

การดูดซับตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัส
ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์

Adsorption of Lead and Zinc using Eucalyptus Sawdust
Modified with NaOH and CaCl₂

นายอัฐภัทร์ ธี
นางสาวแพรวรัตน์ แยมกรานต์
นางสาวมุกกระวี ศรีประเสริฐโชค

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การดูดซับตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัส
ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์
Adsorption of Lead and Zinc using Eucalyptus Sawdust
Modified with NaOH and CaCl₂

นายณัฐภัทร์	เอื้อสุวรรณ
นางสาวนพรัตน์	แย้มกรานต์
นางสาวมุกระวี	ศิริประเสริฐโชค

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**ADSORPTION OF LEAD AND ZINC USING EUCALYPTUS
SAWDUST MODIFIED WITH NaOH AND CaCl₂**

NATTAPAT	UEASUWAN
NOPPHARAT	YAEMKLAN
MUKRAWEE	SIRIPRASERTCHOK

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับตะกั่วและสังกะสี โดยใช้เชื้อยูกาลิปตัสปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์

Adsorption of Lead and Zinc using Eucalyptus Sawdust Modified with NaOH and CaCl₂




ชื่อนักศึกษา นายณัฐภัทร์ เอื้อสุวรรณ รหัส 53051183
นางสาวนพรัตน์ แย้มกรานต์ รหัส 53051197
นางสาวมุกระวี ศิริประเสริฐโชค รหัส 53051236

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับตะกั่วและสังกะสีโดยใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์	
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐภัทร์	เอื้อสุวรรณ
	นางสาวนพรัตน์	แย้มกรานต์
	นางสาวมุกกระวี	ศิริประเสริฐโชค
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของโครงการพิเศษนี้คือ การปรับปรุงขี้เถ้ายูคาลิปตัสด้วย NaOH และ CaCl_2 เพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเตรียมความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียคือ 50 ppm เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับและใช้ในการทดลองตอนอื่นๆต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการแปรผันความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและแปรผันปริมาณตัวดูดซับ แล้วหาประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ก็ได้อยู่ในหัวข้อของการศึกษาเช่นกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ปรับปรุงด้วยสารเคมี ค่า pH และเวลาที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับสังกะสี คือ 6 และ 40 นาที ตามลำดับ และสำหรับการดูดซับตะกั่ว ค่า pH และเวลาที่ดีที่สุด คือ 4 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งการดูดซับตะกั่วและสังกะสีมีประสิทธิภาพ 97.35% และ 84.59% ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี การดูดซับตะกั่วและสังกะสีมีประสิทธิภาพเพียง 81.69% และ 60.08% ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียที่สูงขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำลง ไอโซเทอมของการดูดซับในการทดลองนี้เป็นแบบ Langmuir ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

คำสำคัญ: การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ยูคาลิปตัส ขี้เถ้า

Title	Adsorption of Lead and Zinc using Eucalyptus Sawdust Modified with NaOH and CaCl ₂	
Students	Mr. Nattapat	Ueasuwan
	Miss Noppharat	Yaemkran
	Miss Mukrawee	Siriprasertchok
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Chemistry	
Academic Year	2013	
Advisor	Assist.Prof.Dr.Chompoonut Chaiyaraksa	

ABSTRACT

The aim of this special project was modifying eucalyptus sawdust with NaOH and CaCl₂ in order to adsorb lead and zinc contaminated in synthetic wastewater. 50 ppm of lead and zinc contaminated wastewater were prepared to optimize the adsorption condition and to carry out all other experiments. Various metal concentrations of contaminated wastewater and various amount of adsorbent were also studied in term of adsorption efficiency. The experiment was also setted to observe the reusing of adsorbent. The experimental results showed that the best pH and time for zinc adsorption was 6 and 40 min. The best pH and time for lead adsorption was 4 and 60 min. By using these suitable conditions and using modified eucalyptus sawdust, the lead and zinc adsorption efficiency were 97.35% and 84.59%, respectively. But when using unmodified eucalyptus sawdust, the lead and zinc adsorption efficiency were only 81.69% and 60.08%, respectively. When using higher concentration of metal in wastewater, the adsorption efficiency was found lower. The adsorption in these experiments were fitted with Langmuir adsorption model. The adsorbent can be reused but the adsorption efficiency was lower.

Keywords : Adsorption Lead Zinc Eucalyptus Sawdust

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงเรียบร้อยไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือและความกรุณาของทุกๆท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ที่กรุณาติดตามดูแลเอาใจใส่แก้ไขโครงการพิเศษนี้ รวมถึงให้คำแนะนำเป็นที่ปรึกษาอย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณอาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์และ อาจารย์ปัทมา ลิพหาวงศ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษรวมถึงให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมีทุกท่านรวมถึงนักศึกษาปริญญาโทภาคเคมีและเพื่อนๆสาขาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่อโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำมีความสำนึกในพระคุณของทุกๆท่านและถือโอกาสนี้กราบขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือให้คำปรึกษาให้คำแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตลอดจนความตั้งใจที่มีให้กับโครงการพิเศษนี้ ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ณัฐภัทร์ เอื้อสุวรรณ

นพรัตน์ แยมกรานต์

มุกระวี ศิริประเสริฐโชค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์และคำย่อ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โลหะหนัก	4
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	7
2.3 การดูดซับ (adsorption)	11
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไม้	15
2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา	17
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2 วิธีการทดลอง	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	35
4.1 ศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย โครงสร้าง ด้วยสารเคมีและซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุง โครงสร้าง	35
4.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของซีเมนต์ที่ปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมีและ ซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุง โครงสร้าง	37
4.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับ โลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) โดยใช้ซีเมนต์ที่ผ่านการปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี	38
4.4 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ โลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) ในน้ำเสีย สังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ	41
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของซีเมนต์ที่ปรับปรุง โครงสร้าง ด้วยสารเคมีและซีเมนต์ไม่ปรับปรุง โครงสร้าง	42
4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการคายซับของซีเมนต์ที่ปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี และซีเมนต์ไม่ปรับปรุง โครงสร้าง	43
4.7 ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่	44
4.8 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของซีเมนต์ที่ ผ่านการปรับปรุง โครงสร้าง	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	54
ภาคผนวก ข	61
ภาคผนวก ค	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
2.1 ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของตะกั่วในเลือดและปัสสาวะ	6
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะโดยซีลีเนียมก่อนและหลังการคายซับ	45

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่	
2.1 การออสโมซิสย้อนกลับ	8
2.2 การแยกกรองด้วยไฟฟ้า	9
2.3 การกรอง	9
2.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange)	10
2.5 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)	11
2.6 องค์ประกอบของไม้	15
2.7 เซลลูโลส	16
2.8 เฮมิเซลลูโลส	16
2.9 สเปกตรัม FTIR ของ แอนิลีน (Aniline)	21
2.10 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIRspectrometer	22
2.11 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope	23
4.1 สเปกตรัม FTIR ของซีลื้อที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง	35
4.2 สเปกตรัม FTIR ของซีลื้อที่ปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี	36
4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างของซีลื้อที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด(SEM) (ก) คือ ซีลื้อไม่ปรับปรุงโครงสร้าง (ข) คือ ซีลื้อปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี	37
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับ ประสิทธิภาพการดูดซับ	38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง pHกับประสิทธิภาพการตกตะกอนของโลหะหนัก	39
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับประสิทธิภาพการดูดซับของโลหะหนัก	40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะหนัก	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของซีลีเยอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุง โครงสร้าง	42
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของซีลีเยอกับประสิทธิภาพการคายซับโลหะหนัก	44
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของซีลีเยอกับประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่	45
4.11 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบแลงเมียร์ของการดูดซับตะกั่ว	46
4.12 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบฟรุนดิชของการดูดซับตะกั่ว	47
4.13 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสังกะสี	47
4.14 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบฟรุนดิชที่ของการดูดซับสังกะสี	47

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm ⁻¹	หนึ่งต่อเซนติเมตร
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
mesh	เมช
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mol/L	โมลต่อลิตร
N	นอร์มัล
pm	พิโกเมตร
RPE	Rate of Perceived Exertion
SEM	Scanning Electron Microscope
R ²	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
μg/ml	ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร
μg/ลิตร	ไมโครกรัมต่อลิตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้มีประชากรมากขึ้นจึงทำให้มีความต้องการสินค้าอุปโภคและบริโภคมากขึ้น โรงงานอุตสาหกรรมต้องเพิ่มการผลิตมากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีของเสียจากกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหากของเสียนี้ไม่ได้บำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามกันทั้งทางดิน น้ำ และอากาศ โลหะหนักที่มักจะปนเปื้อนออกมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์ที่มักจะพบตะกั่ว ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย อุตสาหกรรมชุบโลหะที่พบสังกะสีปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพราะถ้าหากมีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณมากจะเกิดความเป็นพิษเฉียบพลันต่อระบบนิเวศทางน้ำ ถ้ามีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณน้อยก็จะส่งผลความเป็นพิษเรื้อรังและพิษสะสมในสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมนั้นมี 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพซึ่งที่นิยมใช้กันในปัจจุบันนั้นจะใช้วิธีการทางกายภาพและทางเคมี เช่น วิธี ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) และการตกตะกอนทางเคมี แต่ข้อเสียของวิธีเหล่านี้คือไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์และมีราคาแพง จึงมีการใช้เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้ชีวมวลธรรมชาติในการดูดซับโลหะหนัก นั่นคือใช้ขี้เลื่อยจากต้นยูคาลิปตัสเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดอีกทั้งโลหะหนักที่ถูกดูดซับและสารดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในระบบได้อีกครั้ง (อัญชติ, 2554)

ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะปรับปรุงขี้เลื่อยด้วย NaOH และ CaCl₂ จากนั้นศึกษาคุณสมบัติบางประการของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างแล้ว โดยนำขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วไปดูดซับตะกั่วและสังกะสีเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขี้เลื่อยกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบที่อยู่ในซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงและซีลี้อยที่ปรับปรุง โครงสร้างแล้ว
2. ศึกษาลักษณะพื้นผิวของซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงและซีลี้อยปรับปรุง โครงสร้าง
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะของซีลี้อยที่ปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี
4. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของตะกั่วและสังกะสีที่มีผลต่อการดูดซับ
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับระหว่างซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงกับซีลี้อยปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี
6. ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลี้อยที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่
7. ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของซีลี้อยที่ปรับปรุง โครงสร้างแล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการปรับปรุงโครงสร้างของซีลี้อยด้วยสารเคมีคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคลอไรด์และวิเคราะห์ห่มู่ฟังก์ชันและลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับที่ปรับปรุง โครงสร้างแล้ว
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่ความเป็นกรด่างโดยใช้ pH ที่ 3 4 5 6 7 และ 8 และศึกษาระยะเวลาในการดูดซับ โดยใช้เวลาที่ 0 20 40 60 80 และ 100 นาที
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นที่ 50 100 200 400 และ 600 mg/L โดยควบคุมให้อยู่สภาวะที่มี pH และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด
4. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยแปรผันน้ำหนักของตัวดูดซับดังนี้คือ 2.50 6.25 12.50 และ 25 mg โดยควบคุมให้อยู่ในสภาวะที่มี pH และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด
5. เปรียบเทียบการดูดซับระหว่างซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงกับซีลี้อยที่ปรับปรุง โครงสร้างด้วยสารเคมี
6. ศึกษาประสิทธิภาพการคายซับของซีลี้อยทั้ง 2 ชนิดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้สารคายซับคือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl 0.05 mol/L)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำขี้เลื่อยกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใหม่ได้
2. โรงงานอุตสาหกรรมสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสังกะสีและตะกั่ว โดยใช้วัสดุที่หาง่าย ราคาถูก
3. สามารถนำขี้เลื่อยปรับใช้กับสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ ได้นอกเหนือจากตะกั่วและสังกะสี
4. สามารถเป็นแนวทางในการหาตัวดูดซับตัวอื่นนอกเหนือจากขี้เลื่อยไปทำการดูดซับ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก (หน่วยข้อเสนอเทศวัตถุอันตราย, 2549)

โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไปและส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรม เราใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยา อุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอาง น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ

ในชีวิตประจำวัน คนเรามีความเสี่ยงต่อการนำโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางกรบริโภคอาหาร หรือดื่มน้ำที่มีสารเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ โดยเฉพาะชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณ โรงงานที่ขาดจิตสำนึก ซึ่งมักจะลักลอบเทของเสียลงดินหรือลงแม่น้ำ กำจัดกากของเสียอย่างผิดวิธี โลหะหนักบางชนิดสามารถให้ทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต ขึ้นกับชนิดของสิ่งมีชีวิตและปริมาณที่ได้รับเข้าไป ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียต้องการ โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส โมลิบดีนัม แวนเนเดียม และสังกะสี ในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโต สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม จัดเป็นสารพิษต่อร่างกาย เนื่องจากมีพิษร้ายแรงมากต่อมนุษย์

2.1.1 ตะกั่ว (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2553)

ตะกั่วเป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 82 และมีสัญลักษณ์คือ Pb มีจุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส ตะกั่วเป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทาซึ่งสามารถพบได้ตามธรรมชาติ โดยปกติมักพบตะกั่วปะปนอยู่กับกำมะถัน ซึ่งก่อนที่จะนำ ตะกั่วมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม จำเป็นต้องแยกโลหะทั้งสองชนิดนี้ออกจากกันเสียก่อน โดยการเผาด้วยความร้อนสูงแล้วจึงพ่นอากาศเข้าไป ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับตะกั่วและกำมะถัน เกิดเป็นตะกั่วออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้ในการผลิตกรดกำมะถัน สำหรับตะกั่วออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ และหากนำตะกั่วออกไซด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการดูดซับออกซิเจนจะได้ตะกั่วบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.1 ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของตะกั่วในเลือดและปัสสาวะ

ระดับตะกั่ว	ระดับปกติ	ระดับเริ่มเป็นพิษ	ระดับแสดงอาการพิษ
ระดับตะกั่วในเลือด (หน่วย $\mu\text{g}/100\text{ ml}$)	10-20	40	70
ระดับตะกั่วในปัสสาวะ (หน่วย $\mu\text{g}/\text{ลิตร}$)	10-70	100	200-400
coproporphyrin (หน่วย $/\mu\text{g}$)	80 /ปริมาณปัสสาวะ 1 วัน	200 /ปัสสาวะ 1 ลิตร	600 /ปัสสาวะ 1 ลิตร
delta-ALA (หน่วย $\text{mg}/\text{ปริมาณปัสสาวะ 1 วัน}$)	2-3	5-10	10-20

2.1.2 สังกะสี

สังกะสี เป็นธาตุแรกของหมู่ II B จัดเป็นธาตุโลหะ มีเลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 amu จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 907 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.133 g/cc ที่ 25 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชันสามัญ +2 สังกะสีเป็นโลหะที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 4 รองจากเหล็กกล้า อะลูมิเนียม และทองแดง เนื่องจากสังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 และขาดคุณสมบัติทั่วไปของธาตุทรานซิชัน จึงไม่จัดโลหะสังกะสีอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน แต่เรียกว่าเป็นธาตุหลังทรานซิชัน (บริษัท กลาสแวร์ เคมิคอล กรุ๊ป จำกัด, 2553) สังกะสีเกิดขึ้นตามธรรมชาติมีคุณสมบัติที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งคน สัตว์และพืช แร่สังกะสี (Zinc Mineral) ประกอบด้วยธาตุต่างๆ ที่มีธาตุสังกะสีเป็นหลัก เมื่อนำแร่สังกะสีมาถลุงจะได้โลหะสังกะสีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย จึงนับเป็นแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ประเภทของแร่สังกะสี แร่สังกะสีที่พบในแหล่งต่างๆ ของโลก จำแนกตามสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาได้ 2 ประเภทคือ (บริษัท พรีเมียร์ เอ็นทานิเยร์ แอนด์ ซัพพลาย จำกัด, 2556)

1) แร่สังกะสีปฐมภูมิ (Primary Zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่เกิดขึ้นมาและยังไม่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ได้แก่ แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซัลไฟด์ (Sulphide) มักพบเป็นส่วนใหญ่ในแหล่งต่างๆ ของโลก นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีซิงไคต์ (Zincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีออกไซด์ (Oxide) พบแหล่งใหญ่ในรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา

2) แร่สังกะสีทุติยภูมิ (Secondary Zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติแล้ว ได้แก่ แร่ฮีโมมอร์ไฟต์ (Hemimorphite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซิลิเกต (Silicate), แร่สมิทซอไนต์ (Smithsonite) และแร่ไฮโดรซิงค์ (Hydrozincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (Carbonate) แร่สังกะสีที่พบในประเทศไทยที่แหล่งผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ส่วนใหญ่เป็นแร่สังกะสีซิลิเกตและบางส่วนเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต ประโยชน์ของสังกะสี

ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรม

1. ป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อนและช่วยยืดอายุการใช้งานโดยการนำเหล็กไปชุบสังกะสี (Galvanize)
2. มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยตัวสังกะสีจะไม่เสียคุณสมบัติใดๆไป
3. เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ของงานอุตสาหกรรมหลายชนิด
4. สามารถนำมาใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์

ประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์

1. เป็นสารอาหารสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์กว่า 300 ชนิดในร่างกาย และช่วยลดอัตราการเสียชีวิตจากโรคท้องร่วง โรคปอดบวม และมาลาเรียในเด็ก
2. เป็นส่วนผสมสำคัญของทองเหลือง
3. เป็นส่วนผสมสำคัญในการผลิตยาหลายประเภท

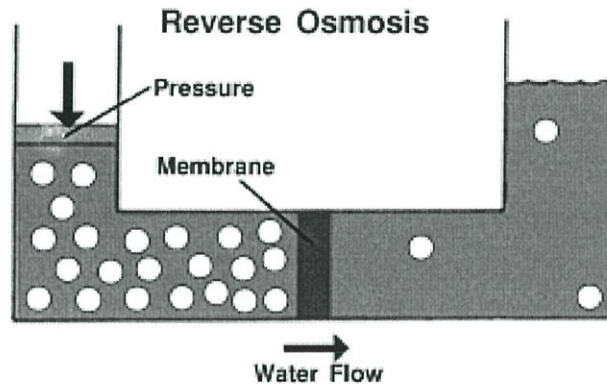
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (อัญชลี, 2554)

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียุทธศาสตร์การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมได้แก่คุณสมบัติน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis)

ออสโมซิส เป็นปรากฏการณ์ที่ของเหลวซึมผ่าน Semipermeable membrane ซึ่งมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ มีรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.0001 ถึง 0.1 ไมครอน โดยที่โมเลกุลของตัวทำละลาย (solvent) ของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำซึมผ่าน membrane ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทั้งสอง ความสามารถในการออสโมซิสของสารละลายขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลาย ได้แก่ ความดันออสโมติก (Osmotic pressure) ความดันออสโมติก ถือเป็นสมบัติเฉพาะของสารละลายมีหน่วยเป็นบรรยากาศ โดยความดันออสโมติกจะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง

จะมีความดันออสโมติกสูงกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งการรีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นการบังคับให้เกิดการย้อนกลับของปรากฏการณ์ออสโมซิส โดยการให้ความดันไฮดรอลิก (Hydraulic pressure) แก่สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดการออสโมซิสจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งความดันไฮดรอลิก ที่ใส่เข้าไปต้องมีค่ามากกว่าความดันออสโมติกจึงจะเกิดการ RO ได้

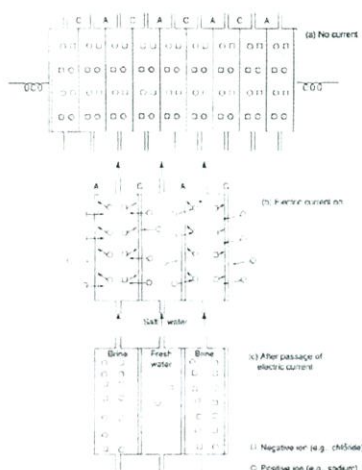


รูปที่ 2.1 การออสโมซิสย้อนกลับ

ที่มา : <http://archive.lib.cmu.ac.th>

2.2.2 การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

เป็นกระบวนการเมมเบรนที่ใช้แรงทางไฟฟ้าในการแยกสารเจือปน (เฉพาะที่เป็นไอออน) ออกจากน้ำ ซึ่งไอออนจะถูกแยกออกจากน้ำโดยเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรน ในโมดูลของ ED ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือ แอโนด (ขั้วบวก) และแคโทด (ขั้วลบ) และชั้นเยื่อเมมเบรนแบบพิเศษ คือ เมมเบรนชนิดที่ยอมให้อิออนบวกลอดผ่านไปได้แต่ไม่ยอมให้อิออนลบผ่าน เรียกว่า Cation transfer membrane และเมมเบรนชนิดที่ยอมให้อิออนลบลอดผ่านไปได้แต่ไม่ยอมให้อิออนบวกผ่าน เรียกว่า Anion transfer membrane โดยเมมเบรนทั้งสองชนิดนี้จะถูกเรียงสลับกันมากกว่า 100 แผ่น อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดสองขั้ว น้ำดิบที่ต้องการกำจัดไอออนจะถูกสูบเข้าในช่องว่างระหว่างเมมเบรน น้ำไหลออกช่องหนึ่งจะเป็นน้ำบริสุทธิ์ และอีกช่องหนึ่งจะเป็นน้ำที่มีเกลือ (ไอออน) เข้มข้น



