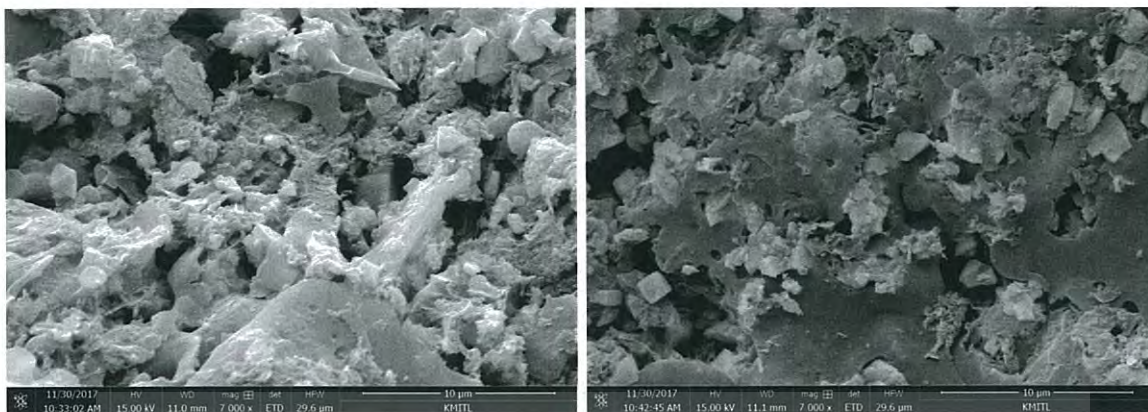


(h)

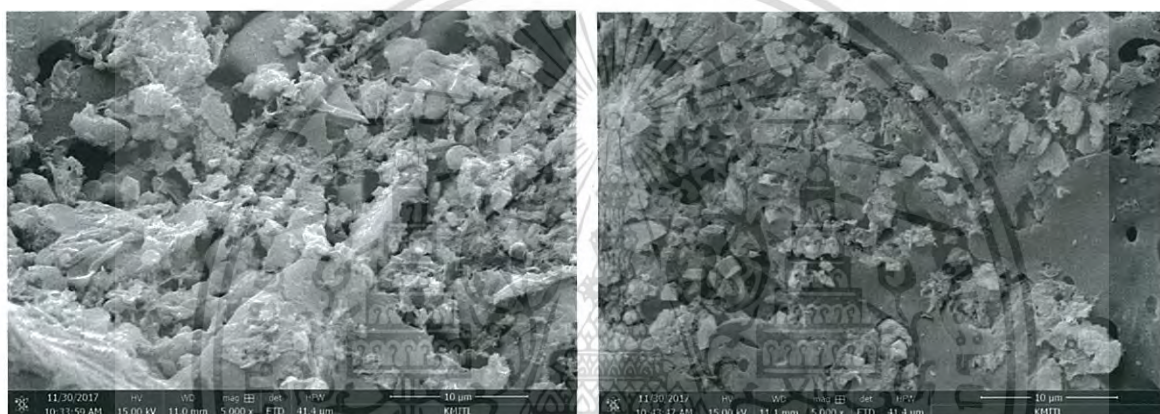


(i)

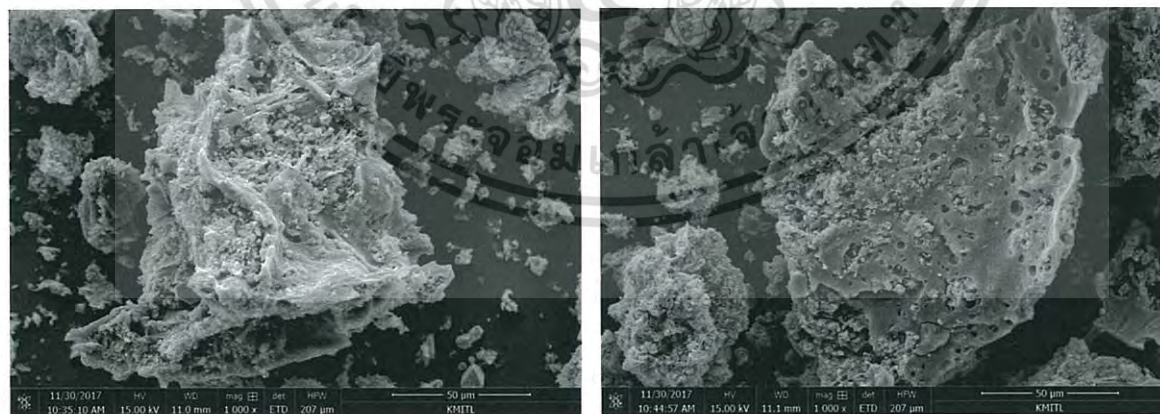
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(j)



(k)



(l)