รูปที่ 2.2 การแยกกรองด้วยไฟฟ้า

ที่มา : <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/EA443/room/chap3/sub371.htm>

2.2.3 การกรอง (filtration)

การกรอง (filtration) เป็นการแยก (separation) ทางกล เพื่อแยกอนุภาคของแข็งที่ไม่ละลายซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายออกจากส่วนที่เป็นของเหลว โดยให้ของเหลวที่มีส่วนผสมของทั้งของแข็งและของเหลวไหลผ่านตัวแผ่นกรอง ซึ่งมีหน้าที่กักของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูของตัวแผ่นกรองไว้และปล่อยให้ส่วนที่เป็นของเหลวไหลผ่าน ของเหลวที่กรองได้เรียกว่า ฟิลเตรต (filtrate) ในบางครั้งสารแขวนลอยไม่สามารถแยกออกได้ จำเป็นต้องใช้สารช่วยกรอง (filter aid)

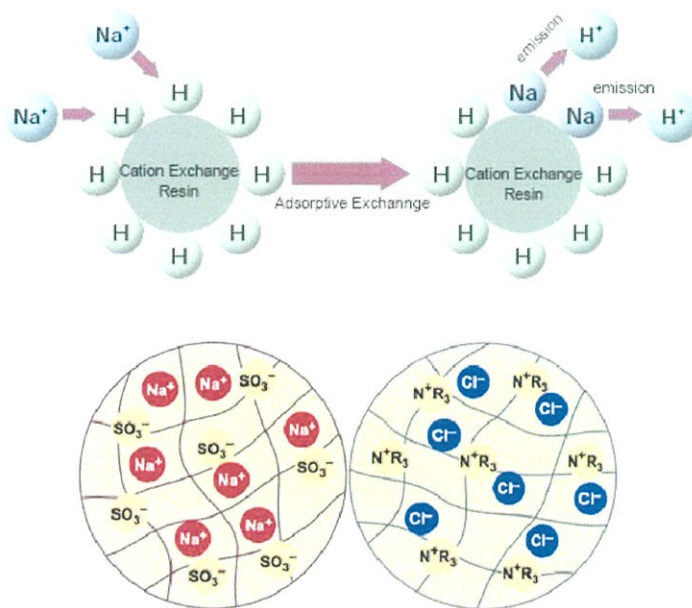


รูปที่ 2.3 การกรอง

ที่มา : http://nstkm.blogspot.com/2010/12/blog-post_2893.html

2.2.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนชนิดใดชนิดหนึ่งในสารละลายสูงขึ้น ทำให้ไอออนชนิดนั้นเคลื่อนที่จากสารละลายไปยังอนุภาคพร้อมกับไลต์ที่ไอออนอื่นที่ถูกดูดซับอยู่ก่อนให้ออกมาอยู่ในสารละลาย เพื่อรักษาสมดุลของประจุ ซึ่งกระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินไม่เท่ากันในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายโดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออน

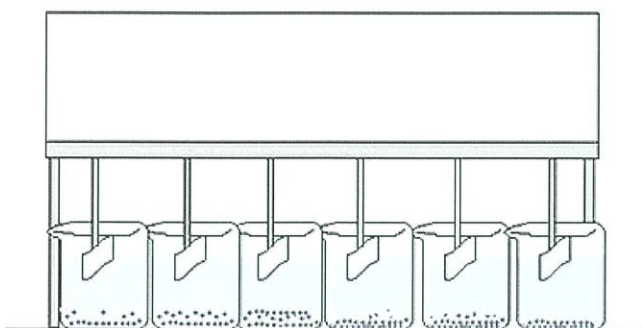


รูปที่ 2.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange)

ที่มา : <http://aqua.club.net/forum/lite.php?topic=200793.0>

2.2.5 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ



รูปที่ 2.5 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

ที่มา : <http://www.worldwildthai.com/index.php?mo=10&art=424708>

2.3 การดูดซับ (adsorption) (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

ในการดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูด

ชั้นสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของ โมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็น สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูก ละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิด การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือ กลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะ ที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถ เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

3) การดูดซับทางชีวภาพ

การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) หมายถึง การดูดซับโลหะหนักด้วยมวลชีวภาพซึ่งเป็นการกระทำทางเคมี ฟิสิกส์ ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนัก/กลุ่มโลหะหนักที่มีประจุกับเซลล์จุลินทรีย์ มีข้อดีกว่าวิธีดั้งเดิมในด้านค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ ทากตะกอนที่เกิดจากวิธีทางเคมีชีวภาพการเพิ่ม สารอาหาร และสารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) สามารถนำไปผ่านกระบวนการแล้วนำกลับมาใช้ ใหม่ได้และโลหะยังสามารถเอาออกมาจากสารดูดซับนั้นได้โดยกระบวนการดูดซับทางชีวภาพ

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1) **ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ (Size and Surface Area)** มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ พื้นที่ผิวจำเพาะ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่สารภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2) **ลักษณะของการดูดซับ (Natural of Adsorption)** สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผันกับอัตราการดูดซับ

3) **ค่าพีเอช (pH)** ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับจะเกิดขึ้นได้สูงสุดที่ค่าพีเอชหนึ่งที่เหมาะสม ส่วนสารละลายที่มีค่าพีเอชต่างๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากในสารละลายมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูง (H^+) ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะเข้าไปแทรกแซงระหว่างบริเวณที่เกิดการดูดซับของสารละลายไอออนโลหะ

นอกจากนี้ที่ค่าพีเอชของสารละลายต่างๆ จะทำให้บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกลายเป็นประจุบวก ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการดูดซับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกเหมือนกัน เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชเหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากจะเกิดการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของสารประกอบหมู่ไฮดรอกซิล (OH)

4) **ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (Contact Time)** เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ

5) **อัตราการเร่งการปั่นกววน (Mixing Speed)** อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของสารดูดซับ

2.3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ

$$q_e = Q^{\circ} b C_e / (1 + b C_e)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

Q° = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

b = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

หรือ

$$C_e / q_e = 1 / b Q^{\circ} + C_e / Q^{\circ}$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง C_e / q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน C_e / q_e เป็น $1 / b Q^{\circ}$ และมีความชันเท่ากับ $1 / Q^{\circ}$

2.3.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ

$$q_e = X/m = k_f C_e^{1/n}$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

k_f และ n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรุนดิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

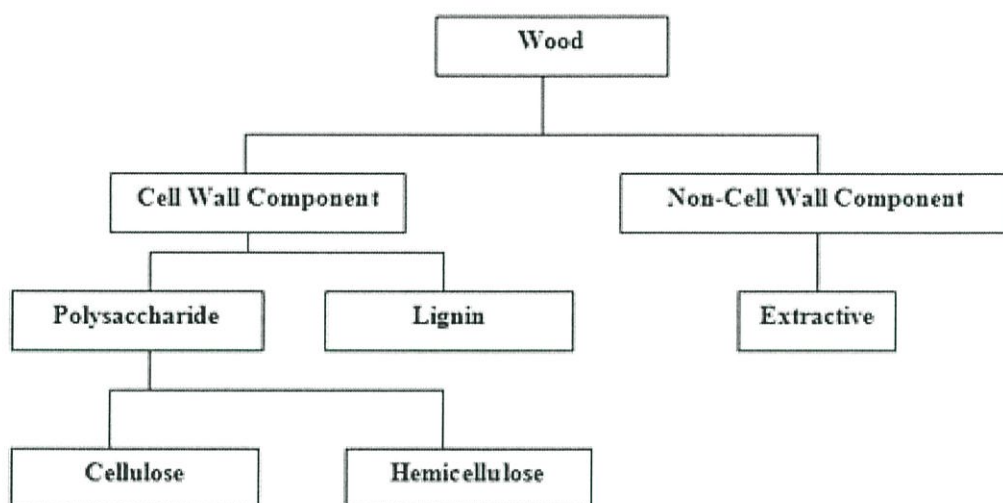
$$\log q_e = \log X/m = \log k_f + (1/n) \log C_e$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า k_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$

บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรุนดิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (ปริษาและคณะ, 2528)

ไม้ หรือ wood ประกอบขึ้นจากเนื้อเยื่อที่เป็นเส้นใยหรือเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งได้แก่ ท่อลำเลียงน้ำและอาหารจากรากสู่ส่วนต่างๆ ของพืช สารช่วยยึดเส้นใยที่ช่วยทำให้ไม้แข็งแรงหรือลิกนินและแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดลักษณะเฉพาะของไม้แต่ละพันธุ์ ซึ่งเมื่อเราตัดไม้ออกดูตามขวางเราจะพบองค์ประกอบ

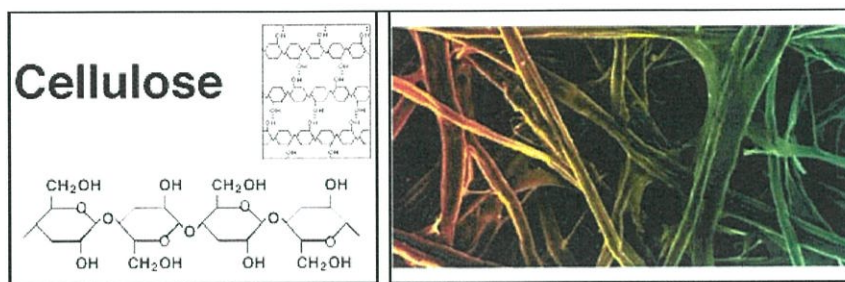


รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของไม้

ที่มา : http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

2.4.1.เซลลูโลส (Cellulose)

เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้ คือประมาณร้อยละ 40 ทั้งในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) และไม้ใบกว้าง (Hardwood) ซึ่งเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้น (linear polysaccharide) ที่ประกอบด้วย หน่วยที่ซ้ำๆ กันมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีโครงสร้างอัดแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำเซลลูโลสบวมตัว ในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น อัลคาไลไฮดรอกไซด์ ทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

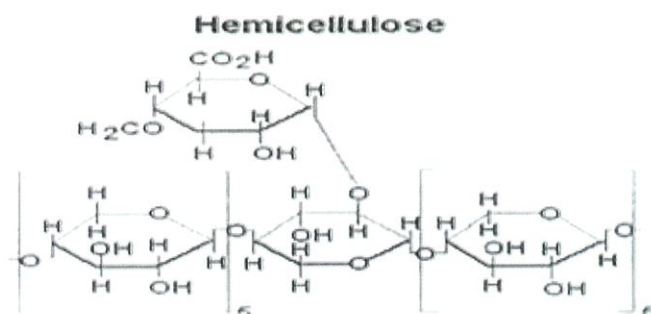


รูปที่ 2.7 เซลลูโลส

ที่มา : www.scienceclarified.com/Ca-Ch/Cellulose.html และ www.risoe.dk/bem/Bioethanol.htm

2.4.2.เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

ไม้ในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีประมาณร้อยละ 30 ถึง 35 เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก สีขาวมีโครงสร้างลักษณะเป็นกิ่งจับกันอยู่แบบหลวมๆ ซึ่งเฮมิเซลลูโลสเป็นสารผสมของพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติเป็นตัวเชื่อม (linking agent) เส้นใยเฮมิเซลลูโลสมีความแตกต่างจากเซลลูโลสตรงที่จะมีโครงสร้างเป็นกิ่ง และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสมาก เฮมิเซลลูโลสเมื่ออยู่เดี่ยวๆ จะมีสมบัติละลายน้ำได้ แต่เมื่ออยู่ในเนื้อไม้จะไม่ละลายน้ำได้ แต่ละลายได้ในสารละลายเบส ค่าความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมประมาณ 18% แต่เฮมิเซลลูโลสในสภาพที่เป็นกรด จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ทำให้สามารถแยกเฮมิเซลลูโลสออกมาได้ เฮมิเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติของเซลลูโลสในแง่ช่วยอุ้มน้ำช่วยในการพองตัวของเส้นใย และช่วยเชื่อมโครงสร้างของเซลลูโลส เพื่อประกอบเป็นเส้นใยของเนื้อไม้



รูปที่ 2.8 เฮมิเซลลูโลส

ที่มา : http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

2.4.3.ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบที่มีมากรองจากเซลลูโลสในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีลิกนินประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีลิกนินประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 เป็นสารโพลีเมอร์ที่ซับซ้อนกว่า Cellulose กับ Hemicelluloses ซึ่งลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบรวมกับเซลลูโลส ลิกนินไม่ละลายในน้ำ และในตัวทำละลายที่

เป็นสารอินทรีย์ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เมื่ออยู่ในสารละลายเบสที่ร้อน หรือในตัวทำละลายประเภทสารออกซิไดซิงค์ (oxidizing agent) ลิกนินมีประมาณ 17-32% ของน้ำหนักไม้ที่ไม่มี ความชื้น ทำหน้าที่เป็นส่วนกรอง หรือสารตัวเชื่อมมากกว่าจะเป็นส่วนที่ทำให้ไม้แข็งแรง

2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา (ASTV ผู้จัดการออนไลน์, 2551)

ยูคาลิปตัส (eucalyptus) เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดหลักอยู่ในประเทศออสเตรเลีย มีกว่า 700 สายพันธุ์ กระจายอยู่อย่างกว้างในรอยต่อแถบนิวกินี อินโดนีเซีย และหมู่เกาะฟิลิปปินส์ ได้มีการนำไปปลูกในภาคใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา บราซิล เอธิโอเปีย อูรุกวัย มาดากัสการ์ และในทวีปแอฟริกา แต่ความเหมาะสมของการปลูกยูคาลิปตัสก็ยังเป็นที่ถกเถียงและไม่ได้รับการ ยืนยันที่แน่ชัด ยูคาลิปตัสเป็นพืชที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี และเจริญเติบโตได้ทุกสภาพดิน ตั้งแต่ ดินทราย ดินเค็ม ดินเปรี้ยว แต่ไม่ทนดินที่มีหินปูนสูง โดยประเทศไทยนำเข้ายูคาลิปตัสมาปลูกในปี 2493 เป็นครั้งแรก แต่มีการปลูกอย่างจริงจังตั้งแต่ปี 2507 เป็นต้นมา

ยูคาลิปตัสมีรูปทรงสูงเพรียว ลำต้นเปลือยตรงมีกิ่งก้านน้อย มีเรือนยอดรูปทรงกรวยสูง ใบ เดี่ยวเรียงสลับ ใบรูปหอกหรือรูปขอบขนานแกมหอกขนาด 2.5–12 x 0.3–0.8 นิ้ว ก้านใบยาว ใบสีเขียวอ่อนทั้งสองด้าน บางครั้งมีสีเทา ใบบางห้อยลง เส้นใบมองเห็นได้ชัด ดอกมีสีขาว ออกช่อ ขนาดเล็กตลอดปีปีละ 7 - 8 เดือน ดอกจะออกตามง่ามใบใกล้ปลายกิ่ง แม้จะมีเกสรเหมาะแก่การ เลี้ยงผึ้ง แต่ดอกของยูคาลิปตัสกลับไม่มีกลิ่นอย่างที่หลายคนคิด ลักษณะเนื้อไม้ยูคาลิปตัสมีแก่นสี น้ำตาล กระจุกสีน้ำตาลอ่อน กระจุกสีและแก่นสีแตกต่างกันได้ชัด ไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุมากขึ้นจะมีสี น้ำตาลแดงเข้มกว่าไม้ที่มีอายุน้อย เนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างละเอียด เส้นสน บางครั้งบิดไปตาม แนวลำต้น เนื้อไม้มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.6–0.9 ในสภาพแห้งแล้งซึ่งขึ้นอยู่กับอายุของไม้ เนื้อไม้แตกง่ายหลังจากตัดฟันตามแนวยาวขนานลำต้น แต่ถ้าทำให้ถูกหลักวิธีก็สามารถนำมาเลื่อย ทำเครื่องเรือนและก่อสร้างได้ ผลยูคาลิปตัสมีลักษณะครึ่งวงกลม หรือรูปถ้วย มีขนาด 0.2–0.3 x 0.2–0.3 นิ้ว ผิวนอกแข็ง ให้ผลได้ตลอดปี เมื่อยังอ่อนจะมีสีเขียว ก่อนจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อแก่ ที่ปลายผลจะแยกออกทำให้เมล็ดที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มม.ร่วงออกมา โดยการขยายพันธุ์ยูคาลิปตัส ทำได้โดยการเพาะเมล็ด ซึ่งเมล็ดยูคาลิปตัส 1 กก.จะประกอบไปด้วยเมล็ดยูคาลิปตัสตั้งแต่ 100,000-200,000 เมล็ด การเพาะเมล็ดยูคาลิปตัส ควรทำในระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือน กุมภาพันธ์ เพราะสะดวกและได้ผลดี เนื่องจากหมดหน้าฝน และอากาศไม่ร้อนจนเกินไป การย้าย ชำจะมีเปอร์เซ็นต์การรอดตายสูง เมื่อกำลังออกมีอายุ 18 วันให้เลี้ยงไว้ในถุงช้ำอย่างน้อย 2–3 เดือน ลำต้นจะมีความสูงประมาณ 25 ซม. ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ปลูกในเดือนพฤษภาคมถึงเดือน สิงหาคม

ประโยชน์ของยูคาลิปตัส

ประโยชน์ของไม้ยูคาลิปตัสถือเป็นจุดเข้าวนใจของเหล่าเกษตรกรมากที่สุด เพราะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางตรงได้หลายอย่าง ได้แก่ การทำไม้ใช้สอย เช่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน ทำรั้ว ทำคอกปศุสัตว์ ทำเสา หรือใช้ในการก่อสร้างต่างๆ การทำฟืน เผาถ่าน โดยถ่านไม้ยูคาลิปตัสใช้เป็นเชื้อเพลิงดีไฟได้ดีและมีเขี้ยวเล็กน้อย ไม้พินยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 4,800 แคลอรีต่อกรัม ส่วนถ่านไม้ยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อน 7,400 แคลอรีต่อกรัม จัดว่าให้ความร้อนใกล้เคียงกับถ่านไม้โกงกาง ซึ่งเป็นถ่านไม้ที่ดีที่สุด การทำชิ้นไม้สับ ไม้ยูคาลิปตัสเมื่อแปรรูปและสับทำชิ้นไม้สับ สามารถนำไปผลิตแผ่นชิ้นไม้อัด แผ่นใยไม้อัด แผ่นปาร์ติเกิล และแผ่นไม้อัดซีเมนต์ที่มีมูลค่าสูง การทำเชื้อไม้ ไม้ยูคาลิปตัสสามารถแปรรูปทำเชื้อไม้ยูคาลิปตัสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส นำไปใช้ทำเส้นใยเรยอนและทำผ้าแทนเส้นใยฝ้าย และปุ๋ยนุ่น การทำกระดาษ เชื้อไม้ยูคาลิปตัส 1 ตันสามารถผลิตเยื่อกระดาษได้ประมาณ 1 ตัน โดยเชื้อไม้ยูคาลิปตัสมีคุณสมบัติเด่น คือ มีความฟูสูง และมีความทึบแสง ประกอบกับไฟเบอร์มีความแข็งแรงเหมาะต่อการใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียวประเภทต่างๆ

นอกจากนั้นแล้ว ข้อมูลบางแหล่งยังชื่นชมไม้ยูคาลิปตัสในด้านการเพาะเลี้ยงเห็ดมาก โดยระบบรากของไม้ยูคาลิปตัสจะมีเชื้อราไมคอร์ไรซาชนิดต่างๆ อาศัยอยู่ เป็นตัวช่วยดูดธาตุฟอสฟอรัสให้กับต้นยูคาลิปตัสได้มากขึ้น ช่วยให้ดินไม่เจริญเติบโต และปรับปรุงดินเสื่อมให้มีคุณภาพดีขึ้น เช่น เห็ดเสม็ด เห็ดไข่ และเห็ดระโงกขาว อีกทั้งดอกยูคาลิปตัสมีน้ำหวานล่อแมลงมาผสมเกสรและดูดเอาน้ำหวานไปสร้างรังผึ้ง โดยเฉพาะการที่มันออกดอกปีละ 7 – 8 เดือนหรือเกือบตลอดปี ผิดกับพันธุ์ไม้ชนิดอื่นๆ ที่มักออกดอก 1 – 2 เดือน/ปี จึงดีมากสำหรับการเลี้ยงผึ้ง น้ำผึ้งที่ได้มีรสและคุณภาพดี รวมทั้งน้ำมันใบยูคาลิปตัสยังมีสรรพคุณทางยา โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจ บรรเทาอาการหวัด คัดจมูก

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

2.6.1 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555)

หลักการ

เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer หรือกระบวนการ Atomic Absorption Spectrometer เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะความยาวคลื่นหนึ่ง ซึ่งแต่ละธาตุมีค่าเฉพาะแตกต่างกัน เพราะมีระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมแตกต่างกัน โดยในกระบวนการที่ทำให้ไอออนหรือสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องได้รับพลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกในรูปแบบต่างๆ เช่น เปลวไฟหรือความร้อนจากไฟฟ้า จากนั้นอะตอมเสรีจะดูดกลืนแสงในพลังงานของโฟตอนที่ให้พลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอน

อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น โดยพลังงานที่อะตอมใช้ไปจากการดูดกลืนแสงนั้น จะแปรผันตามปริมาณอะตอมเสรีของธาตุ ซึ่งถูกวัดออกมาเป็นค่า Absorbance นั้นเอง เราอาจเรียกสั้นๆว่า Abs

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

แหล่งกำเนิดแสงของAASโดยทั่วไป เป็นหลอดแบบ Hollow Cathode Lamp (HCL) และ Electrodeless discharge lamp (EDL) โดยแหล่งกำเนิดแสงของ AAS ของเครื่องที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ฯ มีปัจจุบัน เป็นชนิด Hollow Cathode Lamp (HCL) ซึ่งในหลอด(Lamp) จะบรรจุ Buffer ของแก๊สเฉื่อย (Inert gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือ นีออน (Ne) และมีการเคลือบเกลือของธาตุโลหะที่จะวิเคราะห์ไว้ที่ขั้ว Cathode ของ Lamp โดยจะมีการให้ศักย์ไฟฟ้า (Apply voltage) ให้แก่ขั้ว Cathode เกิดการ Ionization ของ Inert gas ไปชนกับเกลือของธาตุโลหะที่เคลือบไว้ทำให้ธาตุโลหะหลุดออกจากขั้ว Cathode แล้วไปชนกับ Inert gas ทำให้ธาตุโลหะเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (Excited state) แต่ไม่เสถียร จึงปล่อยพลังงานออกมาเป็นพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะกับธาตุแต่ละธาตุ ซึ่ง Hollow Cathode Lamp มีทั้งแบบ Single lame (ปล่อยพลังงานช่วงความยาวคลื่นสำหรับวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่ง) และแบบ Multiple lamp (ที่ขั้ว Cathode จะเคลือบเกลือของธาตุโลหะหลายชนิด มีการปล่อยพลังงานในหลายช่วงตามระดับพลังงานของธาตุที่เคลือบไว้จะอาศัย Monochromator ในการเลือกแสงที่ระดับความยาวคลื่นที่ต้องการใช้)

2. ส่วนที่ทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer หรือ Atomization process)

การทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไป ซึ่งพลังงานดังกล่าวอาจอยู่ในรูปต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่วนประกอบของเครื่อง AAS ที่ให้พลังงานความร้อนเพื่อทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้นเรียกว่า Atomizer และกระบวนการที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระนั้นเรียกว่า Atomization process ซึ่ง Atomization process ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ Flam atomization Electrothermal atomization หรือ Graphite furnace หรือ Flameless atomization Hydride Generation Technique และ Cold Vapor Technique โดยมีรายละเอียดของแต่ละเทคนิคดังนี้

2.1 Flam Atomization ใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้เกิด Atomization process แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

-Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองฝอยเล็กๆ (mist หรือ aerosol) ด้วยส่วนของเครื่องที่แสดง Flame atomizer เรียกว่า Nebulizer โดยเครื่องจะดูดสารละลายเข้าไปเพื่อพ่นให้สารละลายไปชนกับ Glass bead เพื่อให้เกิดเป็นละอองฝอย

-Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กบางส่วน รวมกันเป็นหยดสารละลาย ไม่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (Drain)

-Mixing เป็นกระบวนการที่ Mist หรือ Aerosol ผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel) และออกซิเจนที่แก๊ส (Oxidant gas) เกิดใน Spray chamber ของ Nebulizer

-Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ใน Mist หรือ Aerosol ถูกกำจัดออกไป ทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆของสารประกอบ (Solid particles)

-Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟโดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นไอออนออกไซด์เป็น โมเลกุล และเป็นอะตอมอิสระ

2.2 Electrothermal atomization หรือ Graphite furnace หรือ Flameless atomization ใช้พลังงานความร้อนจากกระแสไฟฟ้าทำให้เกิด Atomization process แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- Electrothermal atomizer Drying stage เป็นการค่อยๆ ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป โดยปกติใช้อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส)

- Ashing stage เป็นขั้นตอนที่ให้ความร้อนสูงขึ้น (อาจถึง 1,500 องศาเซลเซียส) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยโมเลกุลของสารเหล่านั้นจะแตกตัวออกไปเหลือแต่สารอนินทรีย์ที่เสถียรเท่านั้น โดยทั่วไปอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์

- Atomization stage เป็นขั้นตอนที่สารที่เหลืออยู่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูง (อาจถึง 3,000 องศาเซลเซียส) เพื่อให้สลายเกิดเป็นอะตอมอิสระ

2.3 Hydride Generation Technique เนื่องจากธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค Flam Atomization และ Electrothermal atomization ไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรวมกับออกซิเจน ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านั้นกลายเป็นสารที่เป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการ Reduce ให้เป็น Hydrided แล้วให้ Hydrided นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจนจะทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As Bi Se Pb Sb Sn และ Te

2.4 Cold Vapor Technique จัดเป็นวิธี Flameless atomization แบบ Vapor Generation ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่เปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทโดยใช้การ Reduction ของสารประกอบปรอท

3. Monochromator ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการ (Wavelength-selector)

4. Detector ของ AAS เป็นชนิด Photo Multiplier Tube (PMT)

5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล

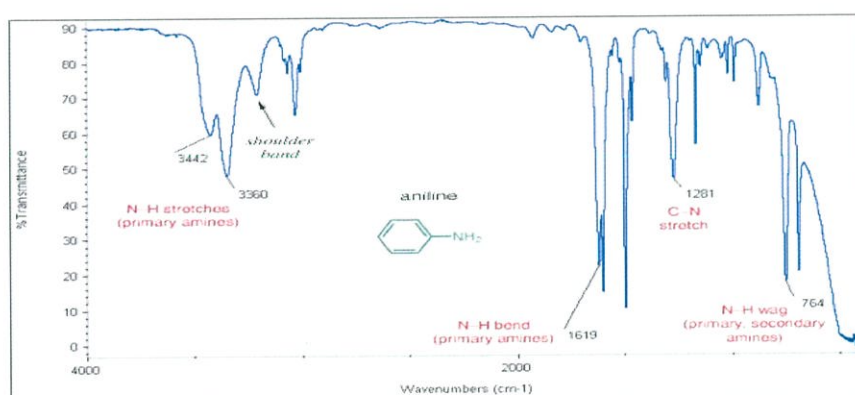
2.6.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared ($12800-4000\text{ cm}^{-1}$)
2. Middle Infrared ($4000-200\text{ cm}^{-1}$)
3. Far Infrared ($200-10\text{ cm}^{-1}$)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

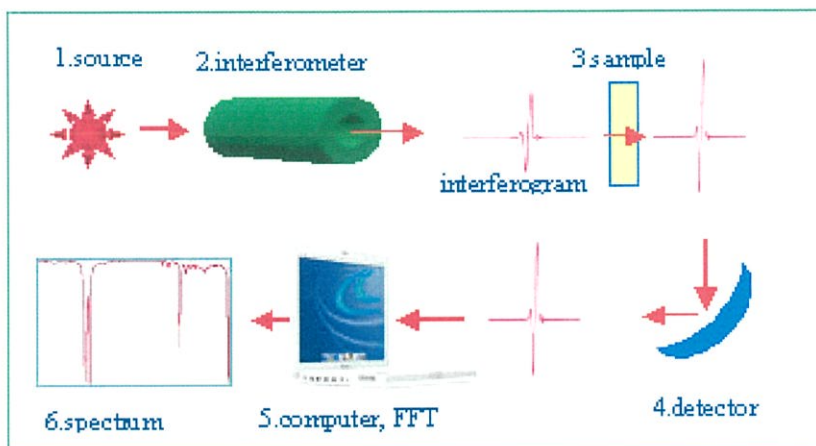


รูปที่ 2.9 สเปกตรัม FTIR ของ แอนิลีน (Aniline)

ที่มา : <http://orgchem.colorado.edu/Spectroscopy/irtutor/aminesir.html>

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR spectrometer ประกอบไปด้วย Light source, Interferometer Sample, Detector และ Computer



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR spectrometer

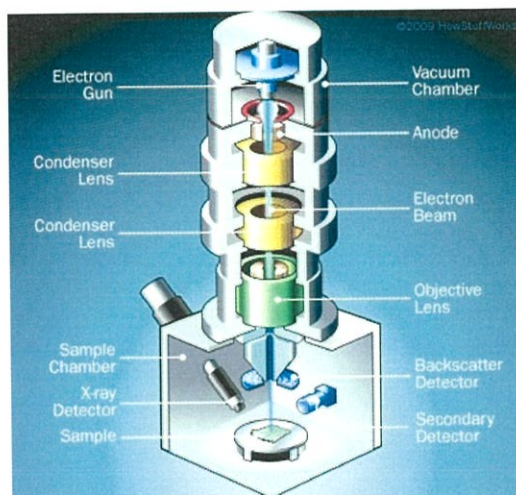
ที่มา : <http://www.nuance.northwestern.edu/KeckII/Instruments/FT-IR/index.html>

การใช้เครื่อง FTIR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้เวลาน้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้เพื่อการตรวจสอบในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ชนิดของสารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างสารสกัดจากพืช ตัวอย่างโพลิเมอร์ เป็นต้น

2.6.3 Scanning Electron Microscope (SEM) (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2557)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัญญาณของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัญญาณบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100

นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope

ที่มา : <http://science.howstuffworks.com>

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาก็จะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอัตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงก็สามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้น

จะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับความเร่งมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาสามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้ห่าวัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ajay Kumar Meena และคณะ (ค.ศ. 2008) ทำการทดลองเรื่องการกำจัด โครเมียม (VI) ตะกั่ว (II), พรอท (II) และทองแดง (II) โดยใช้ซีลีอ์ที่ได้รับการปรับปรุง พบว่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้น, พีเอช, ระยะเวลา, ตัวดูดซับ และอุณหภูมิ ค่าการดูดซับได้รับการพิจารณาโดยใช้ทั้งแบบจำลอง Langmuir และ Freundlich isotherm ซึ่งร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ถึงจุดสูงสุดที่ pH 6 และหลังจากนั้นก็ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ pH 6 ร้อยละการดูดซับของพรอท (II), ทองแดง (II) ตะกั่ว (II) และ โครเมียม (VI) ที่พีเอช 6 พบว่า 99.4, 92.2, 94.6 และ 99.3% ตามลำดับ การดูดซับโดยใช้ซีลีอ์ที่ได้รับการปรับปรุง พบว่าสามารถกำจัดไอออนของโลหะได้เกือบ 100% ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของปริมาณ 1 g/100ml สำหรับการแก้ปัญหาที่มีไอออนโลหะ 3 mg / L ในเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าแบบจำลอง Langmuir ให้ข้อมูลการทดลองที่ดีที่สุดเกี่ยวกับพฤติกรรมของการดูดซับของไอออนโลหะของซีลีอ์ที่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบ Freundlich และ Langmuir ค่าพีเอชเป็นตัวแปรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการควบคุมการดูดซับของไอออนโลหะบนพื้นผิวของซีลีอ์ที่ได้รับการปรับปรุง

Fatemeh Asadi และคณะ (ค.ศ. 2008) ทำการทดลองโดยนำฟางข้าวและซีลีอ์เป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก Pb(II) , Cd(II) , Zn(II) , Cu (II) และ Ni (II) จากน้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียตัวอย่าง ปรับปรุงลักษณะของตัวดูดซับด้วย HCl, NaOH และความร้อน ผลการทดลองพบว่าการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH และความเข้มข้นเริ่มต้นของ

ไอออนโลหะเพิ่มขึ้น สภาวะกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะสูงสุดของแต่ละโลหะคือ ที่ pH 5 ของ Pb(II) และ Cd (II) การดูดซับที่สูงที่สุดคือ Cu(II), Zn(II) และ Ni(II) รองลงมาตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับของฟางข้าวสูงกว่าขี้เถ้า การปรับปรุงด้วยสารเคมีนั้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับธรรมชาติลำดับดังต่อไปนี้ ปรับปรุงด้วยสารเคมีที่เป็นเบส> ความร้อน> กรด ซึ่งความสมดุลของข้อมูลสอดคล้องกับ Freundlich และ Langmuir models การนำฟางข้าวและขี้เถ้าที่ปรับปรุงด้วยสารเคมีไปใช้ในการดูดซับโลหะในน้ำเสีย สิ่งเคราะห์กับตัวอย่างน้ำเสียจริงซึ่งจะให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน การคายซับจะใช้น้ำและกรดไฮโดรคลอริกเพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

Ning-Chuan et al. (2009) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาและเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับทองแดง โดยใช้เปลือกส้มที่ผ่านการคัดแปลงด้วยสารเคมี การดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มได้คัดแปลงด้วยสารเคมี คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะไอออนและพีเอช การดูดซับทองแดงเป็นการติดตามผลพารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ (G) เอนทาลปี (H) และเอนโทรปี (S) ระหว่างการดูดซับเป็นตัวกำหนด ผลของกระบวนการดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มที่ผ่านการคัดแปลงด้วยสารเคมีสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เองและคายความร้อนภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา ความสมดุลของการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ดีโดยใช้สมการแลงเมียร์ (Langmuir equation) ปริมาณการดูดซับสูงสุดของทองแดงที่ 72.73 มิลลิกรัมต่อกรัมและการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เหมาะสมสอดคล้องกับ pseudo-second order ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 16 องศาเซลเซียสถึง 60 องศาเซลเซียสปริมาณทองแดงดูดซับได้ลดลง ตัวดูดซับที่ใช้แล้วถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งสามารถนำมาดูดซับได้อีก 5 ครั้ง แต่ประสิทธิภาพของการดูดซับจะลดลง

S.R. Shukla และ Roshan S. Pai (ค.ศ. 2005) ทำการทดลองโดยนำวัสดุธรรมชาติที่มีเซลลูโลสและมีราคาถูกเช่น เปลือกถั่วลิสง และ ขี้เถ้า ที่ได้รับการประเมินของการดูดซับ Cu (II) , Ni (II) และ Zn (II) จากสารละลาย วัสดุเหล่านี้แสดงให้เห็นความสามารถในการดูดซับที่ดี ในระดับที่ แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการรวมกันของวัสดุดูดซับและโลหะไอออน การประยุกต์ใช้ที่เฉพาะเจาะจง C.I. ปฏิกิริยา สีส้ม 13 ลงบนวัสดุ เพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะไอออน แต่ในการการลดค่า pH ของสารละลายพบว่าความสามารถในการดูดซับของโลหะไอออนมีค่าลดลง

ของฟรุนด์ลีชสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแลงเมียร์ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

อรทัย (พ.ศ. 2554) ศึกษาการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ซึ่งการศึกษาทั้งหมดอยู่ในรูปแบบการทดลองแบบกะ โดยปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษา ประกอบด้วยค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันนอกจากนี้เป็นการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเพื่อใช้หาค่าความสามารถในการดูดซับและอธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นรวมทั้งศึกษาการคายซับของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพหลังผ่านกระบวนการดูดซับจากผลการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อยและชานอ้อยที่การปรับสภาพ คือ พีเอช 6 ระยะเวลาในสัมผัส 120 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรณ สถานะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพเท่ากับร้อยละ 72.03 และ 79.55 สมการไอโซเทอร์มที่เหมาะสมคือ Langmuir Isotherm สำหรับความสามารถในการดูดซับสูงสุดของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 2.55 มิลลิกรัมต่อลิตรและเมื่อศึกษาการคายซับพบว่าประสิทธิภาพการคายซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.8 และ 99.9 ตามลำดับ

อรพิน (พ.ศ. 2553) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบกะ และแปรผันค่าพีเอชที่ 2 3 4 5 6 และ 7 ระยะเวลาในการบั่นกวนที่ 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ระยะเวลาการสัมผัสที่ 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ปริมาณกากชาที่ 1 2 3 4 5 และ 6 กรัม และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25 50 75 100 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่พีเอช 6 ระยะเวลาในการบั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้น และถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการดูดซับของฟรุนด์ลีช

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น AAnalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
2. เครื่อง FTIR รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer
3. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ LEO
4. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
5. ตู้อบ (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert
6. เครื่องกรองสูญญากาศ รุ่น Aspirator A-3s ยี่ห้อ Eyela
7. เครื่องเขย่าอัตโนมัติ รุ่น Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp
8. เครื่อง Centrifuge รุ่น Centaur 2 ยี่ห้อ sanyo
9. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S ยี่ห้อ Sartorius
10. หลอด Centrifuge
11. กรวย Buchner
12. กระดาษกรองยี่ห้อ Mancherey - Nagel
13. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh. มาตรฐาน ASTM E11
14. ครกและสากหิน
15. ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส
16. เดซิเคเตอร์
17. เครื่องพลาสติกต่าง ๆ

สารเคมี

1. เลด (II) ไนเตรต $Pb(NO_3)_2$ Analytical Univar Reagent, Ajax Finechem, Australia
2. ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) เกรด RPE บริษัท Carlo ErbaReagents, Italy
3. กรดไฮดรอกลอริก (HCl 0.1 mol/L, 0.05 mol/L) เกรด RPE บริษัท Carlo ErbaReagents, Italy
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$ 0.1 mol/L, 0.5 mol/L) เกรด RPE บริษัท Carlo ErbaReagents, Italy
5. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$ 1.5 mol/L) Analytical Univar Reagent, Ajax Finechem, Australia
6. เอทานอล (Ethanol) เกรด RPE บริษัท Carlo ErbaReagents, Italy
7. น้ำกลั่น

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่ว

1. ชั่งเลด (II) ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) มา 1.5970 กรัม
2. นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นและเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 20% ลงไป 15 มิลลิลิตร ปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. นำน้ำเสียที่มีสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี

1. ชั่งซิงค์ซัลเฟต มา 4.3960 กรัม
2. นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นและเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 20% ลงไป 15 มิลลิลิตร ปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. นำน้ำเสียที่มีสารละลายสังกะสีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.3 การเตรียมน้ำเชื้อ

1. นำน้ำเชื้อล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. บดน้ำเชื้อที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาคัดแยกขนาดให้มีขนาด 0-35 เมช โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 35 เมช เพื่อนำไปปรับปรุงด้วยสารเคมี

3.2.4 การปรับปรุงน้ำเชื้อด้วยสารเคมี (โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์)

(Ning-chuan, 2012)

1. ชั่งน้ำเชื้อที่บดและผ่านการคัดแยกขนาดแล้วมาจำนวน 100 กรัม นำมาแช่ในสารละลายที่มีส่วนผสมของเอทานอล 500 มิลลิลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$ 0.5 mol/L) 250 มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$ 1.5 mol/L) 250 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. นำน้ำเชื้อที่แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้งจนค่าพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำน้ำเชื้อไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่ออบน้ำเชื้อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว นำมาใส่ในแคสซิเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็น

3.2.5 ศึกษาหุ้มฟังก์ชันของสารองค์ประกอบที่อยู่ในซีลี้อยู่ปรับและซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับโครงสร้าง

1. บดซีลี้อยู่ที่ปรับด้วยสารเคมีและไม่ปรับอย่างละ 0.01 กรัม ให้ละเอียด
2. นำมาผสมกับ KBr 0.05 กรัม ในโถรงบดสารและบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ทิ้งไว้ 1-2 นาที
4. ถอดตัวประกอบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR เพื่อวิเคราะห์หาหุ้มฟังก์ชันของซีลี้อยู่ต่อไป

3.2.6 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของซีลี้อยู่ที่ปรับและซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับโครงสร้าง

1. ติดเทปคาร์บอนลงบน stub แล้วโรยตัวอย่างซีลี้อยู่ที่ปรับด้วยสารเคมีและไม่ปรับแต่ละชนิดลงไปบางๆ ใช้ลูกโป่งยางเป่าฝุ่น หรืออนุภาคที่ไม่ติดออกไป
2. นำตัวอย่างแต่ละชนิดมาฉาบผิวด้วยทองเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้า
3. นำตัวอย่างแต่ละชนิดที่ผ่านการฉาบผิวแล้วมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

3.2.7 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) โดยใช้ซีลี้อยู่ที่ผ่านการปรับด้วยสารเคมี

3.2.7.1 ศึกษาค่าความเป็น กรด – ด่าง (pH) ที่เหมาะสม (Ning-chuan, 20012)

1. ชั่งซีลี้อยู่ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 3 4 5 6 7 และ 8 ตามลำดับ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl 0.1 N) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 N)
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย จากนั้นกรองสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่ว

3.2.7.2 ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการตกตะกอน

1.เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชเป็น 3 4 5 6 7 และ 8 ตามลำดับ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl 0.1 N) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 N)

2.นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกรองสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4.ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

5.เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนเพื่อนำไปลบกับประสิทธิภาพการดูดซับจากนั้นเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

6.ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่ว

3.2.7.3 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม

1.ชั่งซีลี้อย 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลอง ข้อ 3.2.7.1)

2.นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 20 40 60 80 และ 100 ตามลำดับ

3.นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4.ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

5.เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

6.ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับสังกะสีสูงสุดจากผลการทดลอง ข้อ 3.2.7.1)

3.2.8 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของโลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ชั่งซีลี้อย 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 100 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1)

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับสังกะสีสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1) และกำหนดระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3.2.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับระหว่างซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีและซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

1. ชั่งซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์อย่างละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1)

2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ และซีลี้อยที่ไม่ได้ปรับปรุง

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับสังกะสีสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1) และกำหนดระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3.2.10 ศึกษาประสิทธิภาพการคายซับของซีลี้อย

1. นำซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ และซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงที่ได้จากข้อ 3.2.9 มาบดด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชั่งซีลี้อยทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร

3. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

4. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้และเก็บซีลี้อยไว้ใช้ในการทดลองต่อไป จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 4 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการดูดซับรอบแรกและการดูดซับหลังจากการคายซับ

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่ว

3.2.11 ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลี้อยกลับมาใช้ใหม่

1. นำซีลี้อยที่ได้จากข้อ 3.2.10 มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้งจนค่าพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำซีลี้อยไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์

2. ชั่งซีลี้อยทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1)

3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

4. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 4 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

6.ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับสังกะสีสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1) และกำหนดระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3.2.12 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของซีลี้อยู่ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง

1.ชั่งซีลี้อย 2.5 6.25 12.5 และ 25 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 25 มิลลิลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับตะกั่วสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1)

2.นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

3.นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4.ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

5.เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอร์มต่อไป

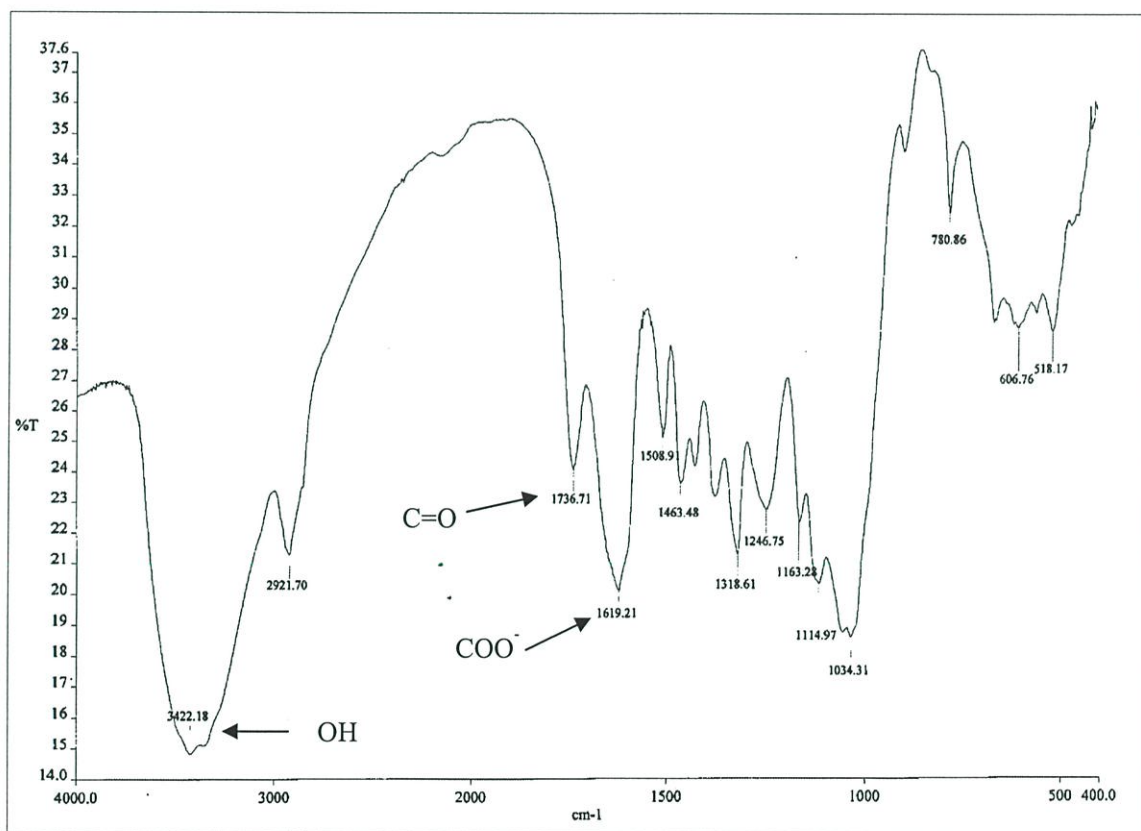
6.ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีแทนน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและควบคุมค่าพีเอชในสภาวะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับสังกะสีสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.7.1) และกำหนดระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลองข้อ 3.2.7.3)

บทที่ 4

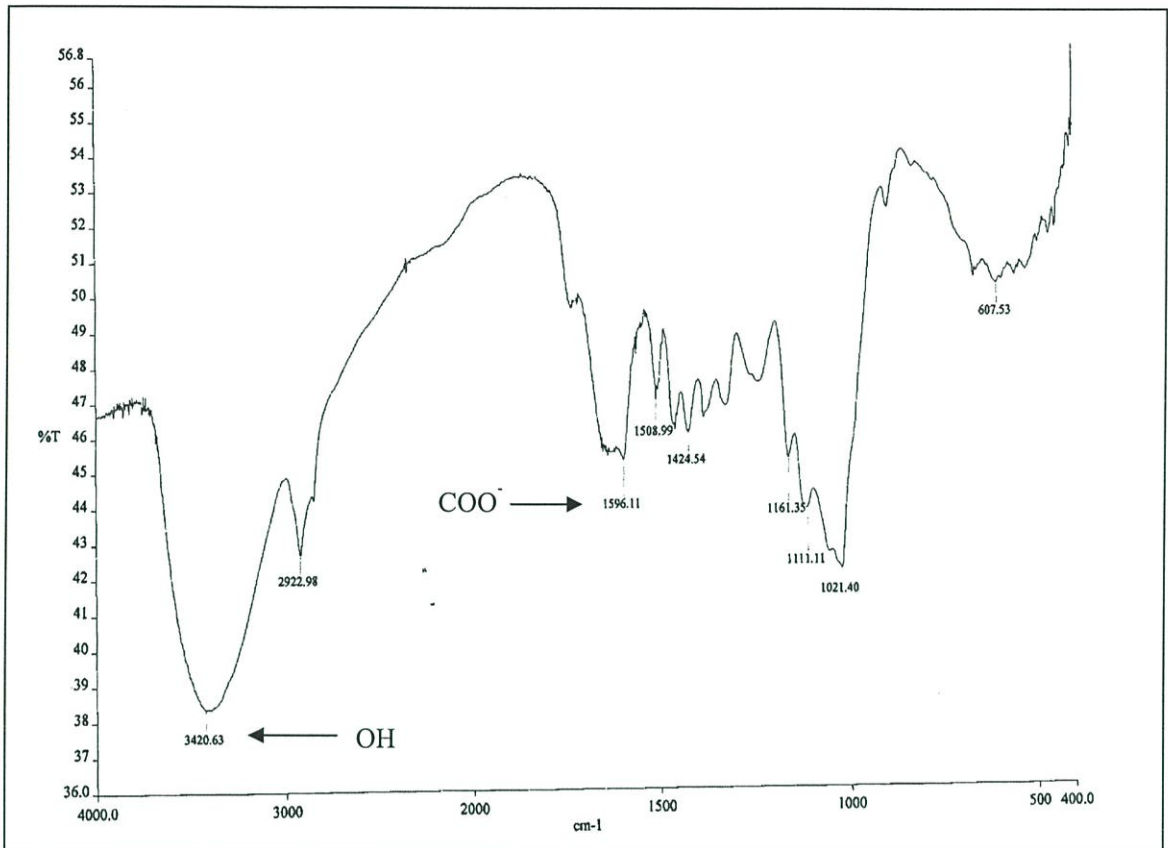
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี และซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุง

บดซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีและที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างให้ละเอียด นำมาผสมกับ KBr ในโถรงบดสารและบดสารให้ละเอียด จากนั้นใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์แล้ว นำตัวอย่างเข้าเครื่อง FTIR เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในซีลี้อย ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.1- 4.2



รูปที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม FTIR ของซีเลื้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี

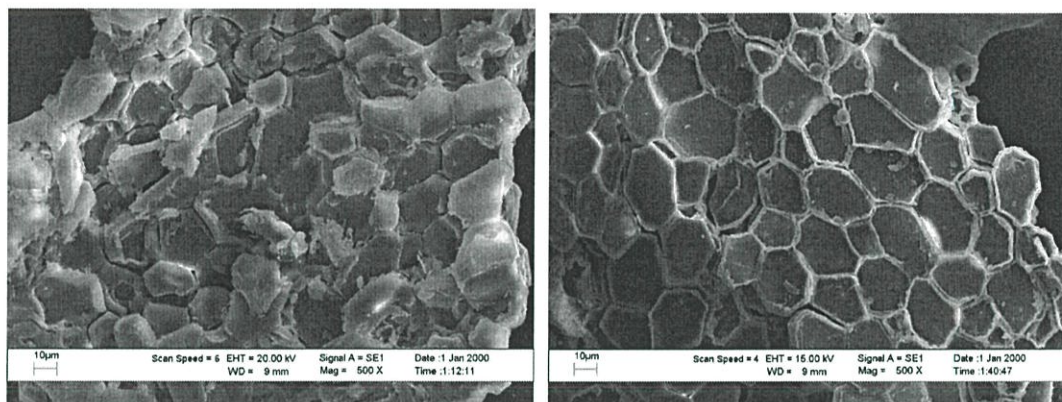
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงสเปกตรัม FTIR ของซีเลื้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างและซีเลื้อยที่ปรับปรุงโครงสร้าง พบว่าซีเลื้อยทั้ง 2 ชนิดนั้นมีแถบความยาวคลื่นที่ 3400 cm^{-1} ซึ่งคือหมู่ OH ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบอยู่ใน เซลลูโลส เพคติน เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ที่แถบความยาวคลื่น 2922 cm^{-1} คือ C—H ซึ่งเป็นแถบการยืดของหมู่ methyl, methylene และ methoxy รูปที่ 4.1 FTIR ของซีเลื้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างแสดงที่ความยาวคลื่น 1736 cm^{-1} และ 1619 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยืดนี้เป็นของหมู่ ester carbonyl (C=O) และไอออน carboxylate (COO⁻) ตามลำดับ ซึ่งจะหายไปหลังการปรับปรุงโครงสร้างดังรูปที่ 4.2 ที่แถบความยาวคลื่น 1596 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่า methyl esters ถูกไฮโดรไลส์ด้วย NaOH และหมู่เอสเทอร์จะถูกแปลงเป็นไอออน carboxylate (Ning-chuan, 2009) ซีเลื้อยที่ปรับปรุงด้วย NaOH จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Methyl ester ที่มีอยู่ในซีเลื้อย ทำให้จำนวนลิแกนด์ของ Carboxylate เพิ่มขึ้น ดังสมการ



CaCl_2 จะไปลดการละลายของ pectin acid ที่มีอยู่ในซีเลื้อย ทำให้ pectin acid ตกตะกอน มีผลให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น (Ning-chuan, 2009)

4.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีและขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

จากการนำขี้เลื่อยแต่ละชนิดไปจุ่มผิวด้วยทองคำแล้วมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างของขี้เลื่อยที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

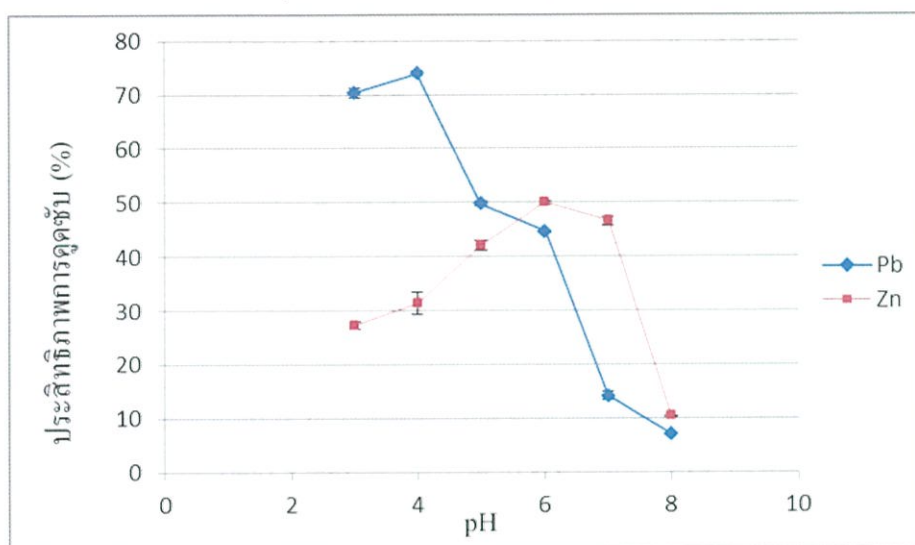
(ก) คือ ขี้เลื่อยไม่ปรับปรุงโครงสร้าง (ข) คือ ขี้เลื่อยปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี

จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุงและขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะแสดงให้เห็นได้ว่าโครงสร้างของขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง (รูปที่ 4.3 ก.) มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ เมื่อเทียบกับภาพถ่ายโครงสร้างของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี (รูปที่ 4.3 ข.) จะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากสมบัติความเป็น isotropy ของขี้เลื่อยนั้นถูกกำจัดโดยการปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl_2 ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างคือทำให้เส้นใยมีความสะอาดขึ้น และมีโครงสร้างที่ชัดเจนเป็นรังผึ้งมากขึ้น (Jiwan Singh, 2011) ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มากขึ้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงขี้เลื่อยนั้นคือ NaOH กับ CaCl_2 ที่สามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวของขี้เลื่อยให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ดูดซับโลหะหนัก

4.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) โดยใช้ขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี

4.3.1 ศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

จากการทดลองเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับ ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนโลหะตะกั่วและสังกะสี ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L นำมาปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 3 4 5 6 7 และ 8 ผลของประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักที่ pH ต่างๆของขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี แสดงดังรูปที่ 4. 4



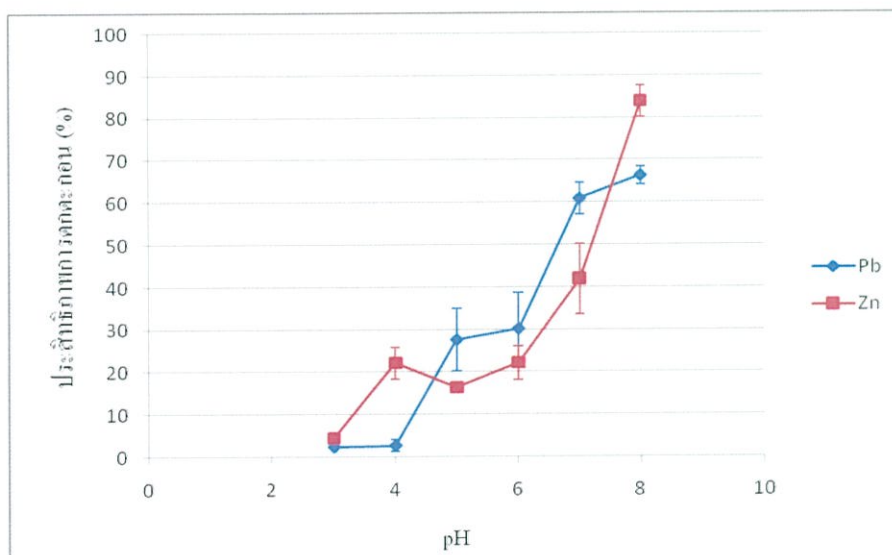
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับ ประสิทธิภาพการดูดซับ

จากรูปที่ 4.4 สำหรับสังกะสี เมื่อเพิ่ม pH จาก 3 ถึง 6 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น โดยที่ pH 6 ขี้เถ้าจะดูดซับได้ดีที่สุด ประสิทธิภาพการดูดซับเป็นร้อยละ 49.97 ซึ่งการที่ pH 6 เป็น pH ที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับสังกะสีนี้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของอรพิน (2553) ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ pH ต่ำ สารละลายหรือน้ำเสียสังเคราะห์จะเต็มไปด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) และ H^+ จะไปขัดขวางการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของขี้เถ้า จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่ำ เมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น H^+ มีค่าลดลงทำให้โลหะเข้าไปยึดเกาะบนพื้นผิวของขี้เถ้าได้มากขึ้น จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อเพิ่ม pH จาก 6 ไปถึง 8 ประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีของขี้เถ้าจะลดลงเรื่อยๆ เพราะที่ pH สูง OH^- ในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สังกะสีเกิดกลไกการตกตะกอนมากขึ้น ซึ่งจะไปแข่งขันกับกลไกการดูดซับ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ค่า pH ที่ดีที่สุดในการดูดซับสังกะสีคือ 6

สำหรับตะกั่ว เมื่อเพิ่ม pH จาก 3 ถึง 4 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของขี้เถ้าสูงชัน และจะสูงสุดเมื่อ pH ของน้ำเสียเป็น 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับเป็นร้อยละ 73.96 แต่เมื่อเพิ่ม pH จาก 4 ไปถึง 8 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของขี้เถ้าจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งการที่ pH 4 เป็น pH ที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับตะกั่วนี้ จะสอดคล้องกับงานวิจัยของเทียมชัยและคณะ (2552)

4.3.2 ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการตกตะกอน

จากการทดลองเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการตกตะกอน ทำการทดลอง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและสังกะสี ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L นำมาปรับค่า pH ของ น้ำเสียสังเคราะห์เป็น 3 4 5 6 7 และ 8 โดยไม่ใส่ขี้เถ้า พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะหนักที่ pH ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5



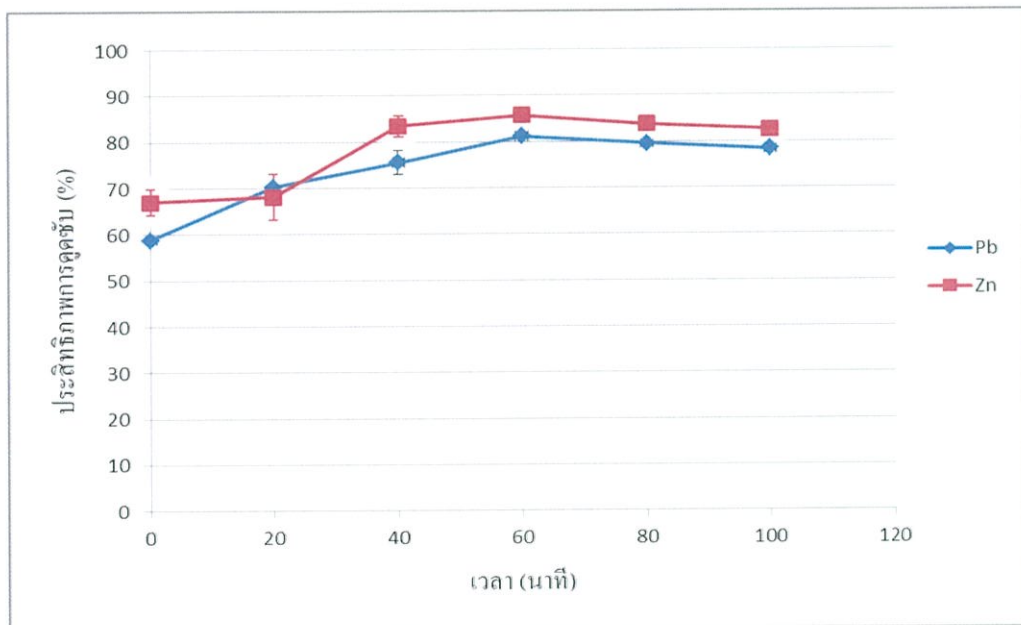
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับประสิทธิภาพการตกตะกอนของโลหะหนัก

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูป 4.5 แสดงให้เห็นว่า ที่ pH สูงขึ้น แนวโน้มการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น จะเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้โลหะเกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาข้อมูลของตะกั่วจะเห็นว่า การเพิ่ม pH จาก 3 เป็น 4 ไม่ส่งผลกระทบต่อ การตกตะกอนเพิ่มขึ้นมากนัก แต่เมื่อเพิ่ม pH จาก 4 เป็น 8 ค่าความชันของกราฟจะสูงขึ้นมาก นั่นคือการเพิ่มพีเอชนี้ส่งผลกระทบต่อ การตกตะกอนเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งจะส่งผลให้กลไกนี้ไปแข่งขันกับกลไก การดูดซับ ทำให้ค่าการดูดซับ (ในรูปที่ 4.4) ลดลงเมื่อเพิ่ม pH จาก 4 เป็น 8

สำหรับข้อมูลของสังกะสีก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อเพิ่ม pH จาก 3 ถึง 6 ความชันของกราฟในรูปที่ 4.5 จะน้อยกว่า เมื่อเพิ่ม pH จาก 6 ถึง 8 แสดงว่าการเพิ่ม pH จาก 6 ถึง 8 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของการตกตะกอนมากกว่า ข้อมูลนี้จะสนับสนุนข้อมูลในรูปที่ 4.4 คือ เมื่อเพิ่ม pH จาก 6 ถึง 8 ค่าการดูดซับจะลดลง เพราะกลไกการตกตะกอนจะเด่นมากจึงไปแข่งขันกับกลไกการดูดซับ