**รูปที่ ๑.1** ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

- (a) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 9000 เท่า
- (b) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 7000 เท่า
- (c) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น มิใช่เพื่อให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

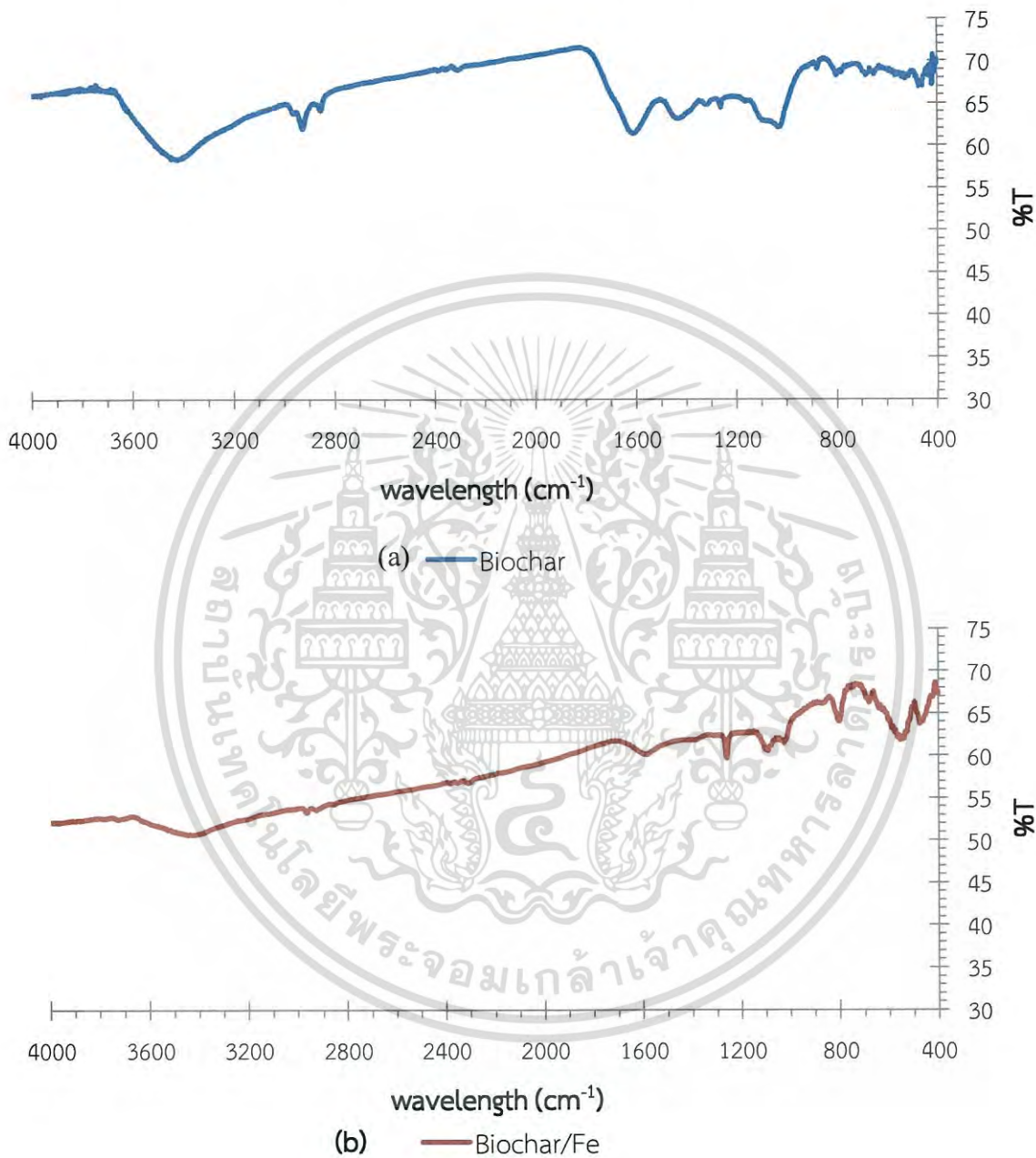
- (d) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 1000 เท่า
- (e) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 9000 เท่า
- (f) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 7000 เท่า
- (g) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 5000 เท่า
- (h) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็ก กำลังขยาย 1000 เท่า
- (i) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนท กำลังขยาย 9000เท่า
- (j) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนท กำลังขยาย 7000เท่า
- (k) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนท กำลังขยาย 5000เท่า
- (l) ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนเดคซิลซัลโฟเนท กำลังขยาย 1000เท่า