4.3.3 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม

จากการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนตะกั่วและสังกะสีที่มีความเข้มข้น 50 mg/L นำมาปรับค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับโลหะแต่ละตัว (pH 4 สำหรับตะกั่ว และ pH 6 สำหรับสังกะสี) จากนั้นนำเอาไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ โดยนำออกจากเครื่องเป็นเวลาที่แตกต่างกันคือ 0 20 40 60 80 และ 100 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักที่เวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6



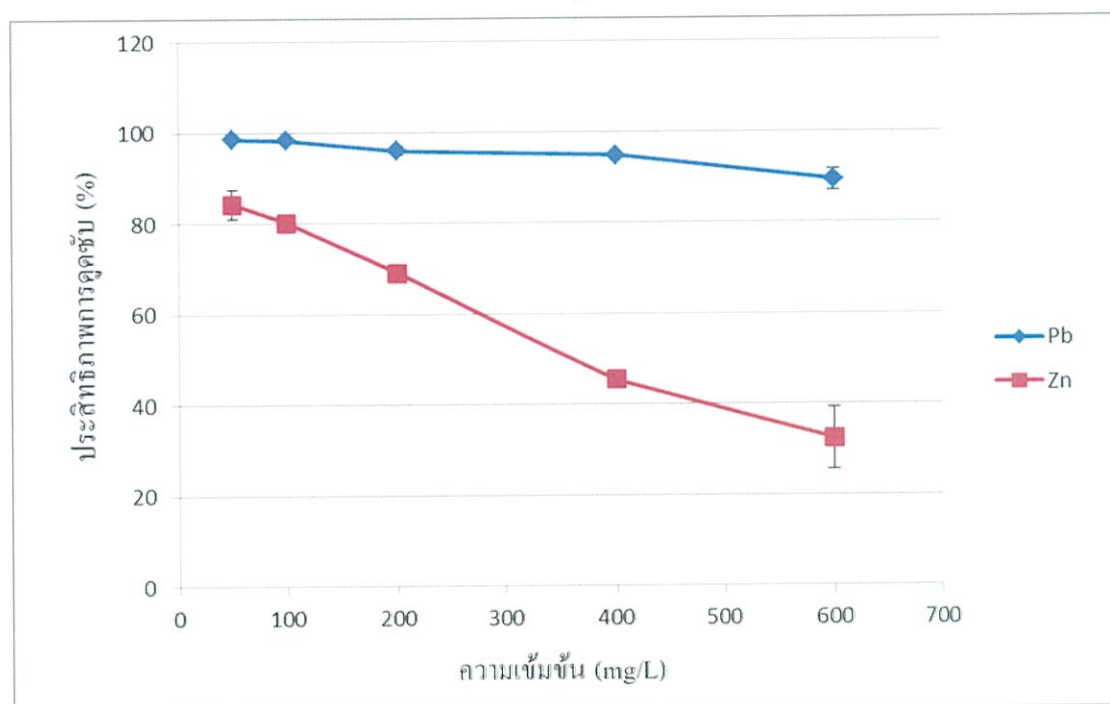
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการดูดซับของโลหะหนัก

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีคือ 60 และ 40 นาที ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วและสังกะสีร้อยละ 81.20 และ 83.43 ตามลำดับ เนื่องมาจากระยะเวลาแรกที่ผิวของตัวดูดซับมีมากทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

แต่เมื่อเวลาผ่านไปตะกั่วและสังกะสีจะเข้าไปยึดเกาะบนพื้นที่ผิวของซีลีเนียมทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นใหม่เป็นไปได้โดยยากและจะเกิดแรงผลักดันระหว่างโลหะที่เข้าไปยึดเกาะใหม่ โลหะที่ถูกดูดซับไว้เดิมเรียกว่า การคายซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ (อรทัย, 2554)

4.4 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของโลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก (ตะกั่วและสังกะสี) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 100 200 400 และ 600 mg/L โดยใช้ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีคือ pH 4 และ pH 6 ตามลำดับและใช้ระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีคือ 60 และ 40 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



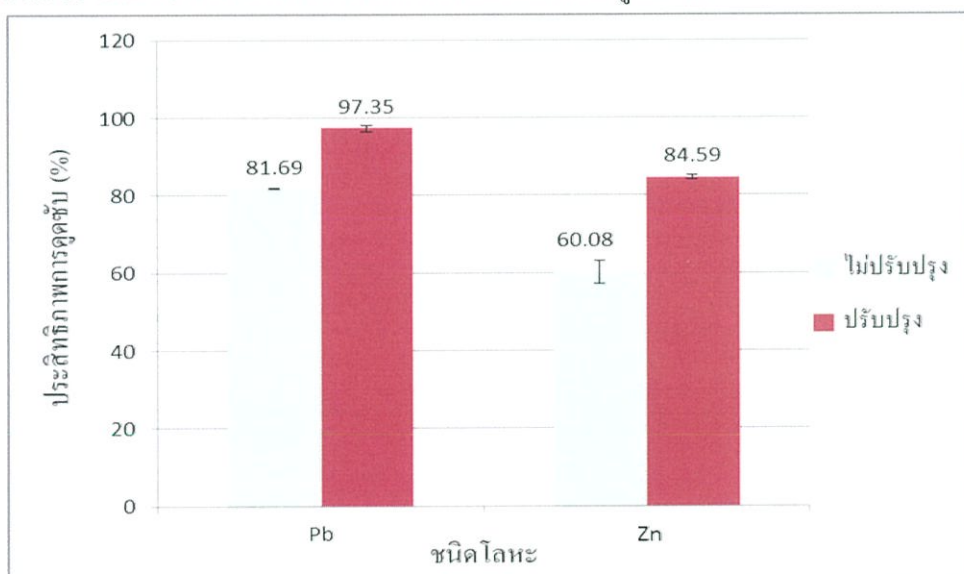
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย 50 mg/L พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วและสังกะสี คือ ร้อยละ 98.55 และ 84.30 ตามลำดับ เนื่องมาจากไอออนโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นมีปริมาณน้อยและตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพียงพอสำหรับการดูดซับโลหะได้ ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์มีมากขึ้นถึง 600

mg/L ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วและสังกะสีลดลงเหลือร้อยละ 89.38 และ 32.45 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของไอออนเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซีเมนต์ได้ยาก จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซีเมนต์ และมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (อรทัย, 2554)

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของซีเมนต์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี และซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

จากการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างกับซีเมนต์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์(ตะกั่วและสังกะสี) ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L pH ที่เหมาะสมสำหรับตะกั่วและสังกะสีคือ pH 4 และ 6 ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างตัวดูดซับกับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วและสังกะสีคือ 60 และ 40 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของซีเมนต์ที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

จากแผนภูมิแท่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับจากซีเมนต์ที่ปรับปรุงกับซีเมนต์ที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างทั้งกรณีโลหะตะกั่วและสังกะสี จะพบว่าซีเมนต์ที่ปรับปรุงโครงสร้างแล้วจะดูดซับไว้ได้ดีกว่าซีเมนต์ที่ยังไม่ปรับปรุงโครงสร้าง โดยหลังปรับปรุงโครงสร้างแล้ว ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะเพิ่มขึ้นประมาณ 15-20% ที่เป็นเช่นนี้เพราะซีเมนต์ที่ปรับปรุงโครงสร้างนั้น

NaOH จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Methyl ester ที่มีอยู่ในซีลี้อยทำให้จำนวนลิแกนด์ของ Carboxylate เพิ่มขึ้น ดังสมการ

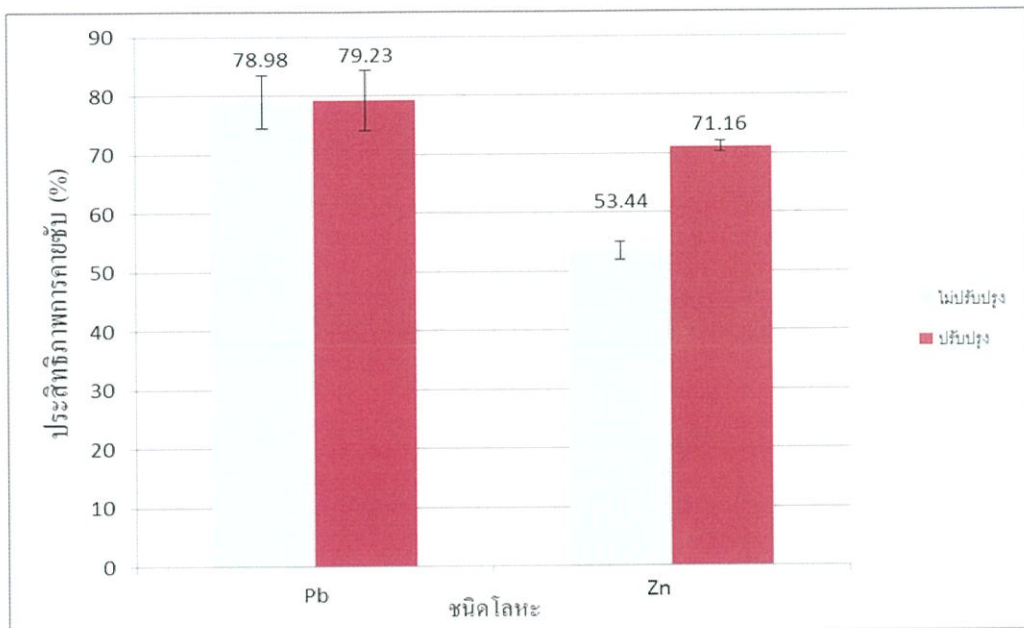


และ CaCl_2 จะไปลดการละลายของ pectin acid ที่มีอยู่ในซีลี้อย ทำให้ pectin acid ตกตะกอนมีผลให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น (Ning-chuan, 2009)

จากรูปที่ 4.3 ซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างจะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากสมบัติความเป็น isotropy ของซีลี้อยส่งผลต่อโครงสร้างคือทำให้เส้นใยมีความสะอาดมากขึ้น และมีโครงสร้างที่ชัดเจนเป็นรังผึ้งมากขึ้น (Jiwan Singh, 2011) ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ส่วนถ้าพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างโลหะ 2 ชนิด คือ ตะกั่วกับสังกะสี จะเห็นได้ว่าตะกั่วมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าสังกะสี เนื่องจากขนาดอะตอมของตะกั่วมีขนาดรัศมีอะตอม 180 pm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอะตอมสังกะสีที่มีรัศมีอะตอม 135 pm การที่ขนาดอะตอมไม่เท่ากันนั้นอาจจะส่งผลให้การเข้าไปจับยึดและแทรกในโครงสร้างตามรูพรุนได้แตกต่างกัน

4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการคายซับของซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีและซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

จากการทดลองที่นำซีลี้อยทั้งสองชนิดจากการทดลองประสิทธิภาพนำมาอบเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นเติมกรด HCl 0.05 mol/L แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที ปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเป็นเวลา 5 นาที กรองสารละลายที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่คายออกมาด้วยเครื่อง AAS ผลประสิทธิภาพการคายซับแสดงดังรูปที่ 4.9



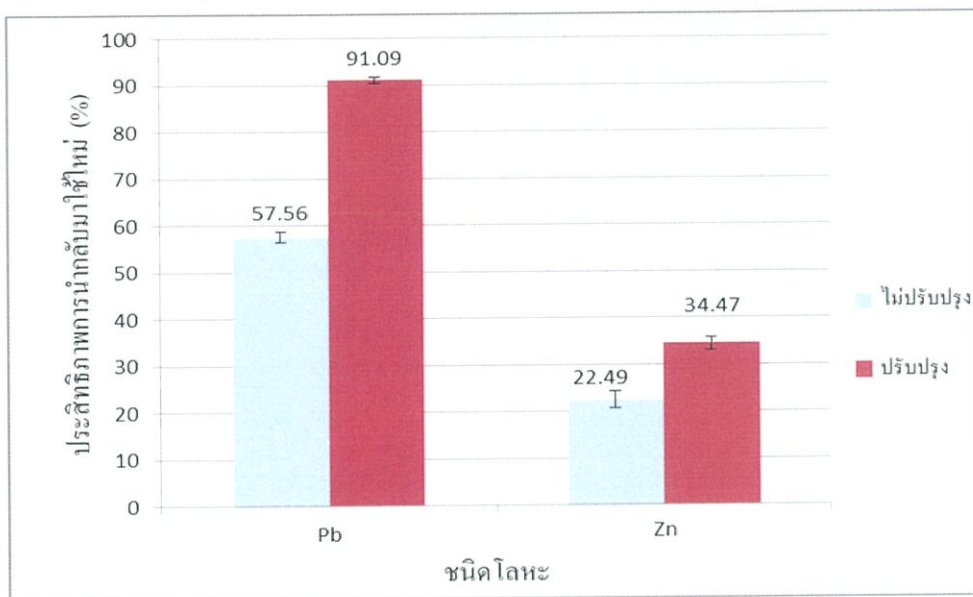
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของซีลีเนียมกับประสิทธิภาพการคายซับโลหะหนัก

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีจะคายซับได้ดีกว่าซีลีเนียมที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง การคายซับตะกั่วโดยใช้ซีลีเนียมที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างมีค่า ร้อยละ 78.98 การคายซับตะกั่วโดยใช้ซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีมีค่า ร้อยละ 79.23 และการคายซับสังกะสีโดยใช้ซีลีเนียมที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างมีค่า ร้อยละ 53.44 การคายซับสังกะสีโดยใช้ซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี คือ ร้อยละ 71.16 จะเห็นได้ว่าซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี จะคายซับโลหะทั้ง 2 ชนิดได้ดีกว่าเนื่องจากโครงสร้างของซีลีเนียมที่ปรับปรุงด้วยสารเคมี (รูปที่ 4.3) จะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นเนื่องจากสมบัติความเป็น isotropy ของซีลีเนียมนั้นถูกกำจัดโดยการปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl_2 ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้าง คือ ทำให้เส้นใยมีความสะอาดขึ้น และมีโครงสร้างที่ชัดเจนเป็นรังผึ้งมากขึ้น (Jiwan Singh, 2011)

4.7 ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลีเนียมกลับมาใช้ใหม่

นำซีลีเนียมแต่ละชนิดจากการทดลองการคายซับมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งนำซีลีเนียมไปอบเป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นนำซีลีเนียมแต่ละชนิดใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน (ตะกั่วหรือสังกะสี) ความเข้มข้น 50 mg/L ปรับ pH สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนตะกั่วและสังกะสีเป็น 4 และ 6 ตามลำดับ ระยะเวลาการสัมผัสสำหรับดูดซับตะกั่วและสังกะสีคือ 60 และ 40 นาที ตามลำดับ

จากนั้นนำไปปั่นหึ่งแล้วกรองเอาสารละลายส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของซีลีเยกับประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการนำซีลีเยกลับมาใช้ใหม่เมื่อผ่านการดูดซับโลหะทั้ง 2 ชนิดแล้วพบว่า ซีลีเยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างเมื่อนำไปใช้ดูดซับตะกั่วอีกครั้งพบว่า ร้อยละการดูดซับคือ 57.56 และซีลีเยที่ปรับปรุงโครงสร้างเมื่อนำมาใช้ดูดซับตะกั่วอีกครั้งพบว่า ร้อยละการดูดซับ คือ 91.09 ซึ่งความแตกต่างในการดูดซับตะกั่วของซีลีเยทั้ง 2 ชนิดคือ ร้อยละ 33.53 ส่วนการดูดซับสังกะสีอีกครั้งโดยใช้ซีลีเยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างพบว่า มีร้อยละการดูดซับ 22.49 และเมื่อใช้ซีลีเยที่ปรับปรุงโครงสร้างพบว่าการดูดซับ 34.47 ซึ่งความแตกต่างในการดูดซับตะกั่วของซีลีเยทั้ง 2 ชนิดคือ ร้อยละ 11.98

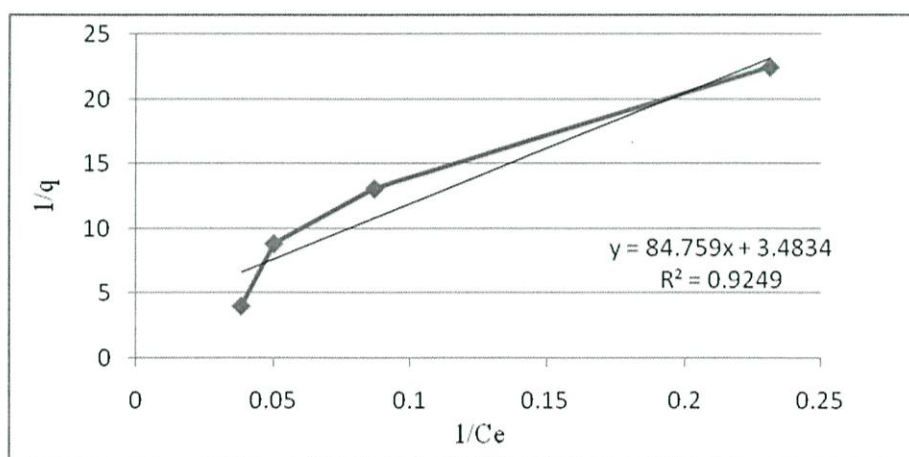
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะโดยซีลีเยก่อนและหลังการคายซับ

ชนิดโลหะ	ชนิดซีลีเย	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)		ประสิทธิภาพการดูดซับที่ลดลง (%)
		ก่อนการคายซับ	หลังการคายซับ	
ตะกั่ว	ไม่ปรับปรุง	81.69	57.56	24.13
	ปรับปรุง	97.35	91.09	6.26
สังกะสี	ไม่ปรับปรุง	60.08	22.49	37.59
	ปรับปรุง	84.59	34.47	50.12

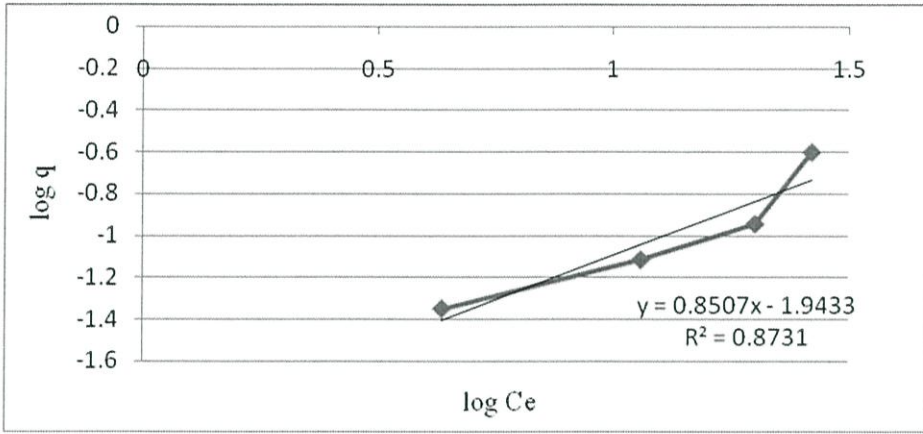
จากตารางที่ 4.1 จะพบว่า เมื่อนำซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุง โครงสร้างมาคยขับและ นำมาดูดซับตะกั่วอีกครั้ง การดูดซับจะลดลงไปร้อยละ 24.13 และ 6.26 ตามลำดับ และเมื่อนำซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุง โครงสร้างมาคยขับแล้วนำมาดูดซับสังกะสี การดูดซับจะลดลง ร้อยละ 37.59 และ 50.12 ตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ซีลี้อยที่ผ่านการปรับปรุง โครงสร้างแล้วจะมีประโยชน์ที่สุดในการนำไปดูดซับตะกั่ว และสามารถใช้ซ้ำได้ โดยที่ความสามารถยังไม่ ลดลงมากนัก แต่สำหรับการดูดซับสังกะสีนั้น จะใช้ได้ดีเพียงครั้งเดียวจะไม่เหมาะสมที่จะนำ กลับมาใช้ใหม่

4.8 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและสังกะสีของซีลี้อยที่ผ่านการปรับปรุง โครงสร้าง

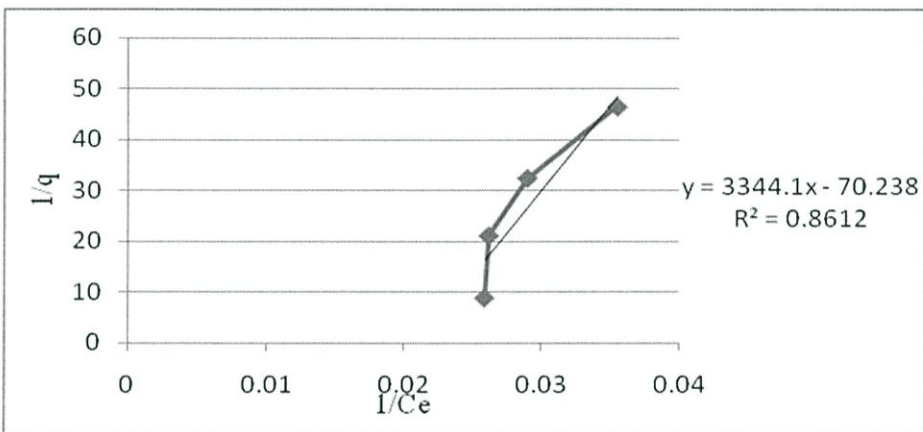
จากผลการทดลองที่ผ่านมาเป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับและ ประสิทธิภาพการทำงานของซีลี้อยแต่ละชนิดจากนั้นจึงทำการทดลองหา ไอโซเทอมของการดูดซับ ตะกั่วและสังกะสีทำได้โดย นำซีลี้อยแต่ละชนิดมา 2.5 6.25 12.5 และ 25 มิลลิกรัม เติมน้ำเสียตะกั่ว หรือสังกะสีสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L ควบคุมค่า pH สำหรับตะกั่วและสังกะสีคือ 4 และ 6 ตามลำดับ ระยะเวลาการสัมผัสของตะกั่วและสังกะสีคือ 60 และ 40 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไป บั่นเหวียงแล้วกรองเอาสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ผลการศึกษาไอโซเทอมแสดงดังรูป ที่ 4.11- 4.14



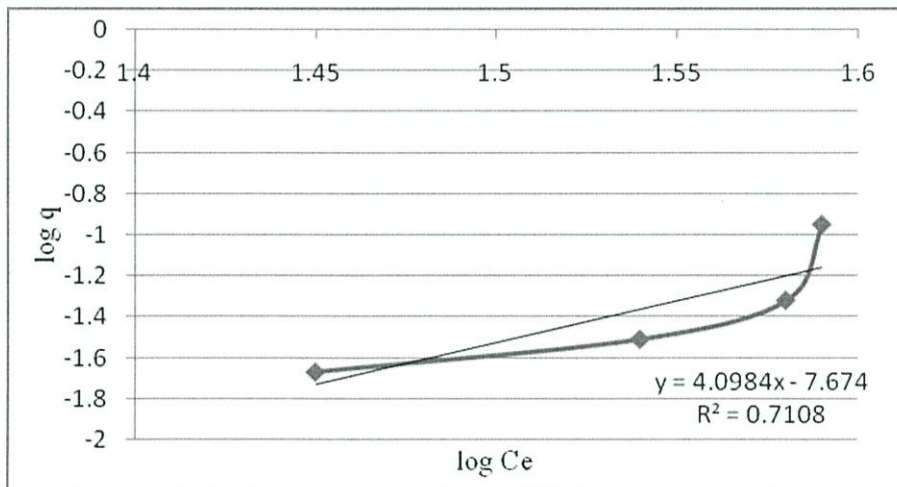
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบแลงเมียร์ของการดูดซับตะกั่ว



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบฟรุนดิชของการดูดซับตะกั่ว



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสังกะสี



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ตามสมการแบบฟรุนดิชที่ของการดูดซับสังกะสี

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ แลงเมียร์และสมการแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช พบว่าจากสมการแบบจำลองการดูดซับของ แลงเมียร์มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการแบบจำลองการดูดซับของ ฟรุนดลิช ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โลหะหนักด้วยซีลีเนียมเป็นไปตาม ไอโซเทอมของแลงเมียร์ คือการดูดซับของตะกั่วและสังกะสีบนพื้นผิวของซีลีเนียมเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) กล่าวคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มีการซ้อนทับกัน หรือชั้นของซีลีเนียมมีความหนาเท่ากัน หมด พื้นที่ผิวในการดูดซับมีจำนวนจำกัดและมีกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างของ สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นผิวของซีลีเนียม และ เมื่อดูดซับแล้ว ตะกั่วและสังกะสีจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นผิวสัมผัส รวมทั้งไม่มีผลกระทบหรือแรงกระทำต่อกันและกันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของAjay Kumar Meena และคณะ (2008)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความสามารถในการบำบัดตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยวิธีการดูดซับโดยซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย CaCl_2 และ NaOH โดยสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาสเปกตรัม FTIR ของซีลี้อยู่ทั้งสองชนิดพบว่า ทั้งซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับปรุงและที่ปรับปรุงโครงสร้างมีหมู่ OH ซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างจะพบหมู่ ester carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) และไอออน carboxylate (COO^-) ส่วนในซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงโครงสร้างจะพบว่า methyl esters ถูกไฮโดรไลส์ด้วย NaOH และหมู่เอสเทอร์จะถูกแปลงเป็นไอออน carboxylate

2. จากการศึกษาภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะพบว่าโครงสร้างของซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างของซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีจะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น

3. จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วด้วยซีลี้อยู่ปรับปรุงคือ pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาในการดูดซับคือ 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วคือร้อยละ 97.35

4. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสีด้วยซีลี้อยู่ปรับปรุงคือ pH เท่ากับ 6 และระยะเวลาในการดูดซับคือ 40 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีคือร้อยละ 84.59

5. ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีผลต่อการตกตะกอนของน้ำเสียโลหะหนักสังเคราะห์ (ตะกั่วและสังกะสี) พบว่า สารละลายที่มีค่า pH สูงขึ้น ทำให้การตกตะกอนของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

6. ประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุดในของตะกั่วและสังกะสีที่ความเข้มข้นโลหะในสารละลาย 50 mg/L และประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น

7. ประสิทธิภาพการดูดซับของซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงโครงสร้างดีกว่าซีลี้อยู่ที่ไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้าง โดยที่หลังจากการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15-20% และประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วจะดีกว่าประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี

8. ซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีจะคายซับโลหะหนักได้ดีกว่าซีลี้อยู่ที่ไม่ได้ปรับปรุงโครงสร้าง

9. จีลื้อที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วจะมีประโยชน์ที่สุดในการนำไปดูดซับตะกั่ว และสามารถใช้ซ้ำได้ โดยที่ความสามารถยังไม่ลดลงจากเดิมมากนัก

10. การดูดซับโลหะตะกั่วและสังกะสีด้วยจีลื้อที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย CaCl_2 และ NaOH สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการนำจีลื้อไปบำบัดหรือทำการดูดซับกับโลหะหนักชนิดอื่น
2. ควรศึกษาการนำจีลื้อจากต้นไม้ชนิดอื่นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับจีลื้อจากไม้ยูคาลิปตัส
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด ควรนำวัสดุดูดซับไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรม
4. ควรศึกษาการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยสารชนิดอื่นเพื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

เอกสารอ้างอิง

- เทียมชัย บัวลอย, วิภาดา สนองราษฎร์ และ สมภพ สนองราษฎร์.2552. การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์มูลโค. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย,1-9.
- ธิดาพร ฤทธิศร, เบญจวรรณ จิตรพวน และ แสงสุรีย์ ศรีสะอาด. 2556. การดูดซับทองแดงโดยใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 1-80.
- ปรีชา เกียรติกระจาย, ทรงกลด จารุสมบัติ. 2528. เคมี่ของเนื้อไม้. ภาควิชาผลิตภัณฑ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 88-89
- อนิสา ทรัพย์นิวัตต์, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และ อรรณพ หอมจันทร์. 2555. การบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนักด้วยเปลือกหอยธรรมชาติ (กระช้ำ). การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, 411-418.
- อัญชลี เลิศสงคราม. 2554. การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. วารสารองค์การเภสัชกรรม. ปีที่ 18, ฉบับที่ 3, (กรกฎาคม-กันยายน), 17-18
- FENG Ning-chuan , GUO Xue-yi , LIANG Sha. 2009. Kinetic and thermodynamic studies on biosorption of Cu(II) by chemically modified orange peel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 19, 1365-1370.
- FENG Ning-chuan, GUO Xue-yi. 2012. Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** Vol 22 : 1224 – 1233.
- M. Rafatullah, O. Sulaiman, R. Hashim, A. Ahmad. 2009. Adsorption of copper (II), chromium (III), nickel (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by meranti sawdust. **Journal of Hazardous Materials** 170, 969–977.
- Fatemeh Asadi, Hossien Shariatmadari , Noorallah Mirghaffari. 2008. Modification of rice hull and sawdust sorptive characteristics for remove heavy metals from synthetic solutions and wastewater. **Journal of Hazardous Materials** 154 , 451–458.
- Ajay Kumar Meena, K. Kadirvelu, G.K. Mishra, Chitra Rajagopal, P.N. Nagar.2008. Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solution by treated sawdust (*Acacia arabica*). **Journal of Hazardous Materials** 150, 604–611.

S.R. Shukla, Roshan S. Pai. 2005. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) on dye loaded groundnut shells and sawdust. **Separation and Purification Technology** 43, 1–8.

Jiwan Singh, N.S. Mishra, Uma, Sushmita Banerjee, and Yogesh C. Sharma. 2011. Comparative studies of physical characteristics of raw and modified sawdust for their use as adsorbents for removal of acid dye. **Bioresources** 6(3), 2732-2743.

บริษัท กลาสแวร์ เคมิคอล กรุ๊ป จำกัด. 2553. สังกะสี. [Online].Available :

<http://glasswarechemical.com/tag/%E0%B8%98%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%98%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B8zn%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B8%B9/>.
สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

บริษัท พรีเมียร์ เอ็นทานีเยอร์ แอนด์ ซัพพลาย จำกัด. 2556. ประเภทและประโยชน์ของสังกะสี.

[Online].Available: http://www.premierentaneer.com/Page_Article/pa_130816a.php.
สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2553. การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้กากขี้. [Online].Available: <http://tar.thailis.or.th/handle/123456789/252?mode=full>.
สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555. การดูดซับ (adsorption). [Online].Available :

http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf. สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2555. **Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)**.

[Online].Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/137-atomic-absorption-spectrophotometer-aas.html>. สืบค้นวันที่ 25 ธันวาคม 2556.

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2555. **Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)**.

[Online].Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/139-ftir-raman-spectrometer.html>. สืบค้นวันที่ 25 ธันวาคม 2556.

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2557. **Scanning Electron Microscope (SEM)**. [Online].Available :

<http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>. สืบค้นวันที่ 25 ธันวาคม 2556.

วารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2556. การดูดซับน้ำมันโดยใช้ขานอ้อยปรับสภาพ.

[Online].Available : <http://journal.msu.ac.th/?p=2397>. สืบค้นวันที่ 8 มกราคม 2557.

ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. 2553. ตะกั่ว. [Online].Available : [http:// webdb. dmasc. moph. go.th](http://webdb.dmasc.moph.go.th)

/ifc_toxic/a_txR_search.asp?info_id=41. สืบค้นวันที่ 29 ธันวาคม 2556.

สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2554. การดูดซับโลหะหนักโดยวิธี

ทางชีวภาพ.[Online].Available : [http://siweb.dss.go.th/ information/FAQ/](http://siweb.dss.go.th/information/FAQ/)

search_FAQ.asp?QA_ID=367. สืบค้นวันที่ 13 มีนาคม 2557.

หน่วยข้อเสนอแนะวัตถุอันตรายและความปลอดภัยศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสีย

อันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549. โลหะหนัก. [Online].Available :

<http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=7>. สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

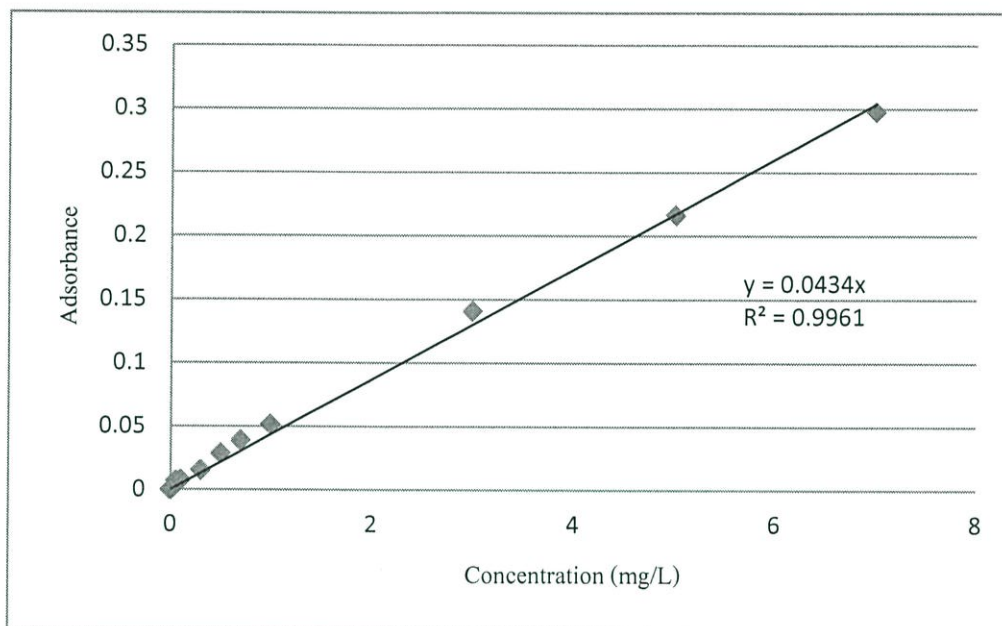
ASTV ผู้จัดการออนไลน์. 2551. พิษที่นำมาใช้ในการศึกษา. [Online].Available :

<http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9510000021870>. สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2556.

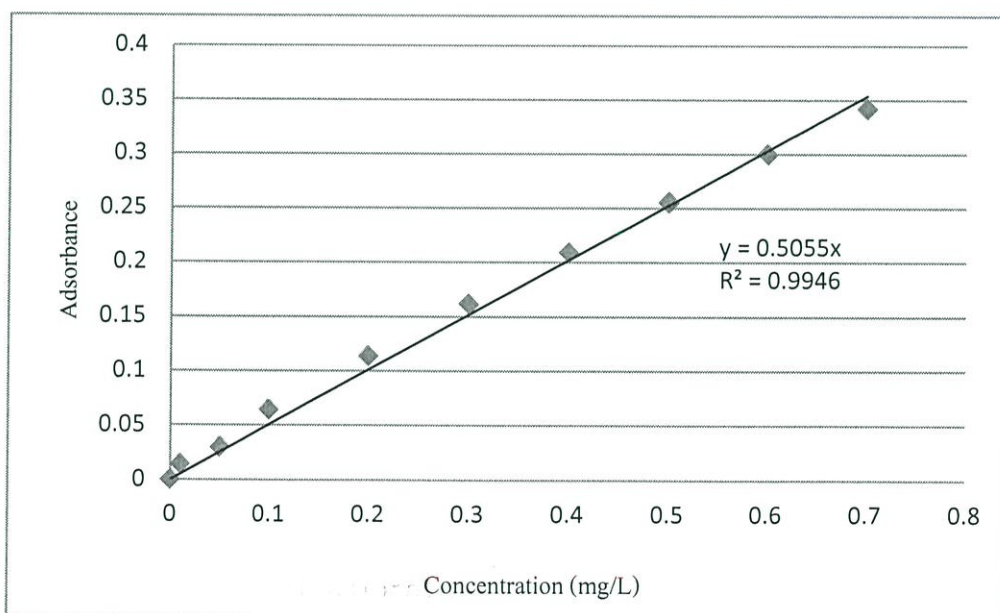
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

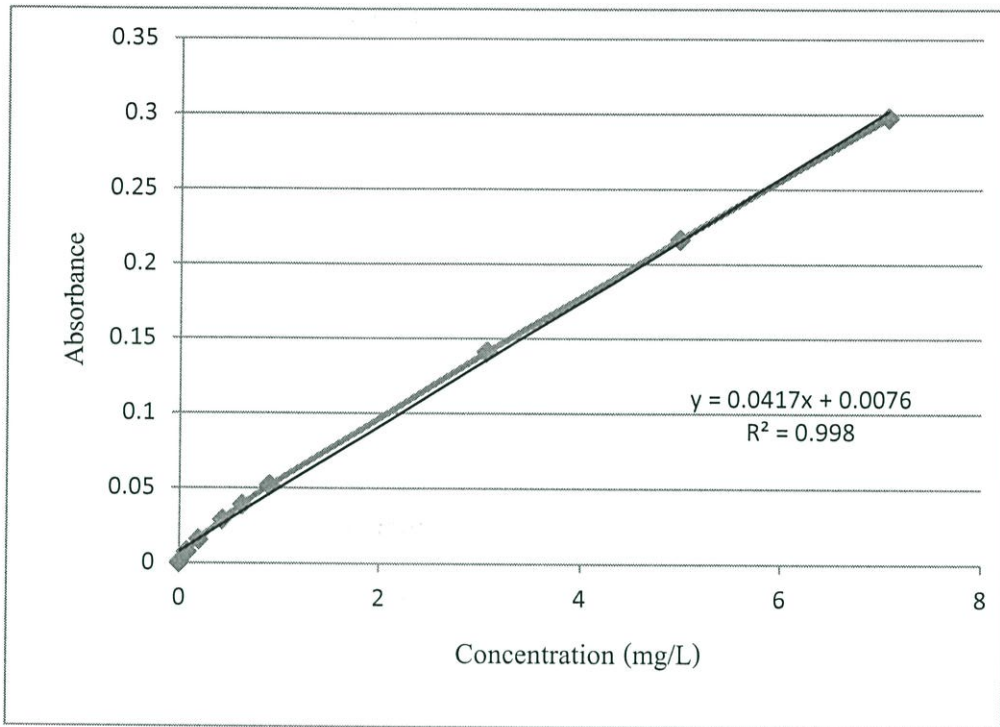
กราฟมาตรฐาน



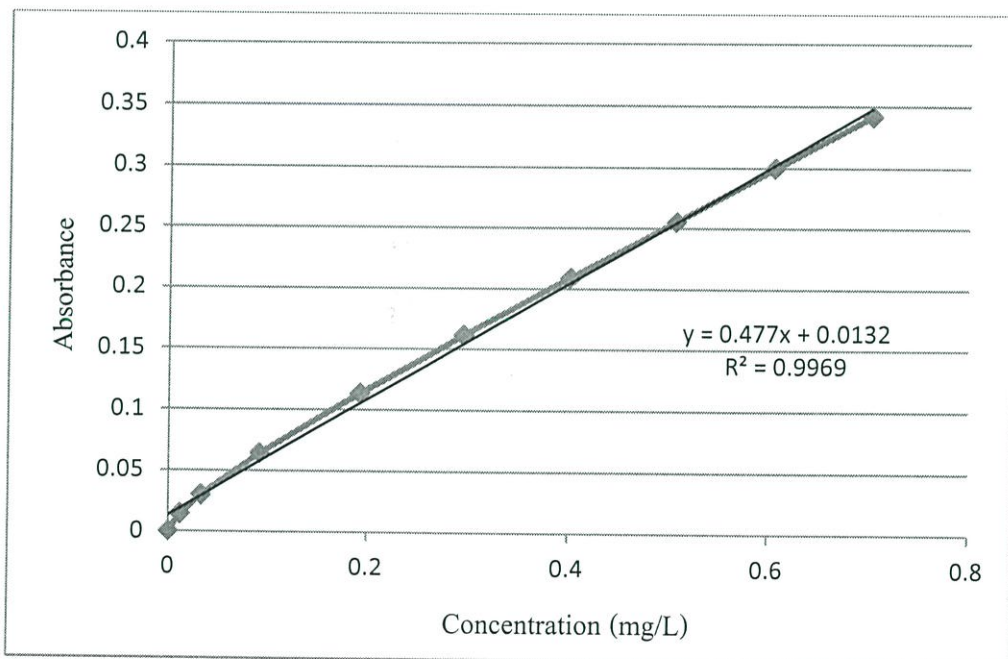
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาค่า pH การดูดซับที่เหมาะสม



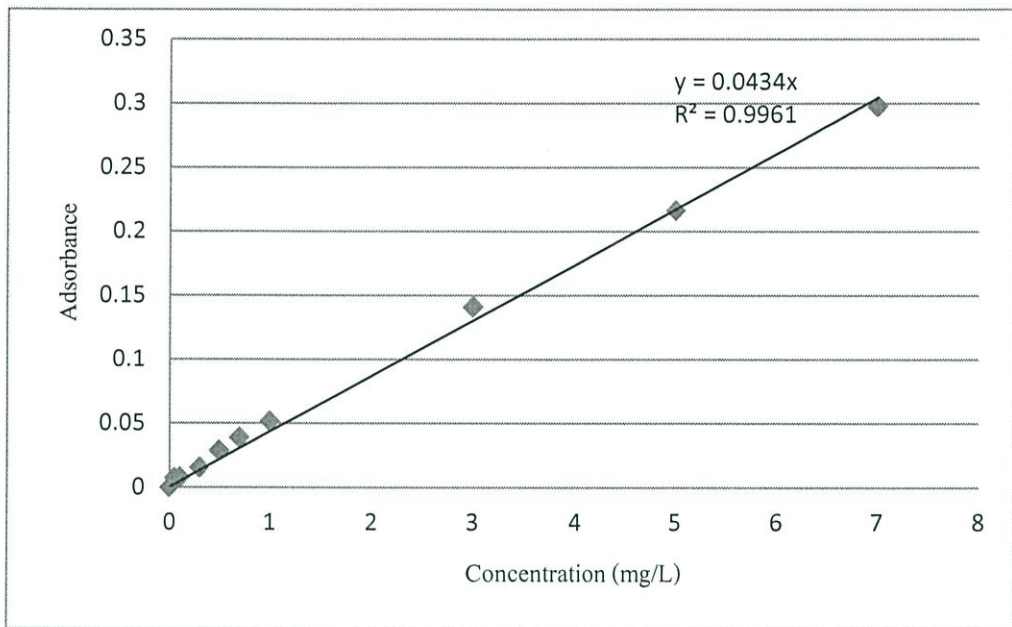
รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาค่า pH การดูดซับที่เหมาะสม