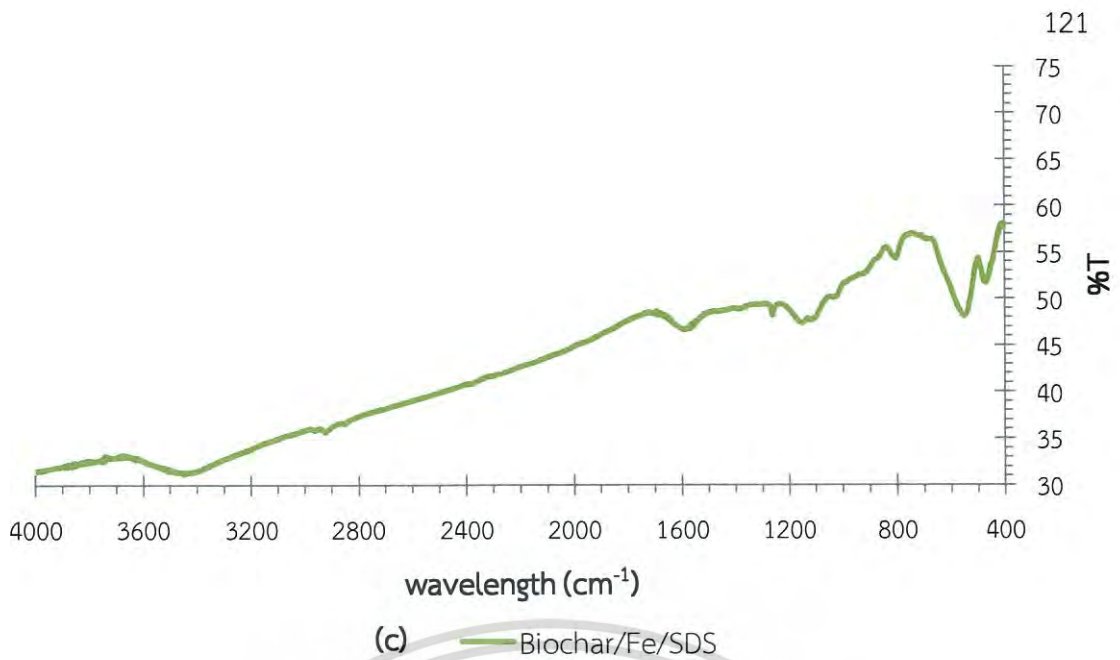
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับโดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ข.1** สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

- (a) ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
- (b) ปรับปรุงคุณภาพด้วยด้วยแม่เหล็ก
- (c) ปรับปรุงคุณภาพด้วยด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโตนดเคซัลซัลโฟเนท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ฉ**  
**ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของ**  
**ค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์ ( $pH_{PZC}$ )**

**ตารางที่ ฉ.1** ค่า pH เริ่มต้น และ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ BC ปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง

Blank	Initial pH	Final pH
3	3.00	6.46
4	4.07	7.49
5	5.04	7.33
6	6.07	7.64
7	7.00	7.42
8	8.05	7.48
9	9.07	8.67
10	10.01	8.54
11	10.98	10.14
12	11.97	11.69

**ตารางที่ ฉ.2** ค่า pH เริ่มต้น และ pH สุดท้ายของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่ SDS/Fe - BC 100 มิลลิกรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง

Blank	Initial pH	Final pH
2	2.00	2.22
3	3.13	3.06
4	4.23	3.61
5	5.20	3.70
6	6.16	3.78
7	7.02	3.80
8	8.11	3.45
9	9.01	3.87
10	10.00	8.28
11	11.00	10.54
12	12.01	11.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ญ**  
**ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของ**  
**ถ่านชีวภาพ**

**ตารางที่ ญ.1** ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ	
		ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโดเดซิลซัลโฟเนท
pH	pH meter	6.70	2.24
electrical conductivity	conductivity meter	46.33 $\mu\text{s}/\text{cm}$	215.33 $\mu\text{s}/\text{cm}$
Cation exchange capacity	Ammonium acetate method	0.7979 meq/g	1.5782 meq/g
loss of ignition	burning at 550 °C and calculating the mass loss	27.49	63.92
Organic matter	Walkley-Black titrations	8.77	17.08
Total nitrogen	Kjeldahl method	0.64 %N	0.15 %N
Nitrate ion	Brucine method	0.5249 g/Kg	0.5250 g/Kg
Chloride ion	Argentometric method	4.4005 mgCl/L	9.4297 mgCl/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ) ผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของถ่านชีวภาพ	
		ที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	ปรับปรุงคุณภาพด้วยแม่เหล็กเคลือบโซเดียมโอดีคซิลซัลโฟเนท
Total phosphate	Molybdovanadophosphate method	6.70	2.24
Sulfate ion	Turbidimetric method	4.7393 g.S/Kg	4.2345 g.S/Kg
Total heavy metal (Cd <sup>2+</sup> )	Acid digestion/ Atomic absorption spectrophotometer (AAS) SW-846 method 3050b (US.EPA, 1996)	0.0453 g/g	0.0268 g/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้