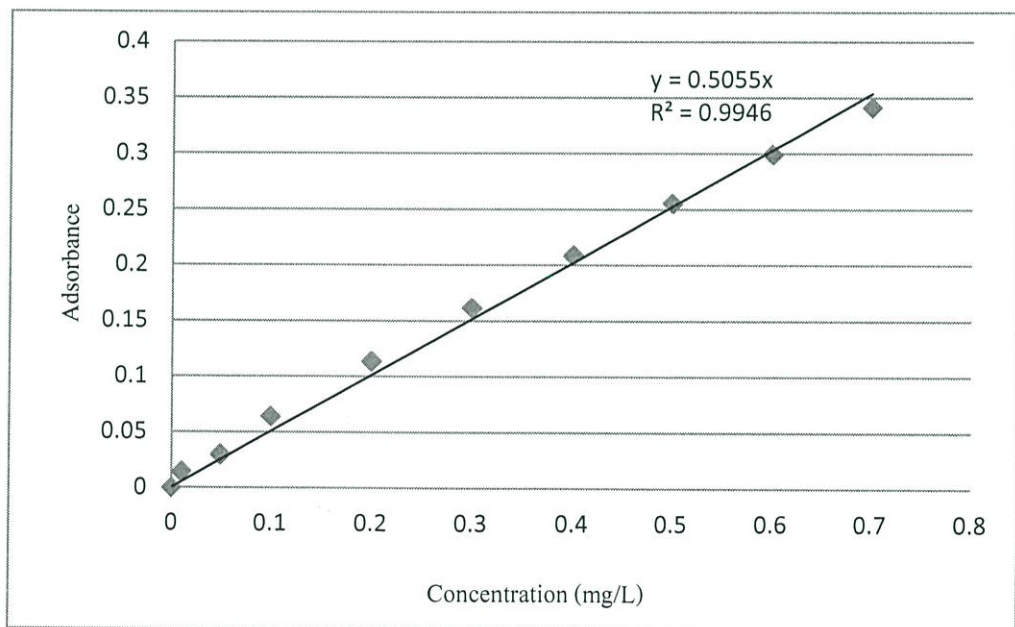
รูปที่ ๓.3 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาค่า pH ต่อการตกตะกอน



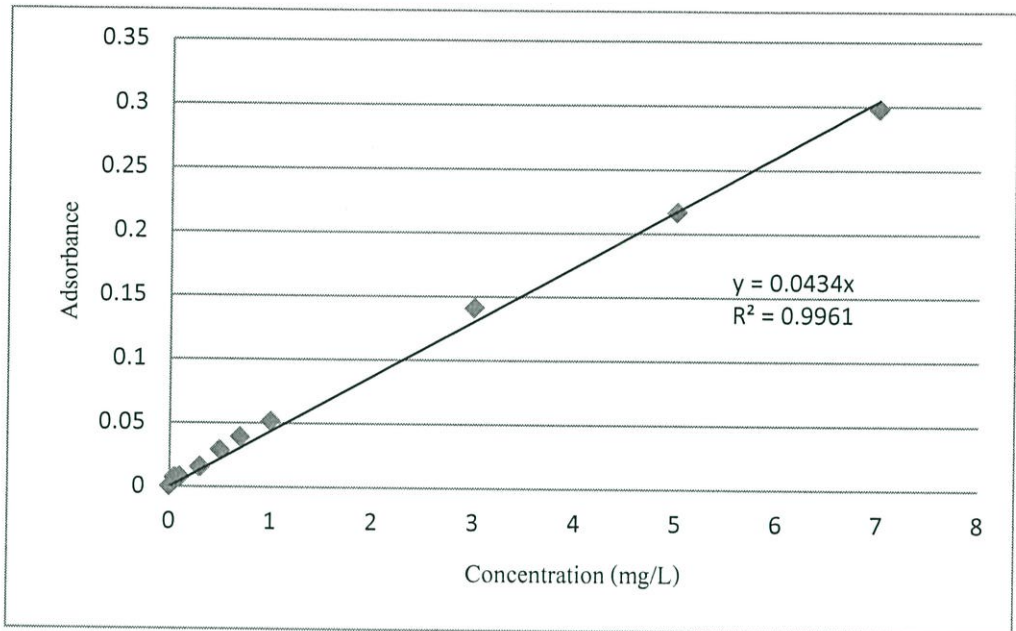
รูปที่ ๓.4 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาค่า pH ต่อการตกตะกอน



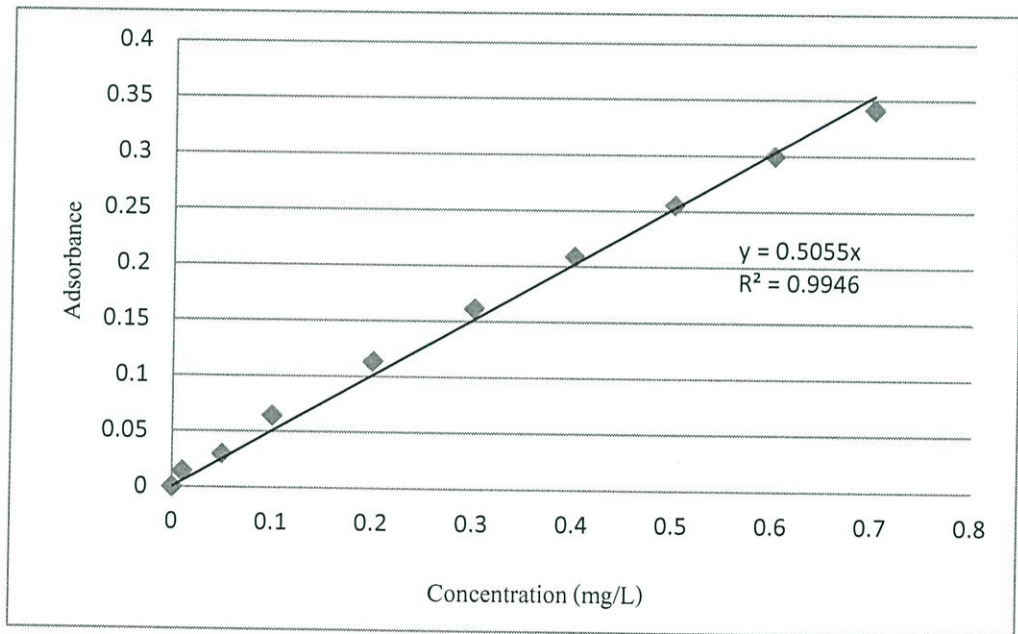
รูปที่ ก.5 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม



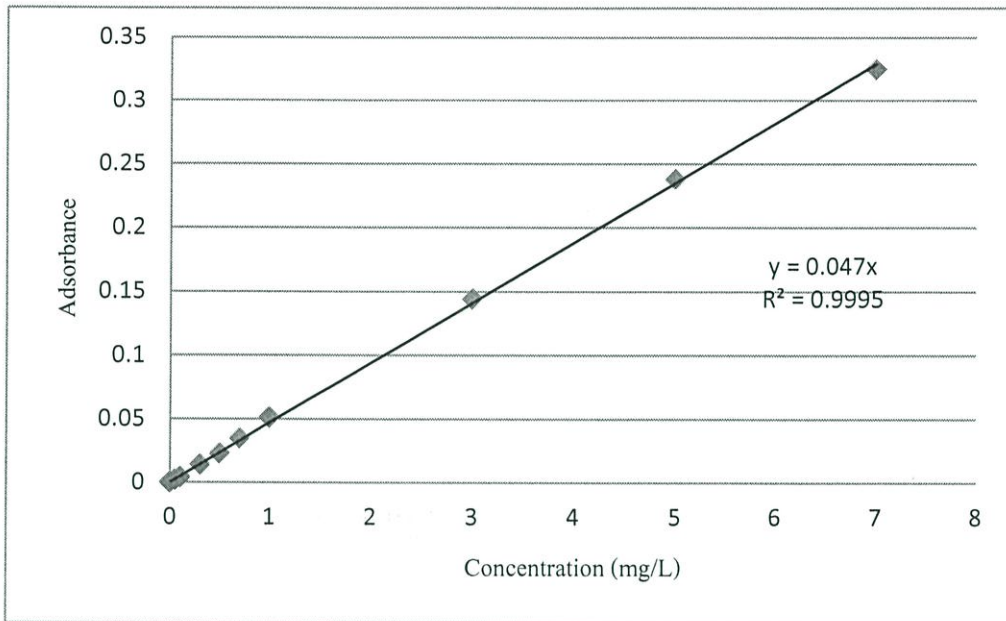
รูปที่ ก.6 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม



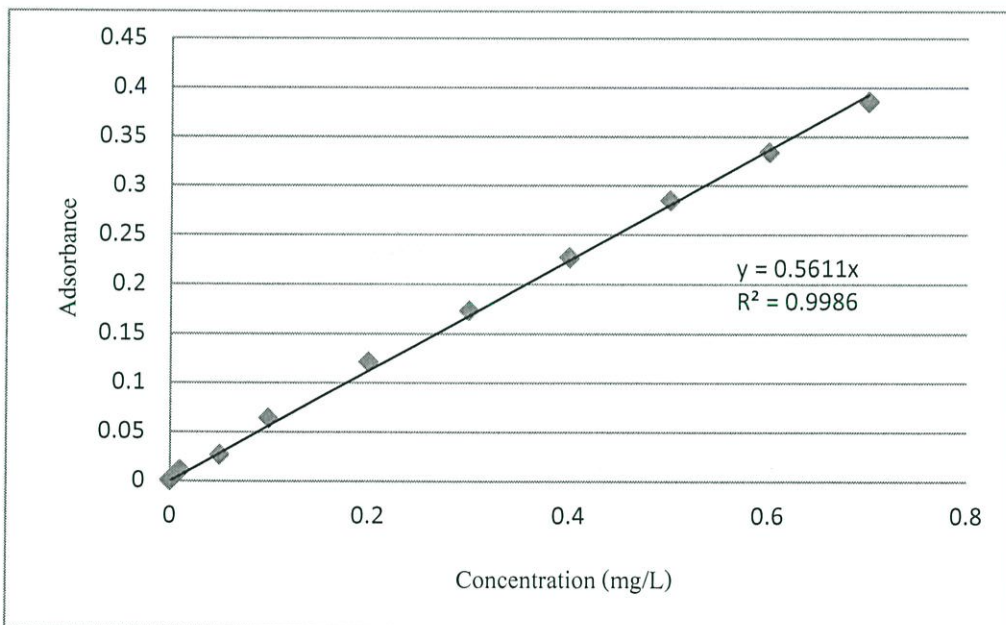
รูปที่ ก.7 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม



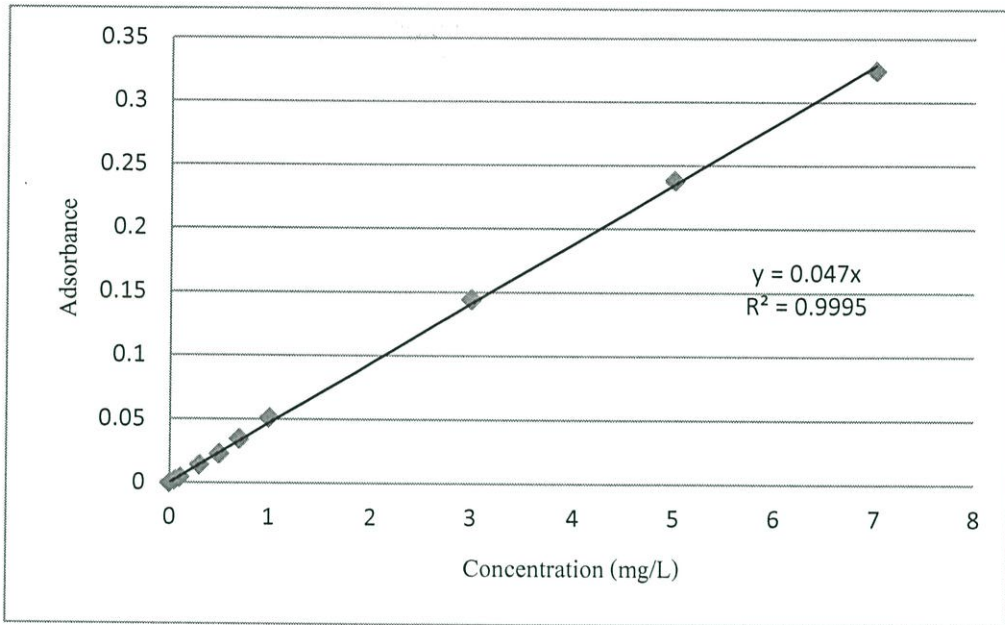
รูปที่ ก.8 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม



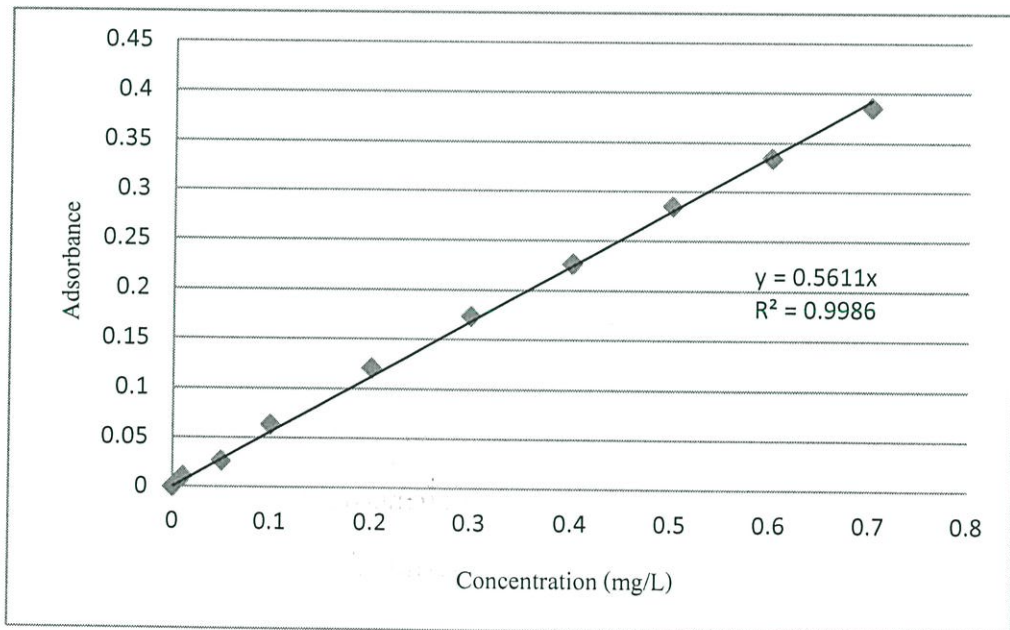
รูปที่ ก.9 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ โดยซีลื้อยที่ผ่านการปรับปรุงและซีลื้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงในสภาวะที่เหมาะสม และศึกษาประสิทธิภาพการคายซับซีลื้อยที่ผ่านการปรับปรุงและซีลื้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง



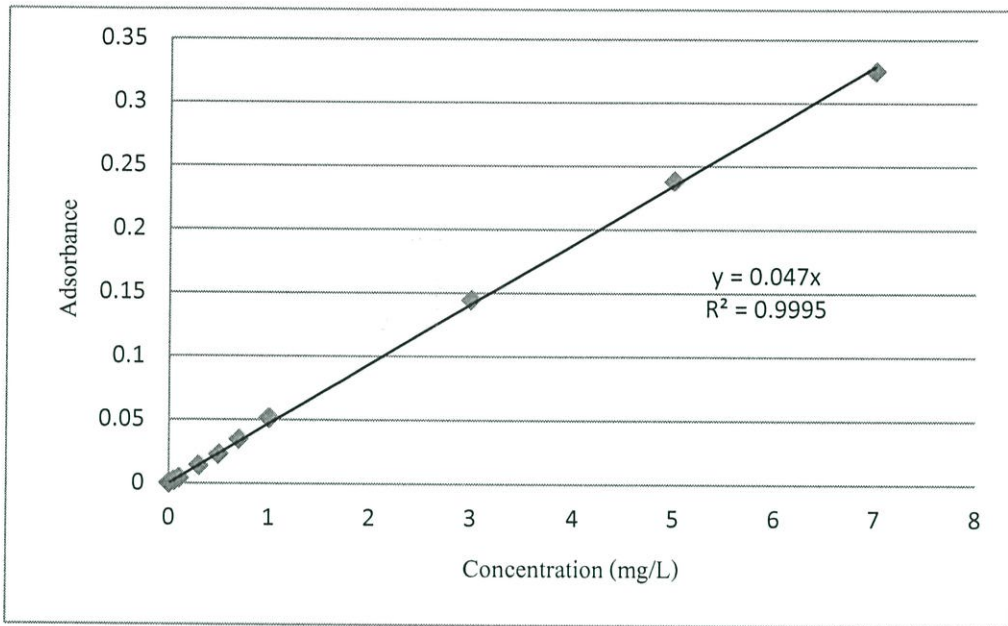
รูปที่ ก.10 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยซีลื้อยที่ผ่านการปรับปรุงและซีลื้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงในสภาวะที่เหมาะสม และศึกษาประสิทธิภาพการคายซับซีลื้อยที่ผ่านการปรับปรุงและซีลื้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง



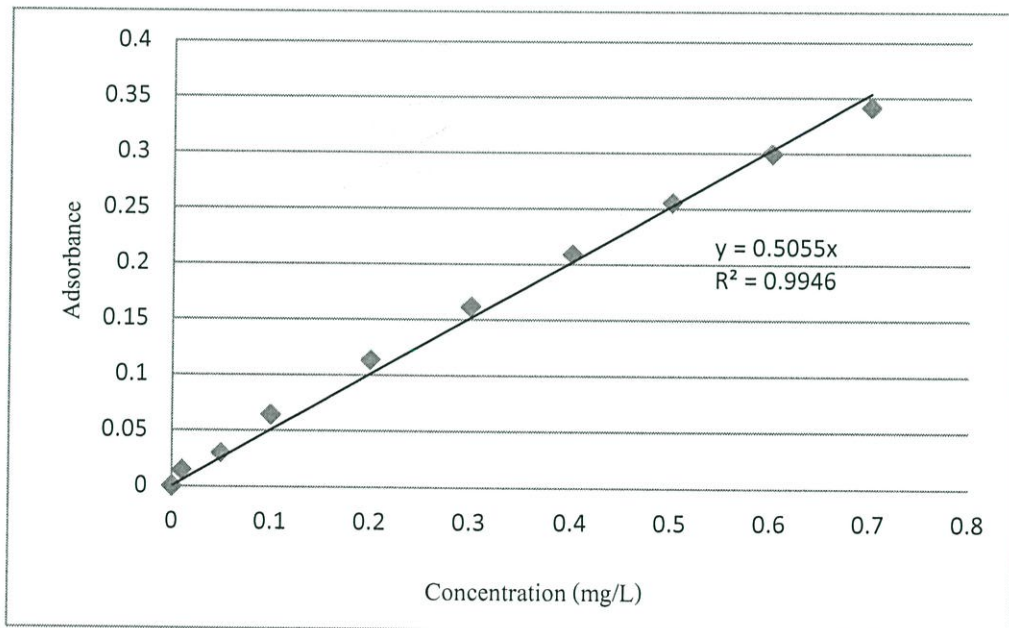
รูปที่ ก.11 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของซีเมนต์ที่ผ่านการปรับปรุงและซีเมนต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง



รูปที่ ก.12 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของซีเมนต์ที่ผ่านการปรับปรุงและซีเมนต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง



รูปที่ ก.13 กราฟมาตรฐานสารละลายตะกั่วที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ



รูปที่ ก.14 กราฟมาตรฐานสารละลายสังกะสีที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ภาคผนวก ข.

ตารางผลการทดลอง

ตาราง ข.1 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลื้อยปรับปรุงที่ pH 3

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.495	0.835	60.3672	0.930411
	2	0.3525	0.9765	71.0818	
	3	0.370	0.96	69.7659	
	เฉลี่ย			70.4239	
สังกะสี	1	0.355	1.0082	69.4655	0.648488
	2	0.925	0.4382	27.6522	
	3	0.9375	0.4257	26.7351	
	เฉลี่ย			27.1937	

ตาราง ข. 2 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลื้อยปรับปรุงที่ pH 4

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.305	1.025	74.3422	0.531037
	2	0.388	0.9425	68.1392	
	3	0.315	1.015	73.5903	
	เฉลี่ย			73.9658	
สังกะสี	1	0.518	0.8457	39.8878	2.074863
	2	0.615	0.7482	32.7355	
	3	0.655	0.7082	29.80125	
	เฉลี่ย			31.2684	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.3 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ pH 5

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.295	1.035	50.1879	0.531603
	2	0.305	1.025	49.4362	
	3	0.338	0.9925	46.9925	
				เฉลี่ย	
สังกะสี	1	0.558	0.8057	42.7304	0.907784
	2	0.575	0.7882	41.4466	
	3	0.595	0.7682	39.9795	
				เฉลี่ย	

ตาราง ข.4 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ pH 6

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.3125	1.0157	46.3347	0.265872
	2	0.3325	0.9975	44.8309	
	3	0.3375	0.9925	44.4547	
				เฉลี่ย	
สังกะสี	1	0.3775	1.2122	50.1578	0.259353
	2	0.3825	1.2102	49.7909	
	3	0.9025	0.4607	11.6454	
				เฉลี่ย	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.5 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลี้อยู่ปรับปรุ้งที่ pH 7

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.37	0.96	11.2782	0.797482
	2	0.33	1.005	14.6617	
	3	0.34	0.99	13.5338	
	เฉลี่ย			14.0978	
สังกะสี	1	0.1650	1.1982	46.0315	0.7781
	2	0.1975	1.1657	43.6474	
	3	0.1500	1.2132	47.1319	
	เฉลี่ย			46.5817	

ตาราง ข.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลี้อยู่ปรับปรุ้งที่ pH 8

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.3525	0.9775	7.1429	0.13294
	2	0.355	0.975	6.9549	
	3	0.325	1.005	9.2107	
	เฉลี่ย			7.0489	
สังกะสี	1	0.0803	1.28295	10.3433	0.10749
	2	0.0825	1.2807	10.1782	
	3	0.0798	1.28345	10.3800	
	เฉลี่ย			10.3005	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.7 ประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 3

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	1.09	0.24	18.0451	0.04122
	2	1.2975	0.0325	2.4436	
	3	1.3625	0.0325	2.3853	
	เฉลี่ย			2.4145	
สังกะสี	1	4.533	0.0618	4.533	0.05685
	2	4.4526	0.0607	4.4526	
	3	8.4873	0.1157	8.4873	
	เฉลี่ย			4.4928	

ตาราง ข.8 ประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 4

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	1.1475 *	0.1825	13.7218	1.462085
	2	1.28	0.05	3.7594	
	3	1.3525	0.0225	1.6917	
	เฉลี่ย			2.72555	
สังกะสี	1	1.205	0.1582	11.6050	3.76061
	2	1.025	0.3382	24.8092	
	3	1.0975	0.2707	19.4909	
	เฉลี่ย			22.15005	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.9 ประสิทธิภาพการตกตะกอน โลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 5

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	1.26	0.07	5.2631	7.443218
	2	1.0325	0.2975	22.3684	
	3	0.8925	0.4375	32.8947	
เฉลี่ย				27.63155	
สังกะสี	1	1.14	0.2232	16.3732	0.3668
	2	1.135	0.2282	16.7400	
	3	1.145	0.2182	16.0064	
เฉลี่ย				16.3732	

ตาราง ข.10 ประสิทธิภาพการตกตะกอน โลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 6

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.8475	0.4825	36.2782	8.639501
	2	1.01	0.32	24.0601	
	3	0.655	0.675	50.7519	
เฉลี่ย				30.16915	
สังกะสี	1	1.1	0.2632	19.3075	4.019973
	2	1.2475	0.1157	8.4874	
	3	1.0225	0.3407	24.9926	
เฉลี่ย				22.15005	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.11 ประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 7

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.555	0.775	58.2707	3.721574
	2	0.4025	0.9275	69.7368	
	3	0.485	0.845	63.5338	
	เฉลี่ย			60.90225	
สังกะสี	1	0.7125	0.6507	47.7332	8.299383
	2	0.8725	0.4907	35.9961	
	3	1.0625	0.3007	22.0584	
	เฉลี่ย			41.86465	

ตาราง ข.12 ประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะของซีลี้อยปรับปรุ้งที่ pH 8

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ตกตะกอน (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.4275	0.9025	67.8571	2.126624
	2	0.4675	0.8625	64.8496	
	3	0.315	1.015	76.3158	
	เฉลี่ย			66.35335	
สังกะสี	1	0.34	1.0232	75.0587	3.760677
	2	0.2575	1.1057	81.1106	
	3	0.185	1.1782	86.4290	
	เฉลี่ย			83.7698	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.13 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 0 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.5875	0.7425	55.8270	0.531674
	2	0.5425	0.7875	59.2105	
	3	0.5525	0.7775	58.4586	
เฉลี่ย				58.83455	
สังกะสี	1	0.5475	0.72	56.8047	2.789324
	2	0.3925	0.875	69.0335	
	3	0.4425	0.825	65.0888	
เฉลี่ย				67.0612	

ตาราง ข.14 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 20 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.44	0.89	66.9173	0.398738
	2	0.3925	0.9375	70.4887	
	3	0.40	0.93	69.9248	
เฉลี่ย				70.20675	
สังกะสี	1	0.36	0.9075	71.5976	4.88137
	2	0.145	1.1225	88.5601	
	3	0.4475	0.82	64.6943	
เฉลี่ย				68.14595	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.15 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 40 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.35	0.98	73.6842	2.658297
	2	0.3	1.03	77.4436	
	3	0.525	0.805	60.5263	
เฉลี่ย				75.5639	
สังกะสี	1	0.19	1.0775	85.0097	2.231417
	2	0.3125	0.955	75.3452	
	3	0.23	1.0375	81.8540	
เฉลี่ย				83.43185	

ตาราง ข.16 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 60 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.3325	0.9975	75.00	0.265801
	2	0.2475	1.0825	81.3909	
	3	0.2575	1.0775	81.0150	
เฉลี่ย				81.20295	
สังกะสี	1	0.261	0.615	48.5207	0.418395
	2	0.074	1.0825	85.4043	
	3	0.071	1.09	85.9960	
เฉลี่ย				85.70015	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.17 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 80 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.2675	1.0625	79.88721	0.287129
	2	0.275	1.055	79.32330	
	3	0.2725	1.0575	79.51127	
เฉลี่ย				79.57393	
สังกะสี	1	0.22	1.0475	82.6429	1.53421
	2	0.1925	1.075	84.8126	
	3	0.285	0.9825	77.5148	
เฉลี่ย				83.72775	

ตาราง ข.18 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ เวลา 100 นาที

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.595	0.735	55.26315	0.26583
	2	0.285	1.045	78.57142	
	3	0.29	1.04	78.19548	
เฉลี่ย				78.38345	
สังกะสี	1	0.2125	1.055	83.2347	0.976302
	2	0.3225	0.945	74.5562	
	3	0.23	1.0375	81.8540	
เฉลี่ย				82.54435	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.19 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย
สังเคราะห์ 50 mg/L

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.046	2.36675	98.0935	0.466595
	2	0.0235	2.38925	99.0260	
	3	0.0355	2.37725	98.5287	
เฉลี่ย				98.5494	
สังกะสี	1	0.1925	1.2488	86.6440	3.311593
	2	0.085	1.3563	94.1025	
	3	0.26	1.1813	81.9607	
เฉลี่ย				84.30235	

ตาราง ข.20 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของขี้เลื่อยปรับปรุงที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย
สังเคราะห์ 100 mg/L

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.071	1.109605	93.9861	0.494975
	2	0.02378	1.156825	97.9841	
	3	0.0155	1.165125	98.6871	
เฉลี่ย				98.3341	
สังกะสี	1	0.62	1.6625	72.8368	0.46464
	2	0.445	1.8375	80.5038	
	3	0.46	1.8225	79.8467	
เฉลี่ย				80.17525	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.21 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของซีลื้อยปรับปรุงที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย
สังเคราะห์ 200 mg/L

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.2425	4.8575	95.2451	1.109168
	2	0.1625	4.9375	96.8137	
	3	0.045	5.055	99.1176	
เฉลี่ย				96.0294	
สังกะสี	1	1.43	3.335	69.9895	1.335583
	2	1.7	3.065	64.3232	
	3	1.52	3.245	68.1007	
เฉลี่ย				69.0451	

ตาราง ข.22 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของซีลื้อยปรับปรุงที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย
สังเคราะห์ 400 mg/L

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.36	9.0158	96.1603	0.075378
	2	0.4825	8.8933	94.8537	
	3	0.4925	8.8833	94.7471	
เฉลี่ย				94.8004	
สังกะสี	1	6.3	6.275	49.9006	1.827517
	2	7.025	5.55	44.1352	
	3	6.7	5.875	46.7197	
เฉลี่ย				45.42745	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.23 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลี้อยปรับปรุงที่ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย
สังเคราะห์ 600 mg/L

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	1.7076	12.1607	87.687	2.39688
	2	2.9675	10.9008	78.6022	
	3	1.2375	12.6308	91.0767	
เฉลี่ย				89.38185	
สังกะสี	1	10.4	0.8125	37.3494	6.92201
	2	12.025	0.8125	27.5602	
	3	7.075	4.1375	57.3795	
เฉลี่ย				32.4548	

ตาราง ข.24 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของซีลี้อยที่ไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.324	0.8785	73.0561	0.135199
	2	0.2213	0.9812	81.5967	
	3	0.219	0.9835	81.7879	
เฉลี่ย				81.6923	
สังกะสี	1	0.7525	0.4375	36.7647	2.971036
	2	0.45	0.74	62.1849	
	3	0.5	0.69	57.9832	
เฉลี่ย				60.08403	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.25 ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะของซีลี้อยู่ปรับปรุง โครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl₂

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ ดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.039	1.1635	96.7568	0.834952
	2	0.0098	1.1927	99.1850	
	3	0.0248	1.1777	97.9376	
เฉลี่ย				97.3472	
สังกะสี	1	0.1775	1.0125	85.0840	0.528687
	2	0.1825	1.0075	84.6638	
	3	0.190	1.0000	84.0336	
เฉลี่ย				84.5938	

ตาราง ข.26 ประสิทธิภาพการคายซับ โลหะของซีลี้อยู่ที่ไม่ปรับปรุง โครงสร้าง

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก คายออกมา (mg/g)	ประสิทธิภาพการ คายซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.901	0.910239	91.0239	4.500452
	2	0.81325	0.821519	82.1589	
	3	0.75025	0.757943	75.7943	
เฉลี่ย				78.9766	
สังกะสี	1	0.395	0.552448	55.24475	1.483439
	2	0.26	0.363636	36.3636	
	3	0.245	0.342657	34.2657	
เฉลี่ย				35.31465	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.27 ประสิทธิภาพการคายชั้นโลหะของซีลี้อยปรับปรุงโครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl₂

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ คายออกมา (mg/g)	ประสิทธิภาพการ คายชั้น (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	1.1595	0.990497	99.04965	5.073951
	2	0.9695	0.82819	82.81900	
	3	0.8855	0.756434	75.64335	
เฉลี่ย				79.2311	
สังกะสี	1	0.7575	0.75000	75.00	0.875172
	2	0.7125	0.705446	70.5445	
	3	0.725	0.717822	71.78218	
เฉลี่ย				71.1633	

ตาราง ข.28 ประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ของซีลี้อยไม่ปรับปรุงโครงสร้าง

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ นำกลับมาใช้ใหม่ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.41175	0.6885	62.57	1.092558
	2	0.4585	0.64175	58.32765	
	3	0.4755	0.62475	56.78254	
เฉลี่ย				57.5551	
สังกะสี	1	0.6275	0.395	38.6308	1.728869
	2	0.805	0.2175	21.27139	
	3	0.78	0.2425	23.71638	
เฉลี่ย				22.49389	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ตาราง ข.29 ประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl₂

ชนิดโลหะ	ครั้งที่	ปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ ได้ในสารละลาย (mg/L)	ปริมาณโลหะที่ถูก ดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการ นำกลับมาใช้ใหม่ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตะกั่ว	1	0.10625	0.994	90.34510	0.718128
	2	0.0905	1.00975	91.7745	
	3	0.09725	1.003	91.1610	
	เฉลี่ย			91.09287	
สังกะสี	1	0.59	0.4325	42.29828	1.383094
	2	0.68	0.3425	33.49633	
	3	0.66	0.3625	35.45232	
	เฉลี่ย			34.47433	

หมายเหตุ ไม่นำมาคำนวณ

ภาคผนวก ค

การคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากผลการทดลองการดูดซับตะกั่ว

สารดูดซับ (mg), W	0	2.37	6.83	12.6	25.67
Pb ²⁺ ที่เหลือในสารละลาย (mg/L), C _e	50	26.31	19.97	11.48	4.32

คำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้สมการ

$$q = V(C_0 - C_e)$$

เมื่อ q = ความเข้มข้นของสารเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mol/kg หรือ mg/kg)

W = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง(kg)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ (L)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลาย (mg/L)

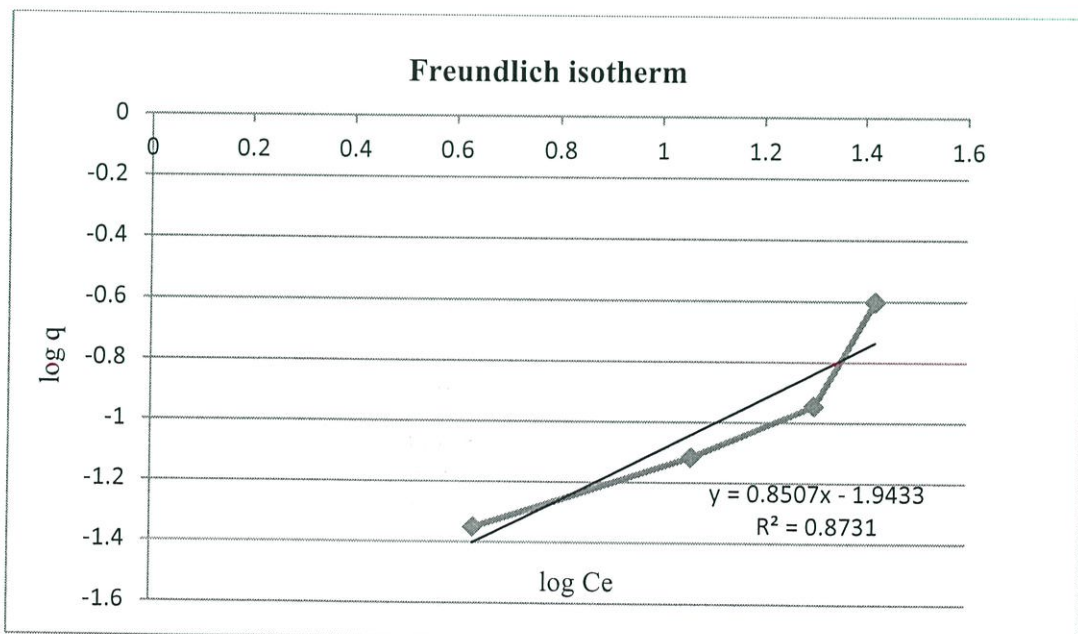
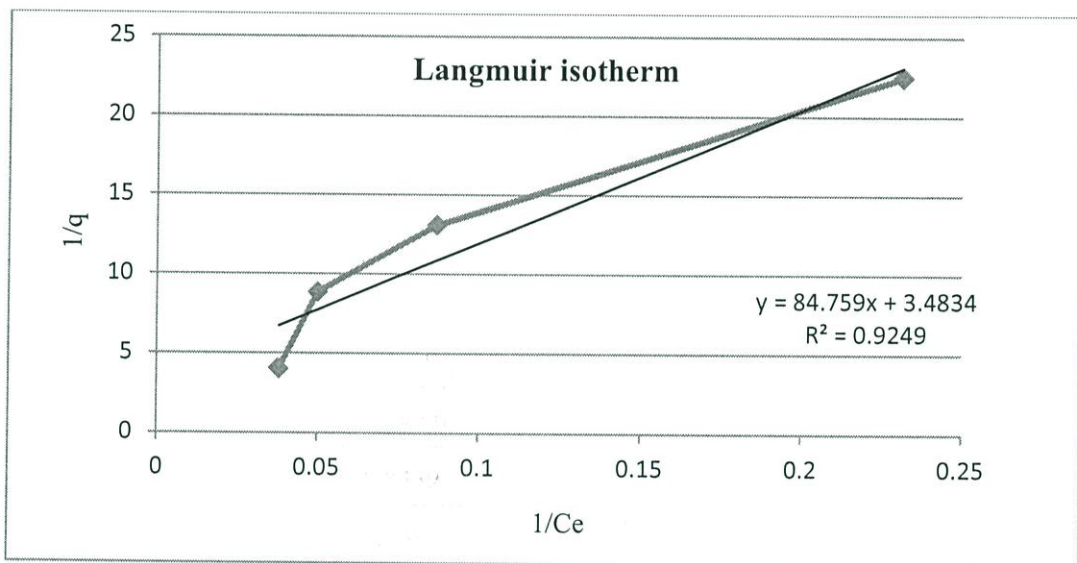
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$q_{2.37 \text{ mg}} = \frac{25 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \left(50 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 26.31 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{2.37 \text{ mg}} = 0.2499 \text{ mg/mg}$$

W (mg)	V (mL)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q
25.67	25	50	4.32	0.0445
12.6	25	50	11.48	0.0764
6.63	25	50	19.97	0.1132
2.37	25	50	26.31	0.2499
0	25	50	-	-

สมการ Langmuir Isotherm		สมการ Freundlich Isotherm	
$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\text{Log } q$
0.2315	22.4719	0.6354	-1.3516
0.0871	13.0890	1.0599	-1.1169
0.0500	8.8339	1.3003	-0.9461
0.0380	4.0016	1.4201	-0.6022



จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองของทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลिनใจความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิช แสดงว่าพฤติกรรมการดูดซับตะกั่วของซีลี้อยสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์

จากผลการทดลองการดูดซับสังกะสี

สารดูดซับ (mg), W	0	2.63	6.23	12.6	25.36
Zn ²⁺ ที่เหลือในสารละลาย (mg/L), C _e	50	38.7	38.2	34.5	28.17

คำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้สมการ

$$q = V(C_0 - C_e)$$

เมื่อ q = ความเข้มข้นของสารเคมีบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mol/kg หรือ mg/kg)

W = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง(kg)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ (L)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลาย (mg/L)

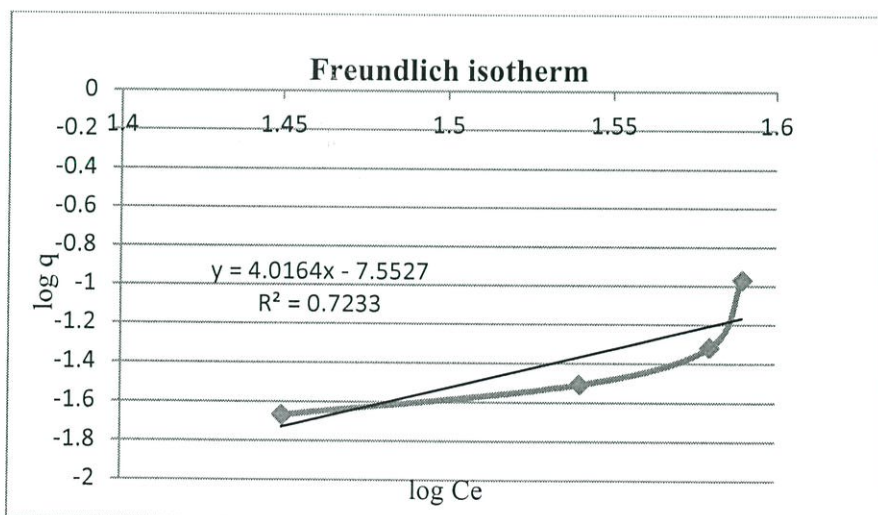
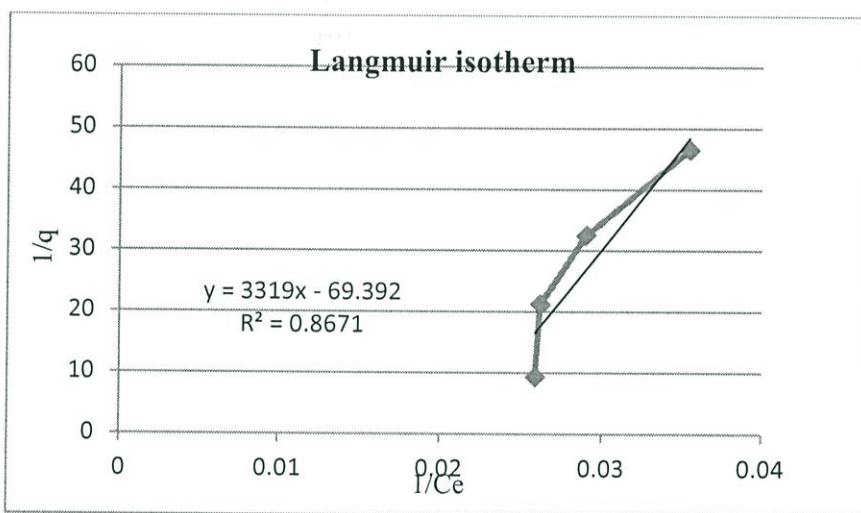
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$q_{2.63 \text{ mg}} = \frac{25 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \left(50 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 38.7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}{2.63 \text{ mg}} = 0.1074 \text{ mg/mg}$$

W (mg)	V (mL)	C ₀ (mg/L)	C _e (mg/L)	q
25.67	25	50	28.17	0.0215
12.6	25	50	34.5	0.0380
6.63	25	50	38.2	0.0473
2.37	25	50	38.7	0.1074
0	25	50	-	-

สมการ Langmuir Isotherm		สมการ Freundlich Isotherm	
$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\text{Log } q$
0.0355	46.51	1.45	-1.67
0.0290	32.47	1.54	-1.51
0.0262	21.14	1.58	-1.32
0.0259	9.31	1.59	-0.97



จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองของทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรอนด์ลิก แสดงว่าพฤติกรรมการดูดซับสั้งกะสีของซีลีเยอสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของแลงเมียร์