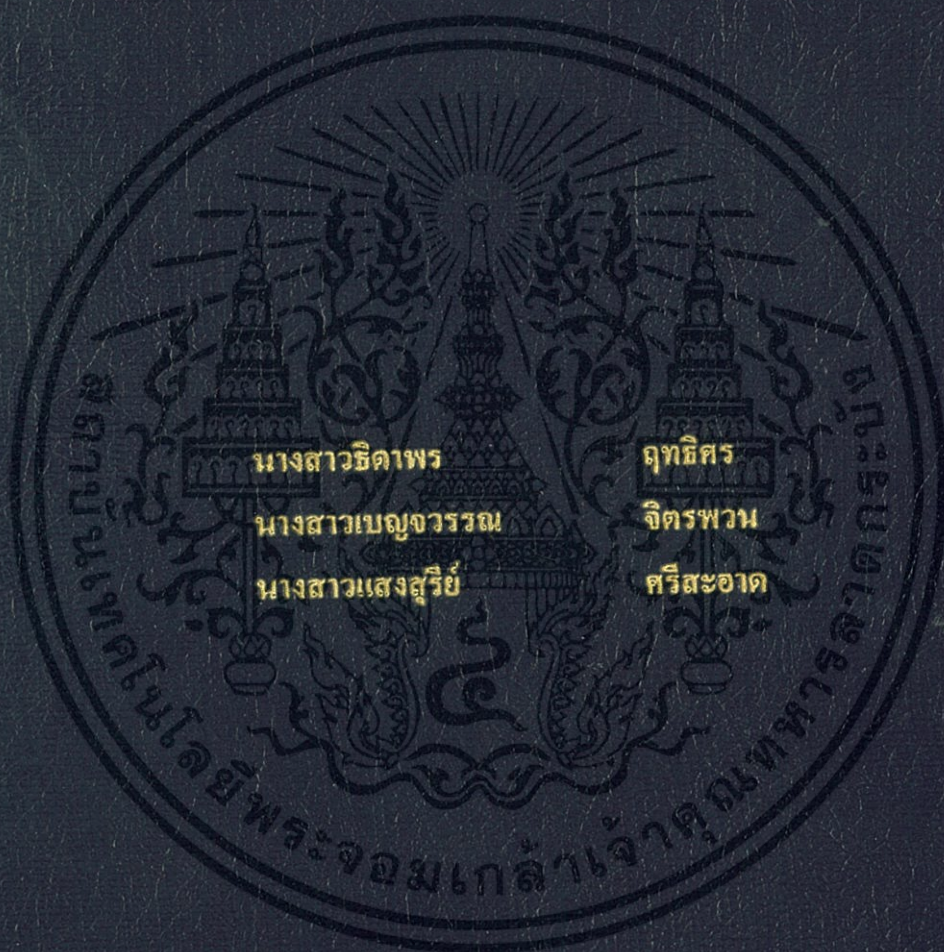


การดูดซับทองแดงโดยใช้ซีดีเอื่อยยูคาลิปตัส
ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์
ADSORPTION OF COPPER USING EUCALYPTUS SAWDUST
MODIFIED WITH SODIUM HYDROXIDE AND CALCIUM CHLORIDE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การดูดซับทองแดงโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัส
ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์

ADSORPTION OF COPPER USING EUCALYPTUS SAWDUST
MODIFIED WITH SODIUM HYDROXIDE AND CALCIUM CHLORIDE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ADSORPTION OF COPPER USING EUCALYPTUS SAWDUST
MODIFIED WITH SODIUM HYDROXIDE AND CALCIUM CHLORIDE**



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับทองแดงโดยใช้เชื้อถ้อยยูคาลิปตัส
ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์
Adsorption of Copper Using Eucalyptus Sawdust Modified with NaOH and CaCl₂

ชื่อนักศึกษา นางสาวธิดาพร ฤทธิสร
นางสาวเบญจวรรณ จิตรพวน
นางสาวแสงสุรีย์ ศรีสะอาด

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ. กิ่งนุสนธ์ สุวรรณรัตน์	
อ. ปัทมา ลีพหาวงศ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับทองแดง โดยใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัส ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธิดาพร	ฤทธิศร
	นางสาวเบญจวรรณ	จิตรพวน
	นางสาวแสงสุรีย์	ศรีสะอาด
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้นำขี้เถ้ายูคาลิปตัสซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดลองศึกษาการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ นำมาปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) เข้มข้น 1.5 โมลาร์ การศึกษาทั้งหมดอยู่ในสภาวะแบบกะ โดยปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ระยะเวลาการสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของทองแดง

จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงโดยใช้ขี้เถ้า และขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุง คือ พีเอช 5 ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของขี้เถ้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงขึ้น และถ้าความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง สำหรับความสามารถในการดูดซับสูงสุดของขี้เถ้าและขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุง เท่ากับร้อยละ 47.70 และ 78.04 ตามลำดับ เมื่อศึกษาการคายซับพบว่าประสิทธิภาพการคายซับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 41.40 และ 65.13 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับหนักทองแดงโดยใช้ขี้เถ้าสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช

คำสำคัญ : การดูดซับ ทองแดง ขี้เถ้า และการปรับสภาพขี้เถ้า

Special Project Title	Adsorption of Copper Using Eucalyptus Sawdust Modified with NaOH and CaCl_2
Name	Miss Tidaporn Rittisorn Miss Benjawan Jitpuan Miss Sangsuree Srisa-ard
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Asst.Prof.Dr. ChompoonutChaiyaraksa

Abstract

This special project investigated the adsorption of copper in synthetic wastewater using eucalyptus sawdust, a by product of industry, It was chemically modified with sodium hydroxide (NaOH 0.5 M) and calcium chloride (CaCl_2 1.5 M), All experiments were carried in the batch technique. The adsorption factors were pH, contact time, weight of biosorbent and concentration of metal ion.

The results indicated that the optimal condition of pH 5, and 60 minutes contact time. When the amount of eucalyptus sawdust was increased, the effectiveness of adsorption was increased. Whereas when the concentration of heavy metal in wastewater increased, the effectiveness was decreased. By using the optimum condition, the adsorption capacity of eucalyptus sawdust and modified eucalyptus sawdust was 47.70% and 78.04%, respectively. The desorption efficiency of unmodified and modified sawdust was 41.40% and 65.13% respectively. Freundlich adsorption equation was best to explain the adsorption isotherm of this modified sawdust.

Keyword: Adsorption, Copper, Sawdust and Modification of Sawdust

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ สืบเนื่องจากความช่วยเหลือและความกรุณาของทุกๆ ท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่กรุณาติดตามตรวจสอบดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด และให้คำปรึกษาตลอดเวลาติชมจนผลงานสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ และอาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษนี้ ทั้งแม่บ้านภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านอย่างเต็มที่

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ และเป็นกำลังใจตลอดจนให้ผลสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆ ในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณทุกท่าน และถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกๆ ท่าน ที่ให้ความกรุณา ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด ขอขอบคุณพระคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

ธิดาพร	ฤทธิศร
เบญจวรรณ	จิตรพวน
แสงสุรีย์	ศรีสะอาด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 โลหะหนัก	3
2.2 วิธีการจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	5
2.3 กระบวนการดูดซับ	7
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไม้	13
2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา	17
2.6 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 วิธีการทดลอง	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	30
4.1 ศึกษาสภาวะในการดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง โดยใช้ขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี	30
4.2 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ	32
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้าง ด้วยสารเคมีและขี้เลื่อยที่ไม่ได้ปรับปรุง	33
4.4 ศึกษาประสิทธิภาพการนำขี้เลื่อยที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแข็งที่ผ่านการปรับปรุง	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก	43
ภาคผนวก ข	46
ภาคผนวก ค	49
ภาคผนวก ง	63
ภาคผนวก จ	66



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม

36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Reverse Osmosis	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{x}{m}$ และ C_c โดยอาศัยสมการการดูดซับแลงเมียร์	10
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{x/m}$ และ C_c โดยอาศัยสมการการดูดซับแลงเมียร์	11
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_c$ และ $\log C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ mX ฟรุนดิช	12
2.5 สารประกอบต่างๆของเนื้อไม้	13
2.6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	13
2.7 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	14
2.8 สูตรโครงสร้างของส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส	14
2.9 สูตรโครงสร้างของ monomer ของลิกนิน	15
2.10 สูตรโครงสร้างของลิกนิน	16
2.11 ส่วนประกอบต้นยูคาลิปตัส	17
2.12 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน	19
2.13 ส่วนประกอบของเครื่อง AAS	20
4.1 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cu^{2+}	30
4.2 อิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cu^{2+}	31
4.3 ผลการใช้ขี้เถ้าในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	32
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างขี้เถ้าที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ $CaCl_2$ และขี้เถ้าที่ไม่ปรับปรุง	33
4.5 โครงสร้างโมเลกุลของเพคติน	33
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการคายชั้นระหว่างขี้เถ้าที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ $CaCl_2$ และขี้เถ้าที่ไม่ปรับปรุง	34
4.7 ผลการใช้ขี้เถ้าในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่น้ำหนักขี้เถ้าต่างๆ	35
4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของขี้เถ้าแบบ Langmuir Isotherm	36
4.9 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของขี้เถ้าแบบ Freundlich Isotherm	36

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมนุษย์ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกซึ่งของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะก่อให้เกิดปัญหาในระบบสิ่งแวดล้อม ทั้งดิน น้ำ และอากาศ โลหะหนัก นับเป็นสารพิษชนิดหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ การปนเปื้อนของ โลหะหนักปนเปื้อนในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำนั้น กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณโลหะหนักมากจะเกิดเป็นพิษเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้ามีน้อยก็จะทำให้เกิดเป็นพิษเรื้อรัง หรือพิษสะสมในสิ่งแวดล้อม เช่น สะสมในสัตว์น้ำและสะสมในพืช เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์และพืชเป็นอาหารทำให้เกิดการสะสมในร่างกายซึ่งก่อให้เกิดอันตรายได้ สารประกอบทองแดง Cu (II) เป็นสารตั้งต้นการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการถลุงแร่ทองแดง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวมีสารประกอบทองแดงปนเปื้อนอยู่ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีค่ามากกว่าที่กรมควบคุมมลพิษ กำหนดไว้ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นของทองแดงที่ปล่อยออกจากน้ำทิ้งของโรงงาน ตั้งแต่ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวันขึ้นไป ต้องมีปริมาณของทองแดงในน้ำทิ้งไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

วิธีการบำบัดโลหะหนักมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ การแยกกรองด้วยไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี โดยทั่วไปวิธีดังกล่าวมานี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีการใช้วิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้ชีวมวลธรรมชาติในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัด อีกทั้งโลหะหนักที่ถูกดูดซับและสารดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในระบบได้ (<http://www.siweb.dss.go.th>) ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกใช้วิธีการดูดซับมาบำบัดการปนเปื้อนของทองแดง โดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้ยูคาลิปตัสเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากขี้เลื่อยมีราคาถูก อีกทั้งยังมีส่วนประกอบของ lignocellulosic ซึ่งประกอบด้วย cellulose lignin และ pectin ทั้งหมดนี้สามารถจับกับโลหะที่มีประจุบวก โดยที่ lignin มี methyl ester ประกอบอยู่แต่ methyl ester ไม่สามารถไปจับกับไอออนของโลหะได้ จึงต้องนำขี้เลื่อยไปปรับปรุงด้วย NaOH ซึ่ง NaOH จะไปทำปฏิกิริยากับ methyl ester ทำให้จำนวนลิแกนด์ของ carboxylate เพิ่มขึ้น จึงสามารถจับกับไอออนของโลหะได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำขี้เลื่อยมาปรับปรุงด้วย CaCl₂ จะไปลดการละลายของ pectin acid ทำให้ pectin acid ตกตะกอน มีผลให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้น (Ning-chuan, 2009) นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม ในการดูดซับทองแดงเพื่อให้การบำบัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของซีลีเยอที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีแล้ว
2. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของทองแดงที่มีต่อการดูดซับ
3. เปรียบเทียบการดูดซับระหว่างซีลีเยอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงกับซีลีเยอที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี
4. ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลีเยอที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่
5. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของซีลีเยอที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ความเป็นกรดต่างโดยใช้ pH ที่ 2 3 4 5 6 และ 7 ระยะเวลาในการดูดซับ โดยใช้เวลาที่ 0 20 40 50 80 100 และ 120 นาที

2. ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับซึ่งมีความเข้มข้นที่ 0 50 100 200 400 และ 600 mg/L ในสภาวะที่มี pH และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด

3. เปรียบเทียบผลของการดูดซับโลหะทองแดงระหว่างซีลีเยอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์

4. ทำการคายซับของซีลีเยอที่ผ่านการดูดซับในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ไฮโดรคลอริกในการคายซับและนำไปดูดซับอีกครั้งในสภาวะที่เหมาะสม

5. ศึกษาผลของปริมาณของซีลีเยอที่มีผลต่อการดูดซับโลหะทองแดง โดยใช้น้ำหนักที่ 2.50 6.25 12.50 และ 25 mg ในสภาวะที่มี pH และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด และศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำของเสียที่มีอยู่โดยทั่วไปในท้องถิ่นกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา น้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดงได้โดยใช้วัสดุจากธรรมชาติ
3. สามารถนำมาเป็นแนวทางในการนำของเสียมาปรับปรุงให้มีคุณภาพมากขึ้น
4. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและเป็นแนวทางในการไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 โลหะหนัก (พรพรรณ, 2549)

โลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไปและส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก โครเมียม ทังสแตน แคลเดียม โปรท บิสมัท พลวง ไททาเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิเกิล แมงกานีส โมลิบดีนัม และเบอรัมเนียม ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุอันตรายที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรมเราใช้โลหะหนักในการผลิตพลาสติก พีวีซี สี ถ่านไฟฉาย สำหรับทางด้านการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาอุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอางน้ำที่มาจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ

2.1.1 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะทรานสิชันที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 29 มีจุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 8.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็ง ความเหนียว และมีความมันวาว เลขออกซิเดชันของทองแดงในสารประกอบที่เสถียรคือ +1 และ +2 ในขณะที่เลขออกซิเดชัน +3 และ +4 พบน้อยมาก ทองแดงสามารถเกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนที่ 300 องศาเซลเซียส เกิดเป็นคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะได้คอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยากับธาตุฮาโลเจนเกิดเป็นคอปเปอร์ (II) เฮไลด์ ยกเว้นคอปเปอร์ (I) ไอโอไดด์เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเกลือเข้มข้นที่เดือดจะให้แก๊สไฮโดรเจน แต่ทองแดงจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำและไอของน้ำ

ทองแดงเกิดตามธรรมชาติในรูปของซัลไฟด์และออกไซด์ โลหะทองแดงส่วนใหญ่ได้จากการถลุงแร่คอปเปอร์ไพไรต์ (Copper pyrite) หรือคาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite $CuFeS_2$) ที่ทำเป็นผงแล้ว ทำให้ได้เนื้อแร่จำนวนมากทองแดงที่บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.95 ทำได้จากวิธีอิเล็กโทรไลซิสคือ ใช้ทองแดงที่ไม่บริสุทธิ์เป็นขั้วบวกและทองแดงที่บริสุทธิ์เป็นขั้วลบ ในอิเล็กโทรไลติกเซลล์และใช้สารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (Copper (II) Sulphate) เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ทองแดงบริสุทธิ์จะเคลื่อนย้ายจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ

ทองแดงสามารถพบในสภาพแวดล้อมได้จากการทำเหมืองทองแดงหรือโลหะอื่น และจากโรงงานที่ผลิตโลหะทองแดงและสารประกอบทองแดงหรืออาจจะพบได้จากน้ำเสีย จากแหล่งชุมชน การเผาไหม้ น้ำมัน การผลิตปุ๋ยฟอสเฟต และตามภูเขาไฟ ทองแดงที่พบในดินมาก สามารถที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และแร่ได้ ทางการเกษตรนิยมใช้รักษาโรคเชื้อราที่เกิดบน ต้นไม้ ใช้บำบัดน้ำและเป็นสารกันเน่าเสียของผลิตภัณฑ์จากไม้ เครื่องหนัง และผ้า

ทองแดงสามารถละลายในน้ำและเกิดเป็นอนุภาคแขวนลอยในน้ำทันที แต่จะไม่พบใน น้ำบาดาล ทองแดงที่ฟุ้งกระจายเป็นอนุภาคสามารถกลับคืนมาได้โดยติดมากับน้ำฝนและแรงโน้มถ่วงของโลก ทองแดงสามารถพบได้ในอากาศที่ไร้หายใจ น้ำดื่ม อาหาร ดิน หรือสารที่มีทองแดง ผสมอยู่ การอยู่ใกล้กับผลิตภัณฑ์โลหะผสมของทองแดงจะทำให้ได้รับทองแดงมากขึ้นหรือ การหายใจเอาฝุ่นที่มีทองแดงหรือการสัมผัสกับทองแดงในเหมือง ทองแดงสามารถทำอันตราย กับร่างกายได้โดยทางอาหาร ถ้าได้รับในปริมาณสูงหรือการอยู่ในที่มีฝุ่นที่มีทองแดงเป็นเวลานาน อาจจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อจมูก ปาก และตา หรือเกิดอาการเวียนศีรษะ หัวหมุน คลื่นไส้ และท้องร่วงได้

สถาบัน United States Environmental Protection Agency (EPA) รายงานว่าทองแดงไม่เป็น สารก่อมะเร็งในมนุษย์ แต่ในเด็กที่ได้รับทองแดงเข้าไปจะมีอาการมากกว่าในผู้ใหญ่และไม่ทราบว่ ทองแดงมีผลต่อการเจริญเติบโตในมนุษย์หรือเป็นสาเหตุของเด็กที่เกิดมาและบกพร่อง แต่มีการศึกษาในสัตว์ทดลองว่าการได้รับทองแดงในปริมาณสูงจะทำให้มีผลต่ออัตราการเจริญ ต่อตัวอ่อนที่ยังไม่เกิดออกมา สถาบัน EPA แนะนำว่าน้ำดื่มไม่ควรมีทองแดงเกิน 1.3 ppm

สถาบัน Occupation Safety and Health Administration (OSHA) แนะนำผู้ที่ทำงานเกี่ยวกับ ทองแดงไม่ควรได้รับเกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผู้ที่ทำงานที่มีฝุ่นทองแดงไม่ควรได้รับเกิน 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใน 8 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

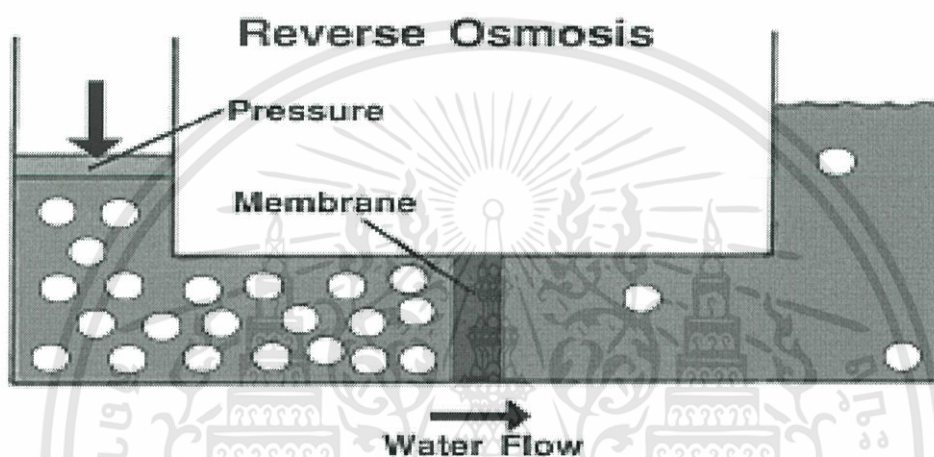
สถาบัน Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine (FNB) แนะนำว่าเด็ก อายุ 1 ถึง 3 ปี ไม่ควรได้รับเกิน 340 ไมโครกรัมต่อวัน เด็กอายุ 4 ถึง 8 ปี ไม่ควรได้รับเกิน 440 ไมโครกรัมต่อวัน เด็กอายุ 9 ถึง 13 ปี ไม่ควรได้รับเกิน 700 ไมโครกรัมต่อวัน เด็กอายุ 14 ถึง 18 ปี ไม่ควรได้รับเกิน 890 ไมโครกรัมต่อวันและในผู้ใหญ่ไม่ควรได้รับเกิน 900 ไมโครกรัมต่อวัน

2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (<http://archive.lib.cmu.ac.th>)

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธีการพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสม ได้แก่ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังการบำบัด ค่าใช้จ่ายใน การบำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis)

เป็นการกรองด้วยเยื่อ (Membrane filtration) แบบหนึ่งโดยการให้ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่จากจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าผ่านเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semi permeable membrane) ไปยังสารละลายที่เจือจางกว่า ซึ่งเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับของกระบวนการออสโมซิส (osmosis) ตามธรรมชาติ ซึ่งโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อจากความเข้มข้นน้อยกว่าไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 Reverse Osmosis

ที่มา: <http://archive.lib.cmu.ac.th>

2.2.2 การระเหย (Evaporation)

ใช้การระเหยนํ้าออกทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่ความดันบรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) นํ้าเสียต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับนํ้าที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงสามารถนำไปใช้งานร่วมกับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งมีต้นทุนการดำเนินการสูง

2.2.3 การแยกด้วยไฟฟ้าเยื่อกรอง (Electro dialysis)

วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและนํ้าเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีการนี้มีต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดขนาดของไอออนที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง วิธีนี้ไม่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากสารละลายที่เจือจางทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักระหว่าง 10 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.5 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันกระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของต่างๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลาย โดยวิธีเติมสารเคมีให้ผสมกับน้ำเสียอย่างทั่วถึง ซึ่งการตกตะกอนด้วยวิธีเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์

2.2.6 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ionexchange)

กระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินไม่เท่ากัน ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายโดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมาจากธรรมชาติสังเคราะห์ขึ้นจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งอยู่ในสารละลายเหมาะสำหรับกำจัดโลหะที่มีปริมาณน้อยและต้องการประสิทธิภาพสูง

2.2.7 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิว ดังสมการ (1) เมื่อความตึงผิว (surface tension) หรือพื้นที่ผิว (surface area) เปลี่ยนไปจะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ($\Delta G_{\text{surface}}$)

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{surface}} &= \gamma A \quad \dots\dots\dots (1) \\ \text{เมื่อ } \Delta G_{\text{surface}} &= \text{พลังงานอิสระที่ผิว} \\ \gamma &= \text{ความตึงผิว} \\ A &= \text{พื้นที่ผิว} \end{aligned}$$

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (Interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน หรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

2.3 กระบวนการดูดซับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2542)

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก ซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้ เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะคือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบก๊าซ-ของแข็ง ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid - Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอย ก็จะถูกกำจัด ออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายใน โพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเท โมเลกุลจากน้ำไปหา ตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อย เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มี พลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับ ของกระบวนการได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับ สามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของ โมเลกุลสาร ถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของ โมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็น สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัว ถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิด การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือ กลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ (Size and Surface Area)

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่สารภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2) ลักษณะของการดูดซับ (Nature of Adsorption)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผันกับอัตราการดูดซับ

3) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับจะเกิดขึ้นได้สูงสุดที่ค่าพีเอชหนึ่งที่เหมาะสม ส่วนสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากในสารละลายมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูง (H^+) ซึ่งไฮโดรเจนไอออนจะเข้าไปแทรกแซงระหว่างบริเวณที่เกิดการดูดซับของสารละลายไอออนโลหะ นอกจากนั้นที่ค่าพีเอชของสารละลายต่ำๆ จะทำให้บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกลายเป็นประจุบวก ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการดูดซับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกเหมือนกัน เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชเหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากจะเกิดการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของสารประกอบหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-)

4) ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ช่วงเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ

5) อัตราการเร่งการปั่นกววน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของสารดูดซับ

2.3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ดูดซับกับความดันของแก๊สที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ ส่วนกรณีการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลายอาจคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{(C_0 - C_1)V}{m} \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ	a	=	เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับ
	C ₀	=	เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ
	C ₁	=	เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกดูดซับ
	V	=	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
	m	=	เป็นมวลของตัวดูดซับ

หากพิจารณาที่สถานะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \dots \dots \dots (3)$$

เมื่อ	q _e	=	เป็นจำนวน โมลของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล
	C _e	=	เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สถานะสมดุล

2.3.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดยเออร์วิงแลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) มีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งที่แน่นอน (Adsorption site) โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ได้เพียงหนึ่ง โมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ไม่มีมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ q_e = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ หนัก 1 กรัม

x = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ

m = เป็นปริมาณตัวดูดซับ

C_e = เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

Q_0 = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

b = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่างและ C_e จะได้ดังรูปที่ (2.2)



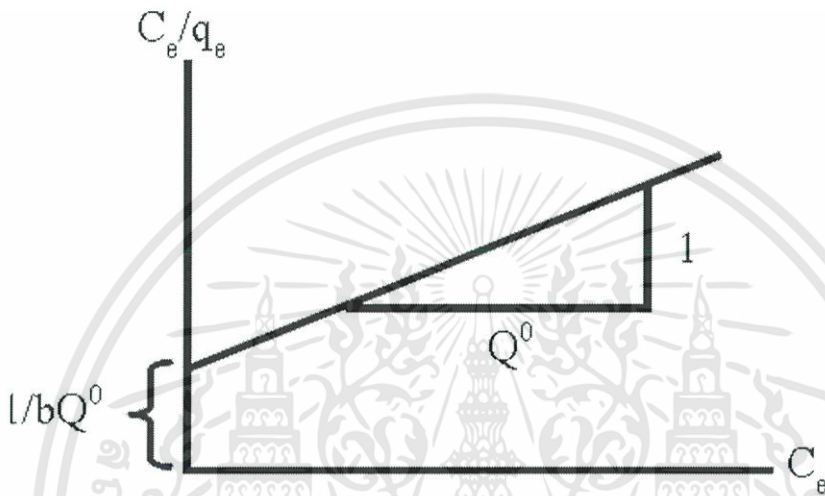
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{x}{m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi(1987)

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \dots \dots \dots (5)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{bQ^0}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์
ที่มา: Cheremisinoff and Morresi (1987)

2.3.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดยฟินเลย์ฟรุนดิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของสมการฟรอยด์ลิช คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของฟรอนดิชที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

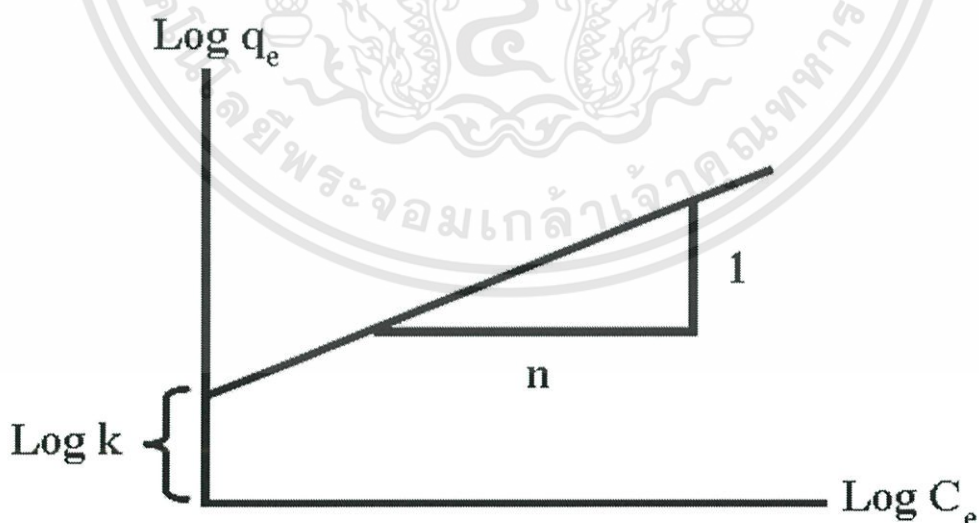
$$q_e = \frac{X}{m} = kC_e^{1/n} \dots\dots\dots(6)$$

- เมื่อ q_e = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
 X = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
 m = เป็นปริมาณตัวดูดซับ
 C_e = เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 k = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
 n = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอนดิช เมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า k ได้และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารถหาค่า n ได้ดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งเป็นตัวอย่างไอโซเทอมของฟรอนดิช



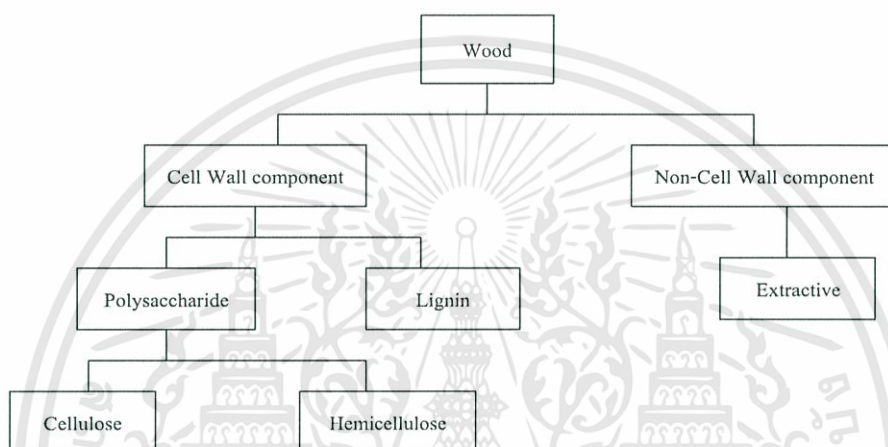
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ (log) และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ mX ฟรอนดิช

ที่มา: Cheremisinoff and Morresi(1987)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (ปริชาและคณะ, 2528)

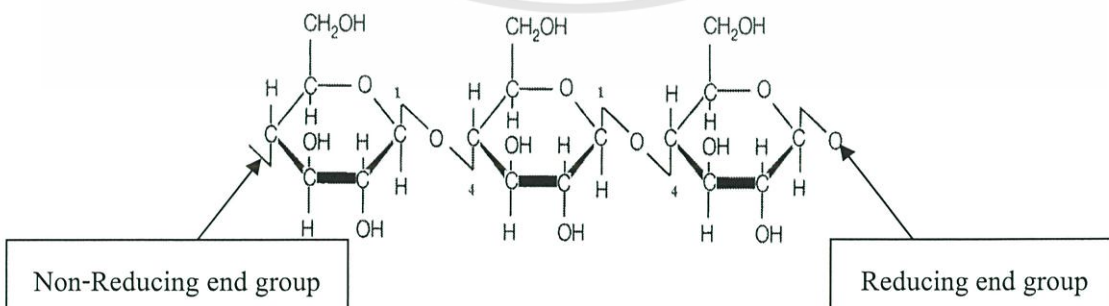
องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ประกอบด้วยสารที่สำคัญอยู่สองประเภท คือ สารพวก โพลีแซคคาไรด์ ซึ่งเรียกรวมๆ ว่าไฮโดรเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อีกประเภทหนึ่ง ได้แก่ ลิกนิน นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยอีก เช่น เทนิน ยางน้ำมันไม้ แอลคาลอยด์และสารที่มีสีอื่นๆ อีกหลายชนิดสารเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทสารแทรกหรือสารที่สกัดได้ ส่วนสารประกอบอินทรีย์นั้น คือ ส่วนที่เป็นขี้เถ้าเนื้อไม้ ประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ มากมาย ซึ่งจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยที่สำคัญได้ ดังนี้



รูปที่ 2.5 สารประกอบต่างๆของเนื้อไม้

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้ คือ ประมาณร้อยละ 40 ทั้งในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) และไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง สูตรโครงสร้างทางเคมี $(C_6H_{10}O_5)_n$ จะซ้ำกัน 2 ลักษณะ เรียกว่า Cellobiose unit ซึ่งส่วนปลายของทั้งสองข้าง คือ Reducing end group (C1) ส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ง่ายสุด และ Non-Reducing end group (C4) ส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.6 สูตร โครงสร้างของ เซลลูโลส (cellulose)

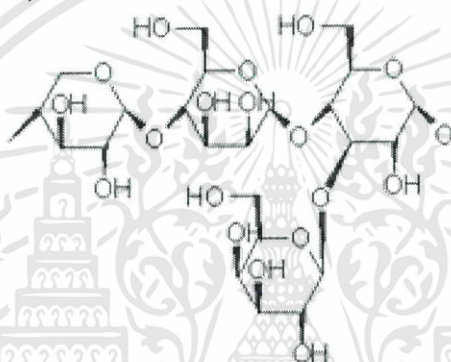
ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนโมเลกุลของ Glucose Unit (DP = Degree of Polymerization) เท่ากับ 1000 ถึง 3000 หรือ 4000 แต่ละ Unit ยึดเกาะกันด้วยพันธะ “1,4-B-D-anhydroglucosidic bonding” เซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (Neutral organic solvent) เช่น เบนซีน แอลกอฮอล์ และอีเธอร์ แต่จะละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น เซลลูโลสเมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสามารถผลิตพลาสติก น้ำตาล เจล ฟิล์ม เส้นใยชนิดใหม่ สารเคลือบระเบิด

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

ไม้ในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีประมาณร้อยละ 30 ถึง 35 เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก สีขาวมีโครงสร้างลักษณะเป็นกิ่งจับกันอยู่แบบหลวมๆ



รูปที่ 2.7 สูตร โครงสร้างของ เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

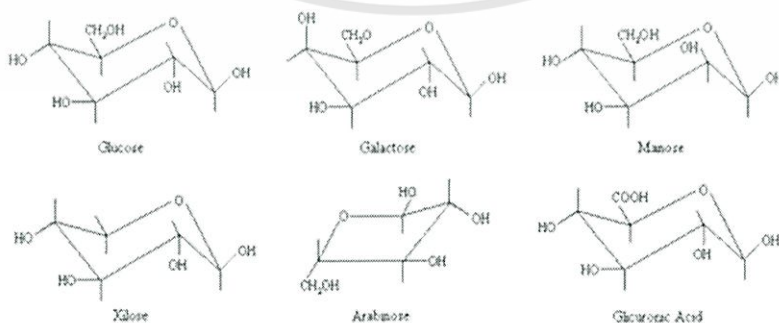
ที่มา : <http://www.responsiblebusiness.eu/>

เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วย น้ำตาล 5 ชนิดและกรดบางชนิด คือ

Hexoses (จำนวน C = 6): glucose, mannose, galactose

Pentose (จำนวน C = 5): xylose, arabinose

Acid : 4-O-methyl-D glucuronic acid มีสูตร โครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.8 สูตร โครงสร้างของส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา : <http://www.engin.umich.edu/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของ Hemicelluloses

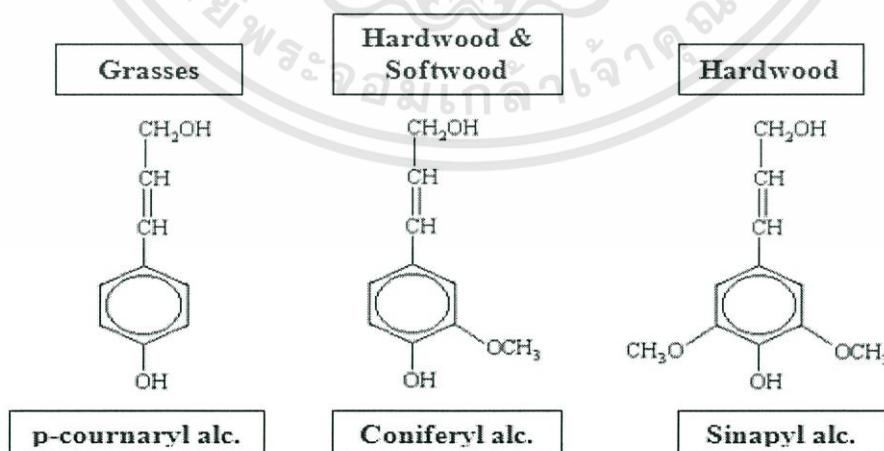
1) ในรูป Monomer สามารถแยกน้ำตาลโดยวิธี Hydrolysis (Hydrolysis คือ การสลายโดยใช้น้ำเป็นตัวย่อยสลายทำให้โมเลกุลของสารเปลี่ยนแปลงไปคุณสมบัติก็เปลี่ยนแปลงไป) เรียกวิธีนี้ว่า Wood saccharification (การทำน้ำตาลจากเนื้อไม้) และวิธี Steam Explosion ใช้น้ำไปแยกใช้ได้ดีและได้น้ำตาลมาก

2) ในรูป Polymer มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็น Amorphous (อยู่รวมกันแบบหลวมๆ) น้ำจึงเข้าไปได้ง่ายเกิดการพองตัวตัวเยื่ออุ่มน้ำได้ดี มีประโยชน์ในการตีเยื่อ คือ ทำให้ผิวของเส้นใยแตกออกเกิดการประสานตัวด้วย H-bond ทำให้เยื่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

3) เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีสังเคราะห์ ได้ Food additive (สารแต่งเติมทำให้อาหารข้น) Jelly agent (ใช้ในเครื่องสำอาง เป็นตัว Absorbent) Adhesive (ตัวเชื่อมประสาน)

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบที่มีมากรองจากเซลล์ลูโลสในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (Softwood) จะมีลิกนินประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 ส่วนในไม้ใบกว้าง (Hardwood) มีลิกนินประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 เป็นสารโพลีเมอร์ที่ซับซ้อนกว่า Cellulose กับ Hemicelluloses และเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ชนิดหนึ่งพบในไม้ใบกว้าง (Hardwood) ไม้ใบแคบ (Softwood) พืชล้มลุก (Grasses) และพืชชั้นต่ำต่างๆไป แต่ไม่พบใน Lichens mosses fungi mushrooms โมเลกุลใหญ่ค่า Glucose Unit (DP = Degree of Polymerization) เยอะลักษณะโครงสร้างเป็น 3 มิติทำหน้าที่เป็น Cell wall adhesive ยึดเส้นใยที่อยู่รวมกันให้เป็น โครงสร้างของเนื้อไม้สามารถพบลิกนินในผลบาสท์ (Bast) เปลือก (Bark) เช่นกัน



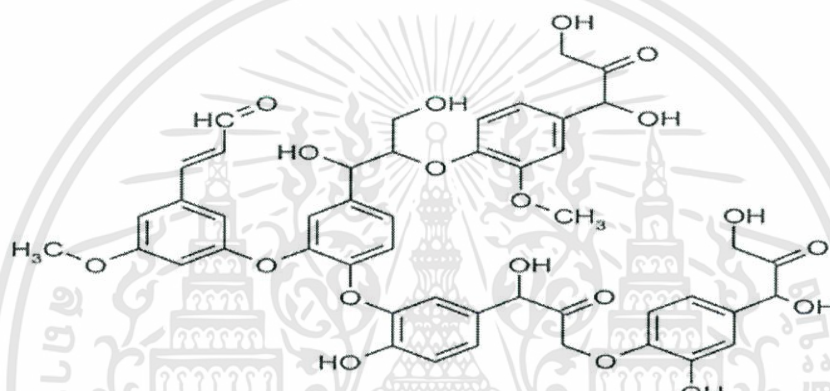
รูปที่ 2.9 สูตร โครงสร้างของ monomer ของลิกนิน

ที่มา : <http://www.engin.umich.edu/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของลิกนินแบ่งตามโครงสร้างเป็น 4 ประเภท คือ

- 1) G type (Guaiacyl lignin) ประกอบด้วย Coniferyl alc. พบในไม้ใบแคบที่ปกติ
- 2) G-S type (Guaiacyl-Syringyl lignin) พบในไม้ใบกว้างทั้งปกติและไม้ปกติประกอบด้วย Coniferyl alc. และ Sinapyl alc.
- 3) H-G-S type (4-Hydroxyphenyl-Guaiacyl-Syringyl lignin) มี Monomer ทั้ง 3 ชนิดอยู่รวมกัน
- 4) H-G type (Hydroxyphenyl-Guaiacyl lignin) โดยมากพบในไม้ไม่ปกติซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Compression wood ประกอบด้วย Coniferyl alc. และ p-coumaryl alc.



รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: <http://www.engin.umich.edu/>

ประโยชน์ของ Lignin

- 1) ลิกนินที่ได้จากการต้มเยื่อกระดาษสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- 2) ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อนำมาสังเคราะห์จะได้สารอินทรีย์เช่นวานิลลิน (Vanillin) ไดมethyl-ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide = DMSO)
- 3) ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักใช้ในรูปของแหล่งลิกนินที่ได้มาโดยตรง เช่น ลิกนินซัลโฟเนตหรือคราฟลิกนิน และลิกนิน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงใช้กันมากในอุตสาหกรรมกระดาษจะน้ำมัน ทำสี ทำยาฆ่าแมลงทำซีเมนต์ ทำยาง และอาจใช้เป็นตัวเพิ่ม (Extenders) ในกาวยีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา (http://it.doa.go.th/pibai/pibai/n11/v_11-mar/ceaksong.html)

ยูคาลิปตัสเป็นไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศออสเตรเลียมีจำนวนมากกว่า 700 ชนิด โดยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. ลักษณะเป็นไม้โตเร็วรูปทรงลำต้นตรงเปลือกสีเทาสามารถเจริญเติบโตและตัดเพื่อใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่อายุ 3 ถึง 5 ปี รวมทั้งสามารถแตกหน่อได้ดี ไม่ต้องปลูกใหม่เจริญเติบโตได้เร็ว ทนต่อสภาพแห้งแล้งสามารถขึ้นได้ทั้งพื้นที่ดินเสื่อมโทรมมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ดินเค็ม ดินเปรี้ยวดินที่เป็นทราย ดินมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานานพื้นที่ดินที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มิลลิเมตรต่อปี จนกระทั่งในสภาพพื้นที่ที่มีน้ำท่วมบางระยะในรอบปีหรือพื้นที่ริมน้ำ แต่จะไม่ทนทานต่อดินที่มีหินปูนสูงลักษณะลำต้นเป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่มีความสูง 24 ถึง 28 เมตร บางชนิดสูงถึง 50 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางถึง 1 ถึง 2 เมตร ส่วนของใบออกเป็นคู่ตรงข้ามเรียงสลับลักษณะเป็นใบรูปหอก ก้านใบยาว ใบสีเขียวอ่อนทั้งสองด้านบางครั้งมีสีเทาใบบาง เส้นใบมองเห็นชัดเปลือกมีลักษณะเรียบเป็นมันสีเทาสลับขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่ง เปลือกนอกจะแตกร่อนเป็นแผ่นหลุดออกจากผิวของลำต้นเมื่อแห้งและลอกออกได้ง่ายขณะยังสดหลังการตัดเปลือกนอกหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร

ส่วนของช่อดอกจะเกิดที่ข้อต่อระหว่างกิ่งกับใบมีก้านดอกเรียวยาว และมีก้านย่อยแยกออกไปอีกดอกเกือบตลอดปีขึ้นกับความสมบูรณ์ของต้น บางครั้งมีทั้งดอกตูมดอกบานผลอ่อนและผลแก่ในกิ่งเดียวกัน ออกดอกปีละ 7 ถึง 8 เดือนในขณะที่ผลมีลักษณะครึ่งวงกลมหรือรูปถ้วย ผิวนอกแข็งเมื่อยังอ่อนจะมีสีเขียวและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อแก่ โดยปลายผลจะแตกแยกออกทำให้เมล็ดร่วงลงมาลักษณะของเมล็ดมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร สีเหลือง น้ำหนักเมล็ด 1 กิโลกรัมจึงมีจำนวนเมล็ดได้ถึงสองแสนเมล็ด



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบต้นยูคาลิปตัส

ที่มา : <http://www.thaibizchina.com/thaibizchina/th/>

สำหรับเนื้อไม้ยูคาลิปตัสมีแก่นสีน้ำตาล กระพี้สีน้ำตาลอ่อน โดยกระพี้และแก่นมีสีแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่ออายุมากขึ้นลักษณะเนื้อไม้จะมีสีน้ำตาลแดงเข้มกว่าไม้อายุน้อยเนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างละเอียดบางครั้งบิดไปตามแนวลำต้น มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 ในสภาพแห้งซึ่งขึ้นกับอายุของไม้ ลักษณะเนื้อไม้แตกง่ายหลังจากตัดตามแนวยาวขนานลำต้น คุณภาพเนื้อไม้ยูคาลิปตัสเมื่อแปรรูปจึงมักบิดของง่ายเนื้อไม้มีเสี้ยน บิดเป็นเกลียวและแตกร้าวได้ง่ายจึงเหมาะต่อการใช้งานหน้าแคบและสั้น แต่หากทำให้ถูกวิธีก็สามารถนำมาเลื่อยทำเครื่องเรือนและก่อสร้างได้เช่นกัน

ประโยชน์ของยูคาลิปตัส

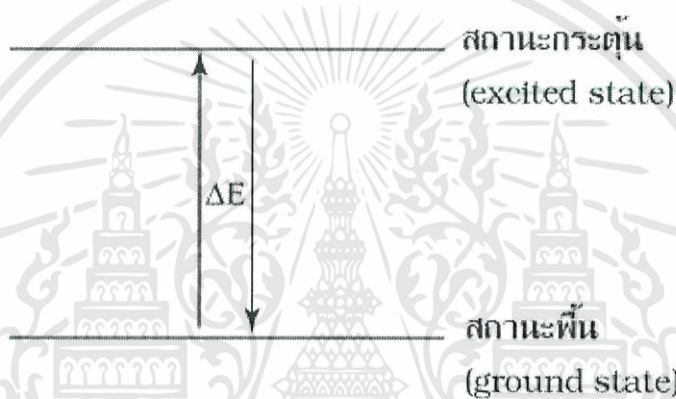
ยูคาลิปตัสมีทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยประโยชน์ทางตรงสามารถนำไม้ยูคาลิปตัสมาทำเป็นไม้ใช้สอยเฟอร์นิเจอร์เครื่องเรือน ทำรั้ว คอกปศุสัตว์ ทำเสานั่งร้านในการก่อสร้างหรือนำมาเป็นส่วนประกอบของอาคารบ้านเรือนแต่ต้องมีการอบน้ำยาเพื่อรักษาเนื้อไม้ไว้ก่อนจะยึดอายุการใช้งานได้นานขึ้นรวมทั้งสามารถนำไปทำไม้พื้นหรือเสาถ่าน ซึ่งมีการวิจัยรองรับว่าพื้นไม้ยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อนสูงถึง 4,800 แคลอรีต่อกรัมส่วนถ่านไม้ยูคาลิปตัสให้พลังงานความร้อนสูงถึง 7,400 แคลอรีต่อกรัมใกล้เคียงกับไม้โกงกางซึ่งจัดเป็นถ่านไม้ชั้นดีที่สุดนอกจากนี้ยังสามารถนำไปทำชิ้นไม้สับ เพื่อผลิตเป็นแผ่นชิ้นไม้อัดแผ่นใยไม้อัด แผ่นปาร์ติเกิลและแผ่นไม้อัดซีเมนต์หรือส่งให้โรงงานเชื้อกระดาษ จนเรียกยูคาลิปตัสอีกอย่างว่าต้นกระดาษซึ่งเนื้อไม้ยูคาลิปตัส 1 ตันสามารถผลิตเชื้อกระดาษได้ประมาณ 1 ตัน ด้วยคุณสมบัติเด่น คือมีความฟูทึบแสงและไฟเบอร์มีความแข็งแรงเหมาะต่อการทำกระดาษพิมพ์เขียว

สำหรับประโยชน์ทางอ้อม เนื่องจากบริเวณรากของยูคาลิปตัสมีเชื้อราไมคอร์ไรซาชนิดต่างๆอาศัยอยู่เป็นจำนวนมากทำหน้าที่เป็นตัวช่วยดูดฟอสฟอรัสให้กับต้นยูคาลิปตัสเมื่อถึงฤดูฝนเชื้อเหล่านี้จะแทงดอกเห็ดขึ้นมาเหนือพื้นดินเพื่อกระจายพันธุ์ออกไปจึงมักจะพบเห็ดหลายชนิดเกิดขึ้นในสวนป่ายูคาลิปตัส ชาวบ้านจะเรียกกันว่าเห็ดยูคาซึ่งเป็นเห็ดที่รับประทานได้เช่นเห็ดเสม็ด เห็ดไข่ เห็ดระโงกขาว อีกทั้งลักษณะของไม้ยูคาลิปตัสที่มีดอกปีละ 7 ถึง 8 เดือนเกือบตลอดทั้งปีจึงเหมาะต่อการเลี้ยงผึ้งว่ากันว่าคุณภาพน้ำผึ้งจากดอกยูคาลิปตัสให้คุณภาพดีเช่นเดียวกับน้ำผึ้งที่ได้จากดอกไม้ชนิดอื่นหากมองในแง่สิ่งแวดล้อมเห็นว่ายูคาลิปตัสช่วยทำให้เกิดความสมดุลตามธรรมชาติด้วยการเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับพื้นที่เนื่องจากยูคาลิปตัสคายน้ำออกทางใบเป็นปริมาณกว่าร้อยละ 95 รวมถึงช่วยฟื้นฟูพื้นที่เสื่อมโทรมให้เป็นสวนป่าเพิ่มพื้นที่ป่าของประเทศเกิดการปลูกสร้างสวนป่าเชิงพาณิชย์กระจายงานสู่ชนบทและสามารถประหยัดเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าไม้ท่อนและวัตถุดิบเชื้อกระดาษ

2.6 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (<http://www.mfu.ac.th>)

2.6.1 หลักการ

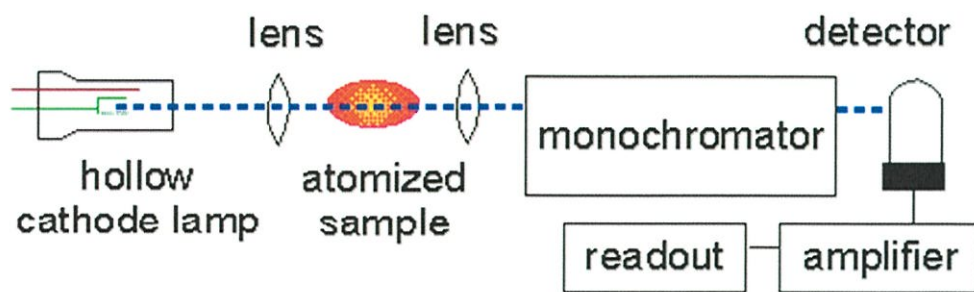
เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (Metal element) ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมอิสระ (Free atom) ของธาตุดูดกลืน (Absorb) แสงที่มีความยาวคลื่นระดับหนึ่ง โดยเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับธาตุแต่ละธาตุ เนื่องจากธาตุแต่ละชนิดมีระดับของพลังงานแตกต่างกันจึงมีการดูดกลืนพลังงานได้แตกต่างกัน พลังงานที่พอดีกับคุณสมบัติเฉพาะของธาตุจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุนั้นๆ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (Excited state)



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน

ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายหรือตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ให้เป็นอะตอมอิสระ จากนั้นอะตอมอิสระจะดูดกลืน (Absorb) พลังงานที่ระดับพลังงานจำเพาะ ยังมีอะตอมอิสระมากก็ยังมีค่าการดูดกลืน (Absorbance) มาก จึงใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุนั้นๆ ได้

ส่วนประกอบของเครื่อง AAS จึงต้องประกอบไปด้วย ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ ส่วนที่ทำให้เกิดพลังงานแสงที่อะตอมอิสระจะสามารถ Absorb ได้ ส่วนที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่นของแสง ส่วนที่ต้องตรวจจับค่าการดูดกลืน (Absorbance) รวมทั้งส่วนประมวลผล



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของเครื่อง AAS

ที่มา : <http://faculty.virginia.edu/analyticalchemistry/AAS%20Lead/AAS%20Lead.html>

2.6.2 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

แหล่งกำเนิดแสงของ AAS โดยทั่วไป 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) และ แบบ 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 ถูกกำจัดออกไปทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ (Solid particles)

-Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟโดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นเป็นออกไซด์เป็น โมเลกุล และเป็นอะตอมอิสระ ชนิดของ Burner (Burner type) เป็นแบบ Standard burner ซึ่งเป็นแบบมาตรฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ธาตุโลหะทั่วไป ที่ไม่ใช่ว่าธาตุที่ต้องการพลังงานความร้อนสูงมากเช่น Aluminum (Al) หรือ Boron (B) หรือ Barium (Ba) หรือ Silicon (Si) ซึ่งธาตุที่ต้องการพลังงานความร้อนสูงมากดังกล่าวต้องเปลี่ยนไปใช้ Burner อีกแบบ (High Temperature burner type)

ชนิดของเปลวไฟ (Flame type) เป็นแบบ Air-Acetylene flame คือ ใช้แก๊ส Acetylene เป็นแก๊สเชื้อเพลิงและใช้ ออกซิเจนจากอากาศเป็น Oxidant gas

โดย Burner และ Flame type เป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ต้องการวิเคราะห์จะต้องทราบก่อนว่าธาตุที่จะวิเคราะห์นั้นควรใช้ Flame ชนิดไหนเหมาะสมในการทำให้เกิดอะตอมอิสระเนื่องจาก Flame แต่ละชนิดให้พลังงานความร้อนในระดับที่แตกต่างกันในส่วนของ Burner เนื่องจากแต่ละชนิดมีความทนต่อความร้อนต่างกันดังนั้นต้องเหมาะสมกับชนิดของ Flame ด้วย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ning-Chuan *et al.* (2009) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาและเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับทองแดง โดยใช้เปลือกส้มที่ผ่านการตัดแปลงด้วยสารเคมี การดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มได้ตัดแปลงด้วยสารเคมี คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ ไอออนและพีเอช การดูดซับทองแดงเป็นการติดตามผลพารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ (ΔG°) เอนทาลปี (ΔH°) และเอนโทรปี (ΔS°) ระหว่างการดูดซับเป็นตัวกำหนด ผลของกระบวนการดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มที่ผ่านการตัดแปลงด้วยสารเคมีสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เองและคายความร้อนภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา ความสมดุลของการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ดีโดยใช้สมการแลงเมียร์ (Langmuir equation) ปริมาณการดูดซับสูงสุดของทองแดงที่ 72.73 มิลลิกรัมต่อกรัม และการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เหมาะสมสอดคล้องกับ pseudo-second order ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 16 องศาเซลเซียสถึง 60 องศาเซลเซียส ปริมาณทองแดงดูดซับได้ลดลง ตัวดูดซับที่ใช้แล้วถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยการล้างด้วยกรดไฮดรอกลอริก (HCl) ซึ่งสามารถนำมาดูดซับได้อีก 5 ครั้ง แต่ประสิทธิภาพของการดูดซับจะลดลง

Ahmed (2011) ศึกษาการใช้คอลัมน์แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในการกำจัดทองแดงและเหล็กโดยใช้ซีลีเนียมที่ผ่านการดัดแปลงด้วยสารเคมี ซีลีเนียมเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมที่มีราคาถูกและเป็นของเสียที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนิน มีคุณสมบัติในการดูดซับ เมื่อผ่านการดัดแปลงด้วย Alizarin Red S (phase 1) และ Eriochrome Black T (phase 2) เพื่อกำจัดเหล็กและทองแดง ในสภาวะที่มีการกำหนดค่าพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาการสัมผัส น้ำหนักของตัวดูดซับและความเข้มข้นของโลหะไอออน ในการทดลองทำการตรวจวัดด้วยวิธี Scanning electron microscope และ Fourier transfer infrared spectra ก่อนและหลังทำการดูดซับเหล็กและทองแดง บันทึกลักษณะ Functional groups ที่มีผลต่อการสร้างพันธะกับโลหะไอออน ก่อนที่จะศึกษาซีลีเนียมที่ดัดแปลง ความสมดุลข้อมูลสอดคล้องกับ Langmuir model การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาที่เหมาะสมสอดคล้องกับpseudo-second order สืบเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับใน (phase 1 เหล็กที่พีเอช 4 และน้ำหนัก 200 มิลลิกรัม ดูดซับได้ร้อยละ 97 ส่วน phase 2 ทองแดงที่พีเอช 5 และน้ำหนัก 200 มิลลิกรัมดูดซับได้ร้อยละ 99)เป็นการดูดซับปริมาณเหล็กและทองแดงในตัวอย่างน้ำเสีย ตามธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลอง

อรทัย (2011) ศึกษาการดูดซับน้ำมันในน้ำ เสียสังเคราะห์โดยใช้ชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)เข้มข้น 0.1 โมลาร์ซึ่งการศึกษาทั้งหมดอยู่ในรูปแบบการทดลองแบบกะ โดยปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษา ประกอบด้วยค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันนอกจากนี้เป็นการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเพื่อใช้หาค่าความสามารถในการดูดซับและอธิบายกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นรวมทั้งศึกษาการคายซับของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพหลังผ่านกระบวนการดูดซับจากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อยและชานอ้อยที่การปรับสภาพ คือพีเอช 6 ระยะเวลาในสัมผัส 120 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพเท่ากับร้อยละ 72.03 และ 79.55 สมการไอโซเทอร์มที่เหมาะสมคือLangmuir Isothermสำหรับความสามารถในการดูดซับสูงสุดของชานอ้อยและชานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 2.55 มิลลิกรัมต่อลิตรและเมื่อศึกษาการคายซับพบว่าประสิทธิภาพการคายซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.8 และ 99.9 ตามลำดับ

B.R. Reddy et al. (1997) ศึกษาการกำจัดโลหะทองแดงออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกของต้นไม้ ประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นกับสภาพความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของสารละลาย ชนิดของเปลือกไม้และเวลาที่ใช้สัมผัสกัน การกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้เปลือกไม้ดิบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชและให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 65 ถึง 78 ที่พีเอชในช่วง 4 ถึง 5 สารละลายที่ผ่านการกำจัดโลหะทองแดงแล้วจะมีสีเนื่องมาจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในเปลือกไม้ดิบนั้น ซึ่งจะทำให้สารละลายนี้มีค่า BOD และ COD สูง รวมทั้งมีปริมาณธาตุคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ (TOC) ในปริมาณสูงด้วย ด้วยเหตุนี้จึงปรับสภาพเปลือกไม้ดิบก่อนการใช้งานด้วยกระบวนการทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีหรือชีวภาพ การปรับสภาพนี้จะทำให้สารประกอบอินทรีย์บางส่วนถูกสกัดออกไป รวมทั้งทำให้ความจุและประสิทธิภาพของการเกิดคีเลต (Chelating) ของเปลือกไม้มีค่าเพิ่มขึ้น

อรพิน (2553) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ 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 จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่พีเอช 6 ระยะเวลาในการบั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้น และถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการดูดซับของฟรุนดลิช



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

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

สารเคมี

1. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ เกรด RPE บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy
2. กรดไฮดรอกลอริก (HCl 0.1 mol/L, 0.05 mol/L) เกรด RPE บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 mol/L, 0.5 mol/L) เกรด RPE บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy
4. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 1.5 mol/L) Analytical Univar Reagent, Ajax Finechem, Australia
5. เอทานอล (Ethanol) เกรด RPE บริษัท Carlo Erba Reagents, Italy
6. น้ำกลั่น

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1. ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ มา 3.926 กรัม
2. นำมาละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดงความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร
3. นำน้ำเสียที่มีสารละลายทองแดง ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2.2 การเตรียมขี้เลื่อย

1. นำขี้เลื่อยที่จะทำทดลองล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. บดขี้เลื่อยผ่านการอบแห้งแล้ว นำมาทำการคัดแยกขนาดให้มีขนาด 0-35 เมช โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 35 เมช เพื่อนำไปทำการปรับปรุงด้วยสารเคมี

3.2.3 การปรับปรุงขี้เลื่อยด้วยสารเคมี (โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์)

1. ชั่งขี้เลื่อยที่บดและผ่านการคัดแยกขนาดแล้วมา 100 กรัม นำมาลงในสารละลายที่มีส่วนผสมของเอทานอล 500 มิลลิลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.5 mol/L) 250 มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2 1.5 mol/L) 250 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
2. นำขี้เลื่อยที่แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งวัดค่าพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำขี้เลื่อยไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่ออบขี้เลื่อยครบ 24 ชั่วโมงแล้ว นำมาใส่ในเคสซิเคเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็น

3.2.4 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง โดยใช้ขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี

3.2.4.1 ศึกษาค่าความเป็น กรด – ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

1. ชั่งขี้เลื่อย 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปรับค่าพีเอชเป็น 2 3 4 5 6 และ 7 แล้วตามลำดับ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl 0.1 N) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 N) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย จากนั้นกรองสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1 – 3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.4.2 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม

1. ชั่งซีลีเนียม 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสถานะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับทองแดงสูงสุด จากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 20 40 60 80 100 และ 120 นาที ตามลำดับ
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.5 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ชั่งซีลีเนียม 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 0 50 100 200 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสถานะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับทองแดงสูงสุดจากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.2)
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอร์มต่อไป

3.2.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมีและซีลีเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุง

1. ชั่งซีลีเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุงและที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์อย่างละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสถานะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับทองแดงสูงสุดจากผลการทดลองข้อ 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.2)
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-3 อีก 2 ครั้ง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ และซีลีเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุง

3.2.7 ศึกษาประสิทธิภาพการนำซีลีเนียมมาใช้ใหม่

1. นำซีลีเนียมที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ และซีลีเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุงที่ได้จาก ข้อ 3.2.6 มาอบด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ชั่งซีลีเนียมทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลิตร ลงไป 50 มิลลิลิตร
3. เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
4. นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จนกระทั่งวัดค่าพีเอชของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำกลั่น จากนั้นนำซีลีเนียมไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
5. ชั่งซีลีเนียมทั้ง 2 ชนิด มาชนิดละ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสถานะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับทองแดงสูงสุดจากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
6. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.2)

7. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
8. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-7 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง
9. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการดูดซับรอบแรกและการดูดซับ หลังจากการคายซับ

3.2.8 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับทองแดงของซีลี้อยู่ที่ผ้การปรับปรุง

1. ชั่งซีลี้อยู่ 2.5 6.25 12.5 และ 25 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่าพีเอชในสถานะที่เหมาะสม (มีค่าการดูดซับทองแดงสูงสุดจากผลการ ทดลอง ข้อ 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และระยะเวลา ในการเขย่าที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด (จากผลการทดลอง ข้อ 3.2.4.2)
3. นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ จากนั้นนำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-3 ซ้ำ อีก 2 ครั้ง
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อนำไปใช้ศึกษาไอโซเทอร์มต่อไป

บทที่ 4

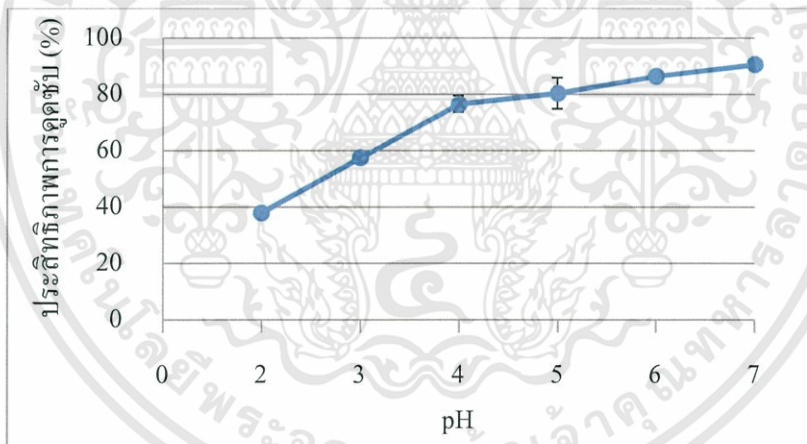
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การนำเสนอโครงการพิเศษเรื่อง การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีลี้อย โดยทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์และ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างซีลี้อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl₂ กับซีลี้อยที่ไม่ได้ปรับปรุง ซึ่งการนำเสนอเป็นแบบตาราง ภาพประกอบ และอภิปรายผล แยกเป็น การทดลองย่อยเพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ

4.1 ศึกษาสภาวะในการดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงโดยใช้ซีลี้อยที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี

4.1.1 ศึกษาสภาวะความเป็นกรด - ด่าง (pH) ที่เหมาะสม

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm โดยทำการปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 2 3 4 5 6 และ 7 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cu²⁺

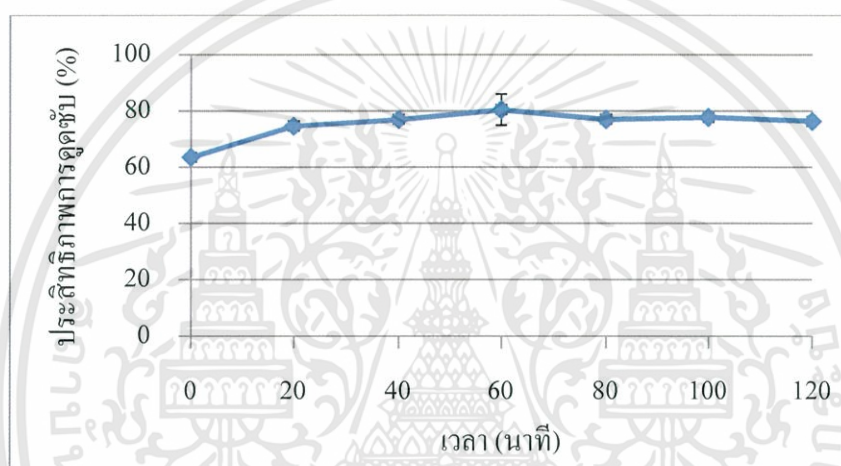
จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าที่ pH ต่ำ สารละลายหรือน้ำเสียสังเคราะห์ จะเต็มไปด้วยไฮโดรเจนไอออน (H⁺) และ H⁺ จะไปขัดขวางการดูดซับทองแดงของซีลี้อย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าต่ำ เมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น H⁺ มีค่าลดลงทำให้ ทองแดงเข้าไปยึดเกาะบนพื้นผิวของซีลี้อยได้มากขึ้น จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ ทองแดงเพิ่มขึ้น(อรทัย, 2554) และเข้าสู่สมดุลที่ pH เท่ากับ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 78.04 และพบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นมากกว่า 5 จะเกิดการดูดซับและตกตะกอนร่วมของสารประกอบกับ

หมู่ไฮดรอกซิล (OH⁻) เป็นคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (Cu(OH)₂) ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ning-chuan, 2009

จากผลการทดลองนี้จะเลือกใช้การปรับ pH ของสารละลายที่ pH เท่ากับ 5 สำหรับทำการทดลองต่อไป

4.1.2 ศึกษาระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสม

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ที่ pH เท่ากับ 5 โดยทำการแปรผันระยะเวลาในการดูดซับเป็น 0 20 40 60 80 100 และ 120 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



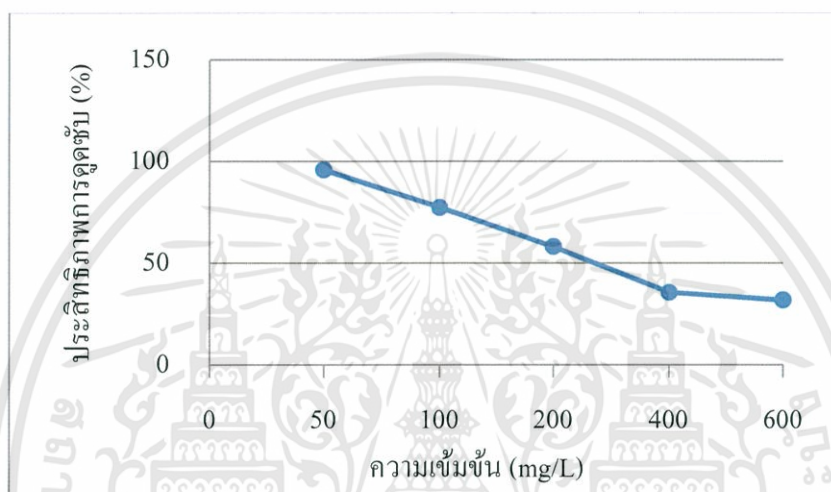
รูปที่ 4.2 อิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ Cu²⁺

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระยะแรกพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปทองแดงจะเข้าไปยึดเกาะบนพื้นที่ผิวของซีลีออยทำให้การดูดซับที่เกิดขึ้นใหม่เป็นไปได้ยากและจะเกิดแรงผลักระหว่างทองแดงที่เข้าไปยึดเกาะใหม่กับทองแดงที่ถูกดูดซับไว้เดิม เรียกว่า การคายซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ (อรทัย, 2554) โดยจุดที่ประสิทธิภาพคงที่ เรียกว่า จุดสมดุลของการดูดซับหรือจุดที่อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ จากการทดลองนี้ จุดสมดุลของการดูดซับคือ 60 นาที ซึ่ง ณ สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 78.04 จากการวิเคราะห์โปรแกรมทางสถิติ SPSS ด้วยเครื่องมือ one way anova พบว่าที่ระยะเวลา 0 ถึง 60 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและระยะเวลาหลังจาก 60 ถึง 120 นาที

ประสิทธิภาพการดูดซับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที ในการทำการทดลองต่อไป

4.2 ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0 50 100 200 400 และ 600 mg/L ที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3

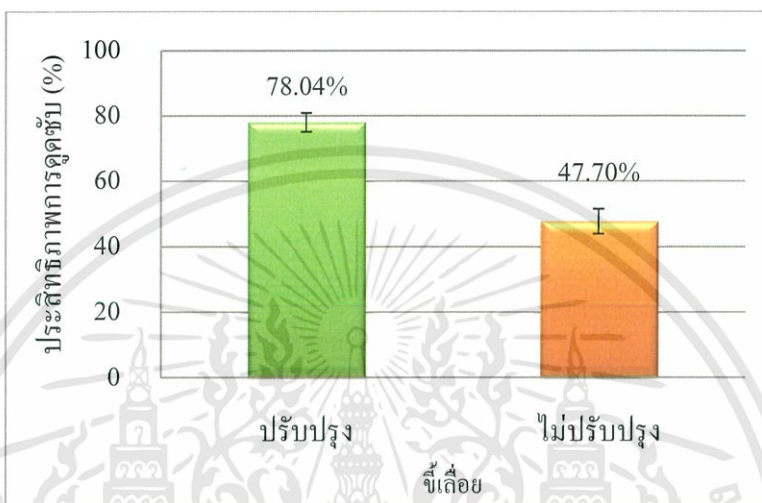


รูปที่ 4.3 ผลการใช้ซีลี้อยในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 50 ถึง 400 mg/L ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงค่อนข้างมากจากร้อยละ 95.90 ถึงร้อยละ 35.63 ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื่องจากระยะแรกความเข้มข้นของสารละลายต่ำ และมีพื้นที่ผิวการดูดซับอยู่มาก ทำให้เกิดการดูดซับได้ง่าย แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น พื้นที่ผิวการดูดซับมีจำกัดทำให้เกิดการดูดซับได้ยากขึ้นเรื่อยๆ และที่ความเข้มข้นจาก 400 ถึง 600 mg/L มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงน้อยจากร้อยละ 35.63 ถึงร้อยละ 31.88 ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของไอออนเพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซีลี้อยได้ยาก จึงทำให้เกิดการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซีลี้อย และมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (อรทัย, 2554)

4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารเคมี และขี้เลื่อยที่ไม่ได้ปรับปรุง

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที ระหว่างขี้เลื่อยที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl₂ และขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

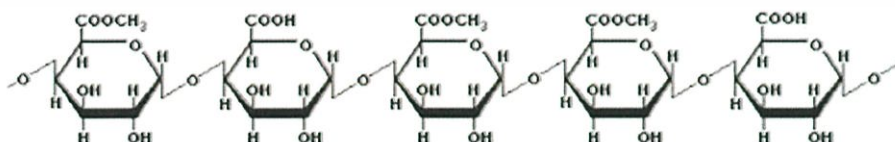


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างขี้เลื่อยที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl₂ และขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าขี้เลื่อยที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl₂ มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่าขี้เลื่อยที่ไม่ปรับปรุง ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.04 และร้อยละ 47.70 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก NaOH จะไปทำปฏิกิริยากับ Methyl ester ที่มีอยู่ในขี้เลื่อยทำให้จำนวนลิแกนด์ของ Carboxilate เพิ่มขึ้น ดังสมการ



และ CaCl₂ จะไปลดการละลายของ pectin acid ที่มีอยู่ในขี้เลื่อย ทำให้ pectin acid ตกตะกอนมีผลให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น (Ning-chuan, 2009)

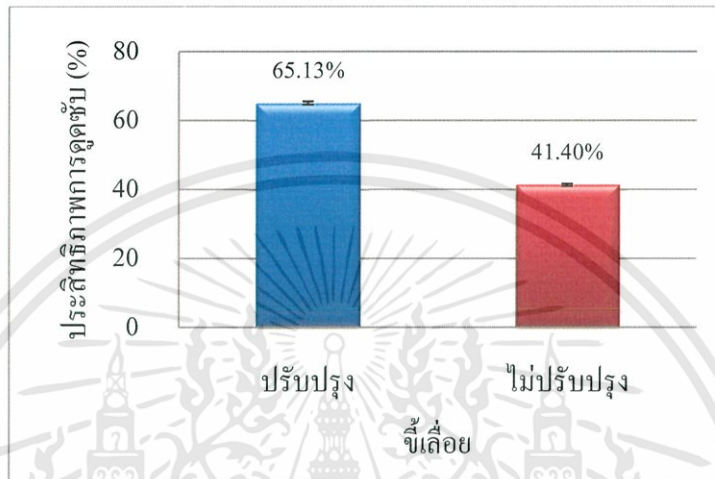


รูปที่ 4.5 โครงสร้างโมเลกุลของเพคติน

ที่มา :<http://www.foodnetworksolution.com>

4.4 ศึกษาประสิทธิภาพการนำขี้เถ้าที่คายซับลแล้วกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ที่ pH เท่ากับ 5 ใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาทีโดยใช้ขี้เถ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และขี้เถ้าที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl_2 หลังจากการดูดซับครั้งที่ 1 นำขี้เถ้าไปคายซับลด้วย HCl แล้วนำขี้เถ้าไปดูดซับอีกครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6

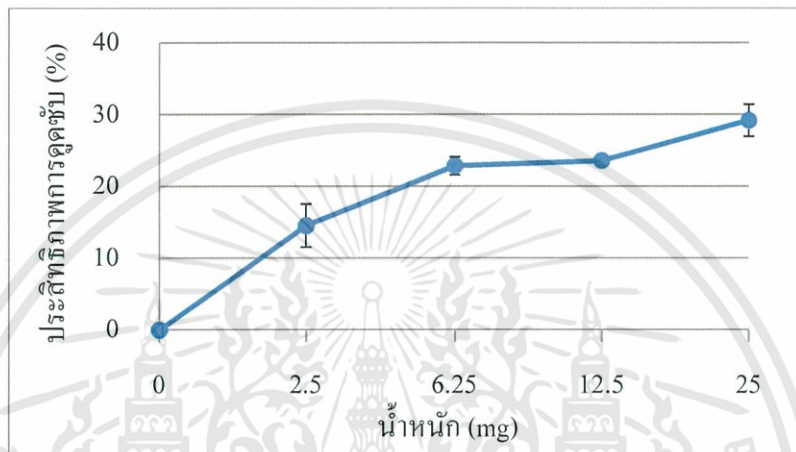


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์หลังการคายซับลระหว่างขี้เถ้าที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl_2 และขี้เถ้าที่ไม่ปรับปรุง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าขี้เถ้าที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย NaOH และ CaCl_2 มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจากร้อยละ 78.04 ถึงร้อยละ 65.13 ลดลงร้อยละ 12.91 และขี้เถ้าที่ไม่ปรับปรุงมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงจากร้อยละ 47.70 ถึงร้อยละ 41.40 ลดลงร้อยละ 6.30 ดังนั้นสามารถนำขี้เถ้ากลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก แต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

4.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของซีลี้อยู่ที่ผ่านการปรับปรุง

เมื่อได้สถานะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงของซีลี้อยู่แล้วจะทำการศึกษา ไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของซีลี้อยู่แบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm โดยศึกษาจากน้ำหนักของตัวดูดซับ ทำการแปรผันน้ำหนักของซีลี้อยู่เป็น 2.5 6.25 12.5 และ 25 mg ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ที่ pH เท่ากับ 5 โดยระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7



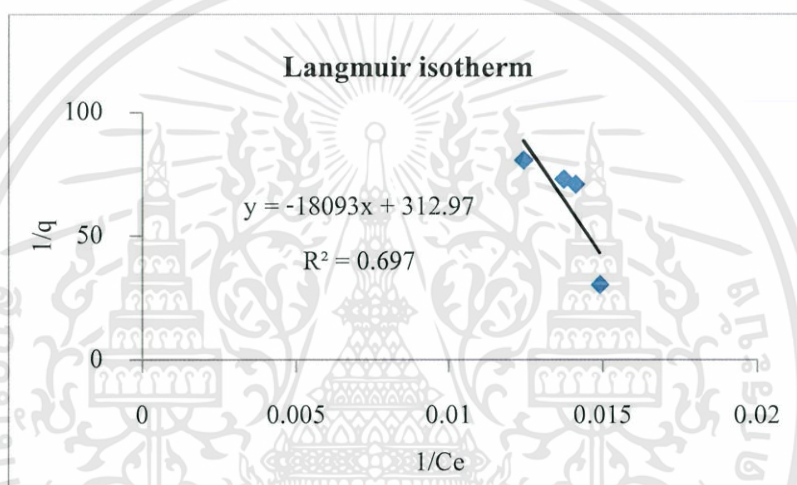
รูปที่ 4.7 ผลการใช้ซีลี้อยู่ในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่น้ำหนักซีลี้อยู่ต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีลี้อยู่ขึ้นเรื่อยๆ จาก 2.5 mg ถึง 25 mg ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อใช้ซีลี้อยู่ 25 mg ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจะมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 29.21 เนื่องจากปริมาณซีลี้อยู่มากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นด้วย

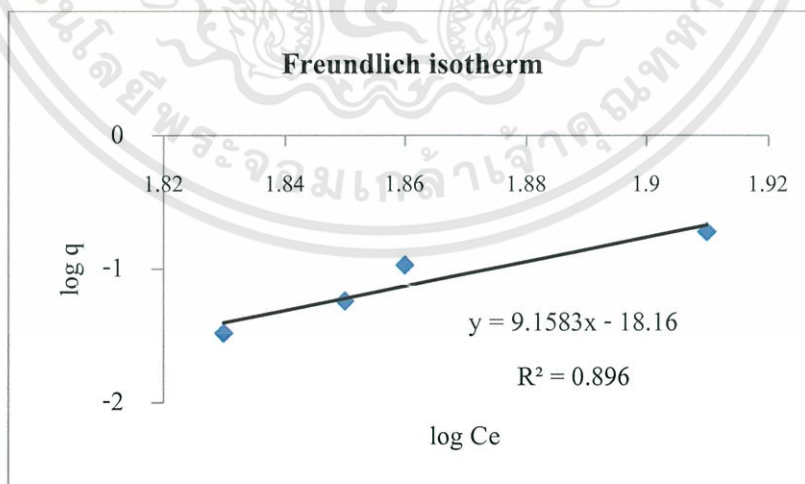
จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของซีลี้อยู่แบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอร์ม

น้ำหนัก ซีลี้อย (mg)	ปริมาตร น้ำเสี่ย ตั้งเคราะห์ (mL)	ความเข้มข้น เริ่มต้น หรือ C_0 (mg/L)	ความ เข้มข้นที่ เหลือ หรือ C_e (mg/L)	q	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
25	25	100	67.10	0.0329	0.0149	30.40	1.83	-1.48
12.5	25	100	70.90	0.0582	0.0141	70.92	1.85	-1.24
6.25	25	100	73.17	0.1073	0.0137	72.99	1.86	-0.97
2.5	25	100	80.93	0.1907	0.0124	80.65	1.91	-0.72



รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของซีลี้อยแบบ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.9 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับทองแดงของซีลี้อยแบบ Freundlich Isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองของทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสีนใจ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ แสดงว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ไม่เหมาะสมในการอธิบายข้อมูลการดูดซับของแข็งที่เลือก แต่พฤติกรรมของการดูดซับของแข็งที่เลือกสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของฟรุนดิช ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับหลายชั้น (multilayer sorption) ของฟรุนดิช ซึ่งทำให้เกิดพื้นผิวหลายชั้น(ปรีชญา, 2551)

จากรูปที่ 4.8 แสดงสมการเส้นตรง $y = 9.1583x - 18.16$ ซึ่งมีค่าคงที่ n เท่ากับ 9.1583 และค่า $1/n$ เท่ากับ 0.1092 โดย $1/n$ บ่งบอกถึงจำนวนชั้นของการดูดซับของความเป็นพื้นผิวหลายชั้น หากแสดงค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไรแสดงความเป็นพื้นผิวหลายชั้นมากเท่านั้น และสามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_d ซึ่งแสดงถึงปริมาณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ มีค่าเท่ากับ 6.92×10^{-19}



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความสามารถในการบำบัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการดูดซับ โดยซีลี้อยี่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย CaCl_2 และ NaOH รวมถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ระยะเวลาการดูดซับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมปริมาณความเข้มข้นของทองแดงปริมาณตัวดูดซับ รวมทั้งศึกษาการนำซีลี้อยี่ที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ และ ไอโซเทอร์มการดูดซับของซีลี้อยี่ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี โดยผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยซีลี้อยี่ พบว่า สารละลายที่มีค่า $\text{pH} = 5$ จะทำให้ซีลี้อยี่สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 78.04

2. การศึกษาระยะเวลาการดูดซับของซีลี้อยี่ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลา 60 นาที เป็นระยะเวลาที่ดีที่สุดในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ มีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 78.04 และหลังจาก 60 นาทีประสิทธิภาพการดูดซับจะคงที่

3. การศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะทองแดงเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

4. การศึกษาซีลี้อยี่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย CaCl_2 และ NaOH สามารถดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 78.04 และซีลี้อยี่ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงมีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 47.70

5. การศึกษาการนำซีลี้อยี่ที่คายซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ พบว่า การคายซับของซีลี้อยี่ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วสามารถดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 65.13และการคายซับของซีลี้อยี่ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสามารถดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดร้อยละ 41.40

6. การศึกษาปริมาณของตัวดูดซับพบว่าเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงสูงขึ้น ซึ่งในการทดลองใช้ปริมาณซีลี้อยี่ในการดูดซับทองแดงคือ 1 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 25 มิลลิลิตร โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 78.04

7. การดูดซับโลหะทองแดงด้วยซีลี้อยี่ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วย CaCl_2 และ NaOH สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช โดยมีค่าคงที่ของการดูดซับ K เท่ากับ 6.92×10^{-19} และ n เท่ากับ 9.1583

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมจริงเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด
2. ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างขี้เลื่อยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงและขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงแล้วทุกพารามิเตอร์ของการทดลอง
3. ควรทำศึกษานำขี้เลื่อยไปทำการดูดซับหรือนำไปบำบัดกับโลหะหนักชนิดอื่น
4. ควรศึกษาการใช้วัสดุอื่นในการดูดซับโลหะทองแดงแทนขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส
5. ควรศึกษาการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยสารอื่น เช่น Alizarin Red S dye และ Eriochrome - Black T แล้วทำการเปรียบเทียบกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)



เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ.2539.มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ
- ปรีชา เกียรติกระจาย, ทรงกลด จารุสมบัติ. 2528. เคมีของเนื้อไม้. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- ปรีชญา ชัยสาร.2551.การพัฒนาตัวดูดซับเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยในโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. (มปป).2542.การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ
- อรทัย วิเศษรัตน์ .2554. การดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อยปรับสภาพ. ปัญหาพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อรพิน โทนเดี่ยว.2553.การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้กากชา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 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.
- Reddy, B.R., Mirgsaffari, N. and Gaballas, I. 1997.**Removal and recycling of copper from aqueous solution using treated Indian barks.** Resources Conservation and Recycling, 21: 227-245.
- Salwa A. Ahmed. 2011. **Batch and fixed-bed column techniques for removal of Cu(II) and Fe(III) using carbohydrate natural polymer modified complexing agents.** Carbohydrate polymer. 83: 1470-1478.
- นิตยา รัตนปนนท์ และ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิม. Pectin.[Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com>. สืบค้นวันที่ 23 ตุลาคม 2556
- พรพรรณ พนาปวุฒิกุล. 2549.ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. โลหะหนักตัวการปัญหาสิ่งแวดล้อม.[Online]. Available:<http://www.chemtrack.org>. สืบค้นวันที่ 16 สิงหาคม 2556.
- วารสารสำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.ทฤษฎีการดูดซับ.[Online]. Available: <http://archive.lib.cmu.ac.th>. สืบค้นวันที่ 26 สิงหาคม 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำ**
เสียจากอุตสาหกรรม.[Online]. Available: <http://www.siweb.dss.go.th>. สืบค้นวันที่
 27 กรกฎาคม 2556.

อังคณา สุวรรณภูฏ. **กรมพัฒนาที่ดินและกรมป่าไม้. ยูคาลิปตัส ไม้ต่างถิ่น.**[Online]. Available:
<http://it.doa.go.th>. สืบค้นวันที่ 16 สิงหาคม 2556.

Analytical Chemistry. **Atomic Absorption Spectroscopy & Lead Contamination of Water.**
 [Online]. Available:
<http://faculty.virginia.edu/analyticalchemistry/AAS%20Lead/AAS%20Lead.html>.
 สืบค้น วันที่ 20 สิงหาคม 2556

Scientific & Technological Instruments Center Mae Fah Luang University. **Atomic Absorption**
Spectrophotometer AAS. [Online]. Available: <http://www.mfu.ac.th>. สืบค้นวันที่ 25
 สิงหาคม 2556





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าที่ติเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. ● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าที่ติเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ติเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล. 	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (GlasFiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนต์	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่น และ ตาม ด้วยวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Cyanide as HCN)		Pyridine Barbituric Acid
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9.ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20°C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม	Potassium Dichromate Digestion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 16.1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด
16.2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission
16.3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled
16.4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	Plasma : ICP
16.5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
16.6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
16.8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption SpectroPhotometry ชนิด
16.11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
16.12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique

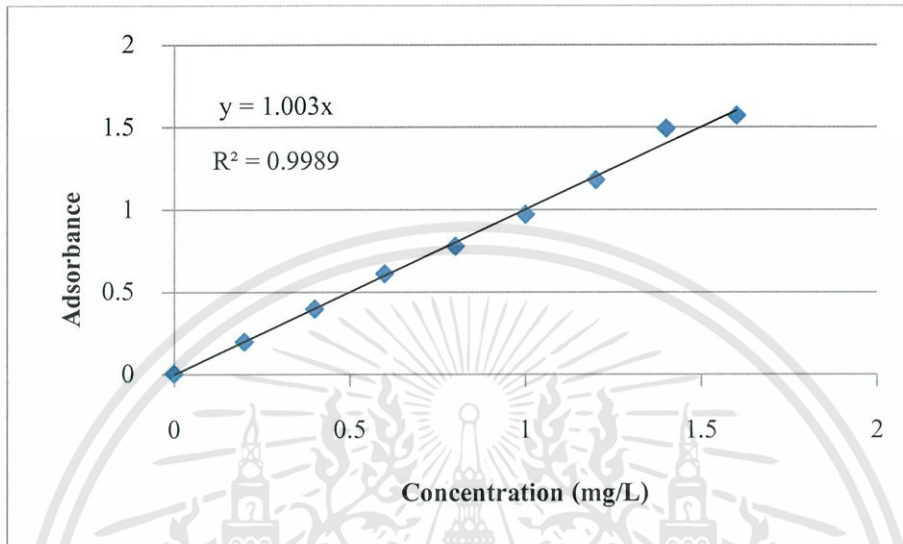
แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่จากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

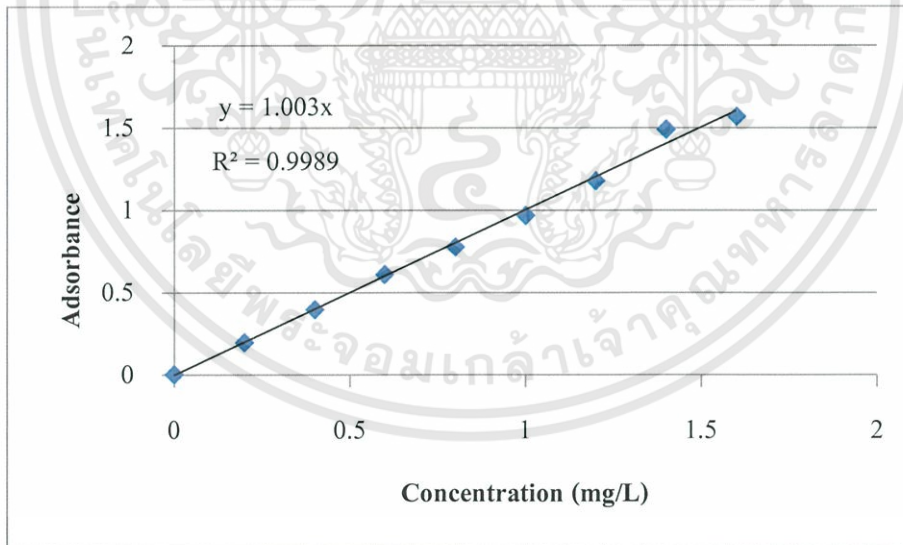
ภาคผนวก ข.

กราฟมาตรฐาน

รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสม

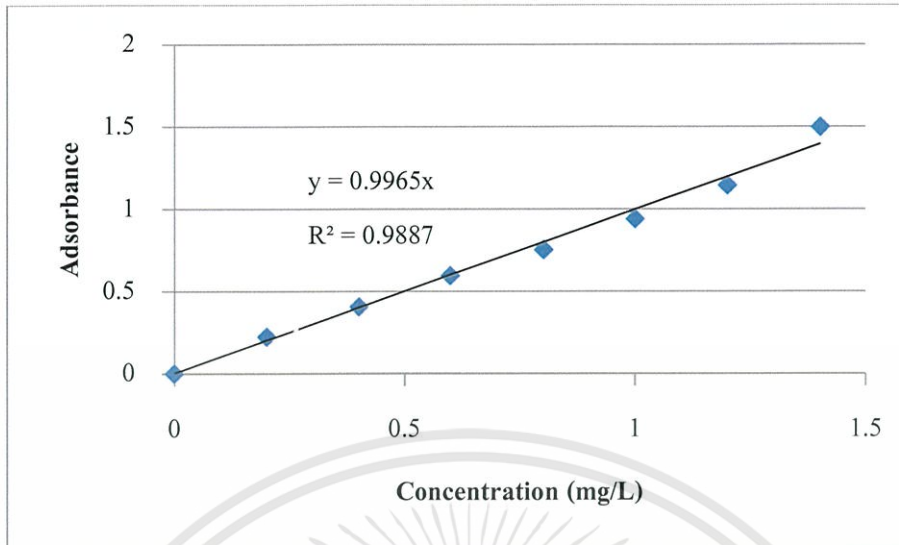


รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม

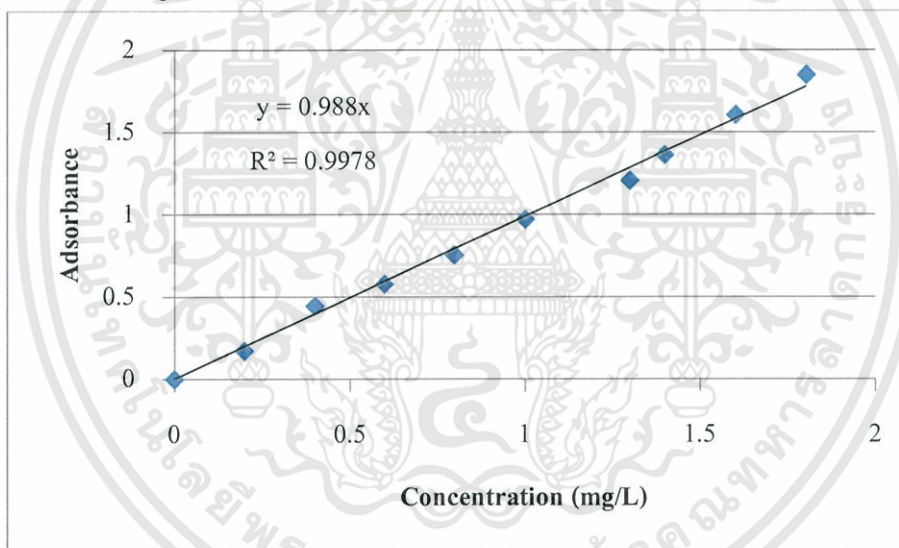


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาปริมาณน้ำหนัที่เหมาะสม

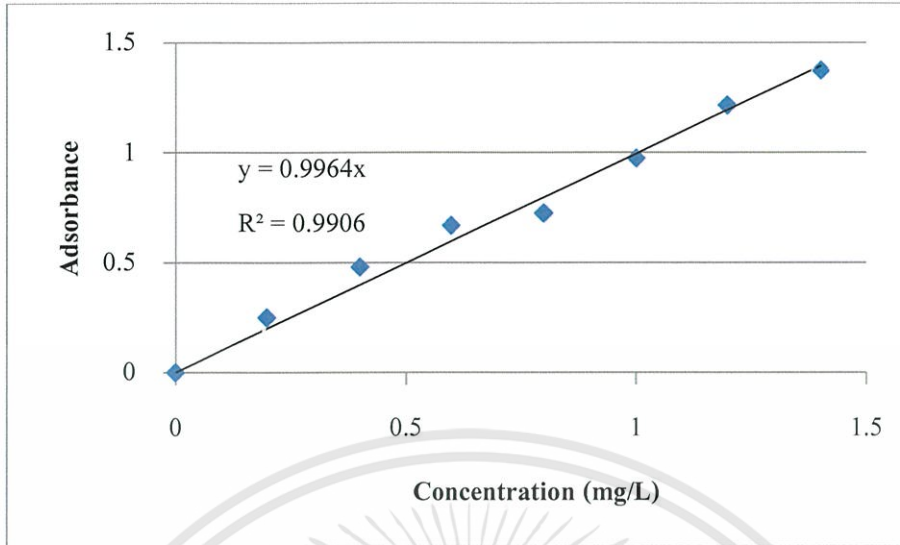


รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม

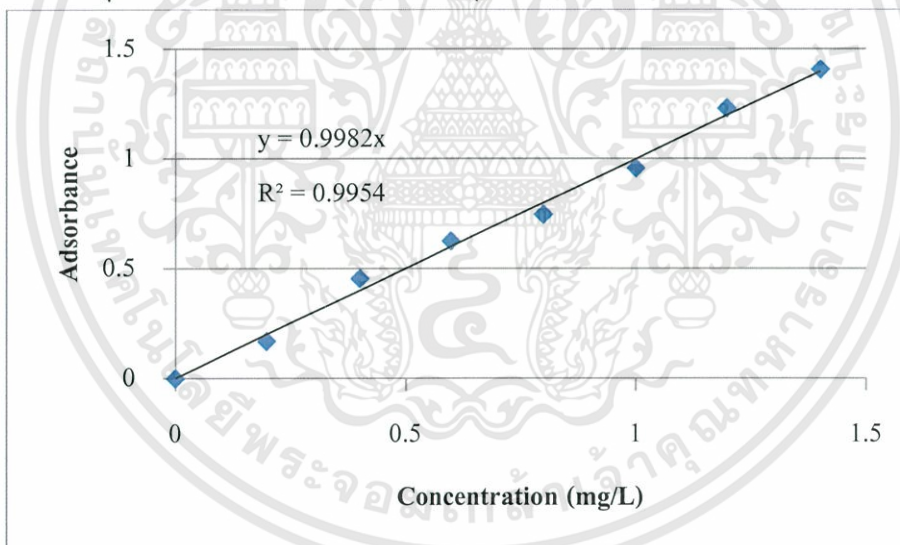


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับในสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐานสารละลายทองแดงที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงในสภาวะที่เหมาะสมและศึกษาประสิทธิภาพการคายซับขี้เลื่อยที่ผ่านการปรับปรุงและขี้เลื่อยที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ตารางแสดงผลข้อมูล

ตาราง ค.1 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีล้อยูคาลิปตัส ที่ pH=2

ครั้งที่	น้ำหนักซีล้อย (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.102	0.169	1.534	0.966	38.64	10.5
2	0.104	0.173	1.571	0.929	37.16	
3	0.104	0.184	1.673	0.827	33.08	
เฉลี่ย					37.90	

ตาราง ค.2 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีล้อยูคาลิปตัส ที่ pH=3

ครั้งที่	น้ำหนักซีล้อย (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.103	0.116	1.051	1.449	57.96	0.48
2	0.103	0.118	1.075	1.425	57.00	
3	0.102	0.098	0.890	1.61	64.40	
เฉลี่ย					57.48	

หมายเหตุ



ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.3 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลี้อยูคาลิปตัส ที่pH=4

ครั้งที่	น้ำหนักซีลี้อยู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.105	0.073	0.7540	1.7460	69.84	0.61
2	0.104	0.070	0.7238	1.7762	71.05	
3	0.105	0.071	0.7350	1.7650	70.60	
เฉลี่ย					70.50	

ตาราง ค.4 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลี้อยูคาลิปตัส ที่pH=5

ครั้งที่	น้ำหนักซีลี้อยู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.103	0.057	0.5075	1.9925	79.70	1.45
2	0.104	0.063	0.5735	1.9265	77.06	
3	0.105	0.062	0.5663	1.9337	77.35	
เฉลี่ย					78.04	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.5 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัส ที่ pH=6

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอียู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.102	0.039	0.355	2.145	85.80	0.56
2	0.105	0.037	0.334	2.166	86.64	
3	0.106	0.033	0.296	2.204	86.87	
เฉลี่ย					86.44	

ตาราง ค.6 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัส ที่ pH=7

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอียู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.107	0.028	0.255	2.245	89.80	0.93
2	0.107	0.026	0.238	2.262	90.48	
3	0.107	0.023	0.209	2.291	91.64	
เฉลี่ย					90.64	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.7 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ระยะเวลา
การดูดซับ 0 นาที

ครั้งที่	น้ำหนัก ขี้เลื่อย (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1055	0.099	0.9000	1.6000	64.00	0.70
2	0.1070	0.099	0.9066	1.5934	63.74	
3	0.1031	0.103	0.9331	1.5669	62.67	
เฉลี่ย					63.47	

ตาราง ค.8 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ขี้เลื่อยยูคาลิปตัสที่ระยะเวลา
การดูดซับ 20 นาที

ครั้งที่	น้ำหนัก ขี้เลื่อย (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1027	0.073	0.6684	1.8316	73.26	1.22
2	0.1050	0.067	0.6088	1.8912	75.65	
3	0.1047	0.069	0.6287	1.8713	74.85	
เฉลี่ย					74.59	

ตาราง ค.9 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ระยะเวลา
การดูดซับ 40 นาที

ครั้งที่	น้ำหนัก ขี้เถ้า (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1045	0.068	0.6278	1.8722	74.89	0.21
2	0.1018	0.067	0.6175	1.8825	75.30	
3	0.1055	0.068	0.6240	1.8760	75.04	
เฉลี่ย					75.08	

ตาราง ค.10 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ขี้เถ้ายูคาลิปตัสที่ระยะเวลา
การดูดซับ 60 นาที

ครั้งที่	น้ำหนัก ขี้เถ้า (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.103	0.057	0.5075	1.9925	79.70	1.45
2	0.104	0.063	0.5735	1.9265	77.06	
3	0.105	0.062	0.5663	1.9337	77.35	
เฉลี่ย					78.04	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.11 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ซีลีอูคาลิปตัสที่ระยะเวลาการดูดซับ 80 นาที

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1015	0.065	0.5956	1.9044	76.17	1.12
2	0.1045	0.061	0.5559	1.9441	77.76	
3	0.1013	0.072	0.6565	1.8435	73.74	
เฉลี่ย					76.97	

ตาราง ก.12 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ซีลีอูคาลิปตัสที่ระยะเวลาการดูดซับ 100 นาที

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1045	0.063	0.5797	1.9203	76.81	0.79
2	0.1036	0.059	0.5413	1.9587	78.35	
3	0.1021	0.060	0.5532	1.9468	77.87	
เฉลี่ย					77.68	

หมายเหตุ



ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค.13 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลายโดยใช้ซีลีอูคาลิปตัสที่ระยะเวลาการดูดซับ 120 นาที

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1044	0.065	0.5956	1.9044	76.17	0.16
2	0.1012	0.069	0.6300	1.8700	74.80	
3	0.1040	0.064	0.5903	1.9097	76.39	
เฉลี่ย					76.28	

ตาราง ค.14 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอูคาลิปตัสที่ความเข้มข้น 0 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1028	0.045	0.1780	0	-	
2	0.1055	0.014	0.097	0	-	
3	0.1043	0.007	0.048	0	-	

หมายเหตุ



ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.15 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัสที่
ความเข้มข้น 50 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีอียู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1043	0.007	0.0630	1.1887	95.10	0.70
2	0.1055	0.005	0.0450	1.2050	96.40	
3	0.1037	0.006	0.0475	1.2025	96.23	
เฉลี่ย					95.91	

ตาราง ค.16 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัสที่
ความเข้มข้น 100 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีอียู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.103	0.057	0.5075	1.9925	79.70	1.45
2	0.104	0.063	0.5735	1.9265	77.06	
3	0.105	0.062	0.5663	1.9337	77.35	
เฉลี่ย					78.04	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.17 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีเยอูกลิปต์สที่
ความเข้มข้น 200 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีเยอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1030	0.267	2.2675	2.7325	54.65	0.57
2	0.1063	0.244	2.0750	2.9250	58.50	
3	0.1032	0.249	2.1150	2.8850	57.70	
เฉลี่ย					58.10	

ตาราง ค.18 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีเยอูกลิปต์สที่
ความเข้มข้น 400 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีเยอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	0.1026	0.103	6.4375	3.5625	35.63	0.00
2	0.1025	0.108	6.7500	3.2500	32.50	
3	0.1039	0.103	6.4375	3.5625	35.63	
เฉลี่ย					35.63	

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.19 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอูยูคาลิปตัสที่

ความเข้มข้น 600 mg/L

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1030	0.025	10.4375	4.5625	30.42	2.06
2	0.1037	0.024	10.000	5.0000	33.33	
3	0.1042	0.026	11.1875	3.8125	25.42	
					31.88	

ตาราง ก.20 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอูยูคาลิปตัสที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl₂ ในสภาวะที่เหมาะสม

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.103	0.057	0.5075	1.9925	79.70	1.45
2	0.104	0.063	0.5735	1.9265	77.06	
3	0.105	0.062	0.5663	1.9337	77.35	
เฉลี่ย					78.04	

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.21 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีเยอูคาลิปตัสที่ปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl₂ และผ่านการคายซับแล้วนำมาดูดซับใหม่

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีเยอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1013	0.100	0.8675	1.6325	65.30	0.25
2	0.1006	0.115	0.9975	1.5025	60.10	
3	0.1004	0.101	0.8763	1.6237	64.95	
เฉลี่ย					65.13	

ตาราง ก.22 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีเยอูคาลิปตัสที่ไม่ปรับปรุงในสถานะที่เหมาะสม

ครั้งที่	น้ำหนักซีลีเยอู (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1022	0.141	1.3563	1.1437	45.75	1.90
2	0.1011	0.135	1.3050	1.1950	47.80	
3	0.1013	0.131	1.2613	1.2387	49.55	
เฉลี่ย					47.70	

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค.23 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลี้อยูคาลิปตัสที่ไม่ปรับปรุง และผ่านการคายซับแล้วนำมาดูดซับใหม่

ครั้งที่	น้ำหนักซีลี้อย (กรัม)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	0.1010	0.151	1.4600	1.0400	41.60	0.81
2	0.1004	0.152	1.4663	1.0337	41.35	
3	0.1015	0.152	1.4688	1.0312	41.25	
เฉลี่ย					41.40	

ตารางค.24 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลี้อยูคาลิปตัส น้ำหนัก 2.5 mg

ครั้งที่	น้ำหนักซีลี้อย (mg)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	2.5	0.230	2.0605	0.4395	17.60	3.00
2	2.5	0.258	2.2055	0.2945	11.60	
3	2.5	0.250	2.1355	0.3645	14.40	
เฉลี่ย					14.53	

ตาราง ค.25 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัส
น้ำหนัก 6.25 mg

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีอียู (mg)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	6.25	0.226	1.9299	0.5701	22.80	1.28
2	6.25	0.219	1.8960	0.6040	24.16	
3	6.25	0.229	1.9616	0.5384	21.60	
เฉลี่ย					22.85	

ตาราง ค.26 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีอียูคาลิปตัส
น้ำหนัก 12.5 mg

ครั้งที่	น้ำหนัก ซีลีอียู (mg)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณ ทองแดงที่ ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
		ค่าการ ดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่ วิเคราะห์ได้ใน สารละลาย (mg/L)			
1	12.5	0.228	1.9146	0.5854	23.42	0.43
2	12.5	0.230	1.9773	0.5227	20.91	
3	12.5	0.223	1.9065	0.5935	23.74	
เฉลี่ย					23.58	

หมายเหตุ

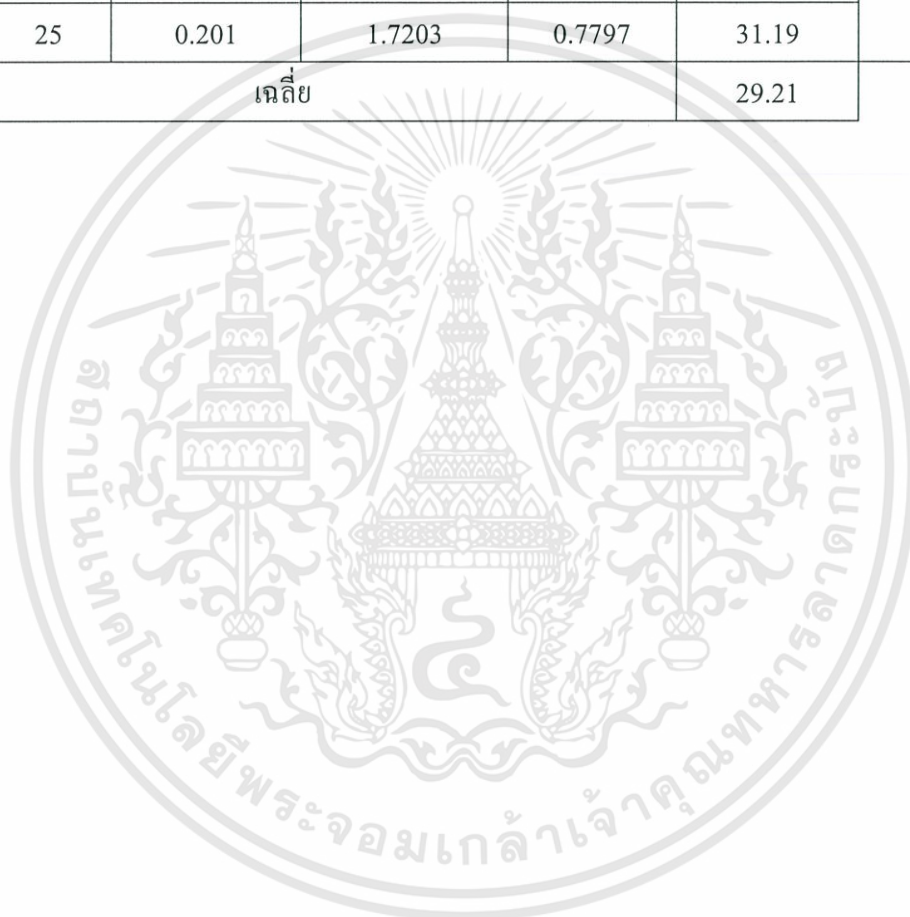


ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.27 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจากสารละลาย โดยใช้ซีลีเนียมคาลิปต์สน้ำหนัก 25 mg

ครั้งที่	น้ำหนักรูปลูกซีลีเนียม (mg)	สารละลายหลังจากการทดลอง		ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับไว้ (mg/g)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
		ค่าการดูดกลืนแสง (A)	(Cu ²⁺) ที่วิเคราะห์ได้ในสารละลาย (mg/L)			
1	25	0.230	1.8305	0.6695	26.78	2.24
2	25	0.206	1.7585	0.7415	29.66	
3	25	0.201	1.7203	0.7797	31.19	
เฉลี่ย					29.21	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากผลการทดลอง

สารดูดซับ (mg), W	0	2.5	6.25	12.5	25
Cu ²⁺ ที่เหลือในสารละลาย (mg/L), C _c	100	80.93	73.17	70.90	67.10

คำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยใช้สมการ

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

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

W = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง(kg)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ (L)

C₀ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลาย (mg/L)

C_c = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

$$q_{2.5mg} = \frac{25mL \times \frac{1L}{1000mL} (100 \frac{mg}{L} - 80.93 \frac{mg}{L})}{2.5mg} = 0.1907mg/mg$$

$$q_{6.25mg} = \frac{25mL \times \frac{1L}{1000mL} (100 \frac{mg}{L} - 73.17 \frac{mg}{L})}{6.25mg} = 0.1073mg/mg$$

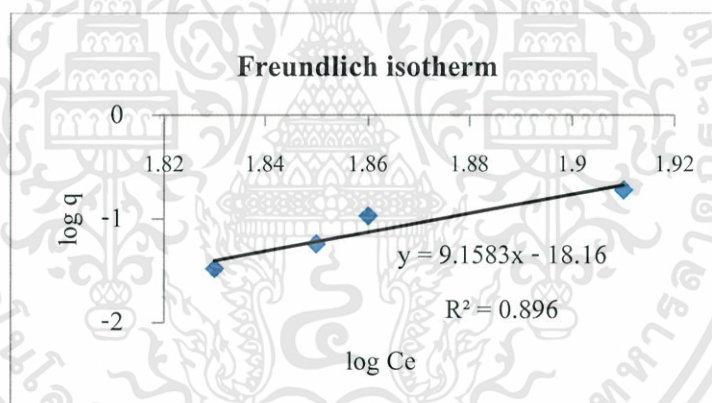
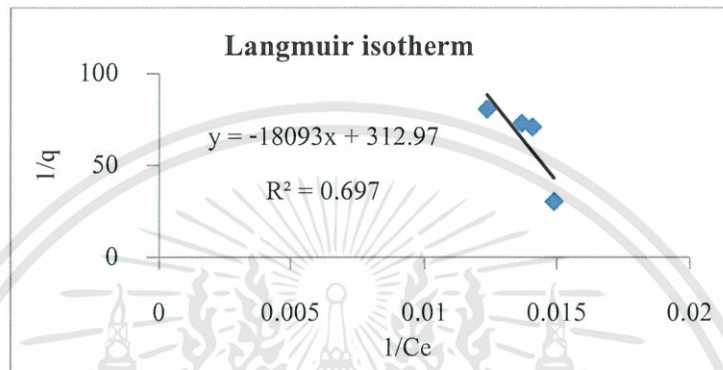
$$q_{12.5mg} = \frac{25mL \times \frac{1L}{1000mL} (100 \frac{mg}{L} - 70.90 \frac{mg}{L})}{12.5mg} = 0.0582mg/mg$$

$$q_{25mg} = \frac{25mL \times \frac{1L}{1000mL} (100 \frac{mg}{L} - 67.10 \frac{mg}{L})}{25mg} = 0.0329mg/mg$$

W (mg)	V (mL)	C ₀ (mg/L)	C _c (mg/L)	q
25	25	100	67.10	0.0329
12.5	25	100	70.90	0.0582
6.25	25	100	73.17	0.1073
2.5	25	100	80.93	0.1907
0	25	100	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Langmuir Isotherm		สมการ Freundlich Isotherm	
$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0149	30.40	1.83	-1.48
0.0141	70.92	1.85	-1.24
0.0137	72.99	1.86	-0.97
0.0124	80.65	1.91	-0.72



จากผลการศึกษาสมมุติฐานแบบจำลองของทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับตามสมการฟรุนดิช มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ แสดงว่าพฤติกรรมการดูดซับของเจี๊ยะสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองของฟรุนดิช

$$\text{จากสมการ } q = K_d(C_e)^n$$

นำมาจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงด้วยการใส่ลอการิทึมทั้งสองข้าง จะได้

$$\log q = \log K_d + n \log C_e$$

จากกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของเจี๊ยะแบบ Freundlich Isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สมการเส้นตรง $y = 9.1583x - 18.16$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ n ดังนั้น $n = 9.1583$ และ $1/n = 0.1092$

จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_d$ ดังนั้น $K_d = 10^{-18.16} = 6.92 \times 10^{-19} \text{ L/mg}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์ระยะเวลาโดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistics Package for the Social Sciences)

* Define Variable Properties.

*time.

VARIABLE LABELS time 'เวลา'.

*efficiency.

VARIABLE LABELS efficiency 'ประสิทธิภาพ'.

EXECUTE.

ONEWAY efficiency BY time

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=DUNCAN LSD ALPHA (0.05).

ตารางจ.1ผลการวิเคราะห์ One way

ANOVA					
ประสิทธิภาพ					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	422.665	6	70.444	58.469	.000
Within Groups	16.867	14	1.205		
Total	439.532	20			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ Post Hoc Tests

ตารางจ.2แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการสัมผัสโดยวิธี LSD

Multiple Comparisons							
Dependent Variable: ประสิทธิภาพ							
	(I) เวลา	(J) เวลา	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	0	0					
		20	-11.11667*	0.89622	0.0000	-13.0389	-9.1945
		40	-10.35667*	0.89622	0.0000	-12.2789	-8.4345
		60	-13.59000*	0.89622	0.0000	-15.5122	-11.6678
		80	-12.42000*	0.89622	0.0000	-14.3422	-10.4978
		100	-14.20667*	0.89622	0.0000	-16.1289	-12.2845
		120	-12.31667*	0.89622	0.0000	-14.2389	-10.3945
	20	0	11.11667*	0.89622	0.0000	9.1945	13.0389
		20					
		40	0.76	0.89622	0.4110	-1.1622	2.6822
		60	-2.47333*	0.89622	0.0150	-4.3955	-0.5511
		80	-1.30333	0.89622	0.1680	-3.2255	0.6189
		100	-3.09000*	0.89622	0.0040	-5.0122	-1.1678
		120	-1.2	0.89622	0.2020	-3.1222	0.7222

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางจ.3แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการสัมผัสโดยวิธี LSD (ต่อ)

	(I) เวลา	(J) เวลา	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	40	0	10.35667*	0.89622	0.0000	8.4345	12.2789
		20	-0.76	0.89622	0.4110	-2.6822	1.1622
		40					
		60	-3.23333*	0.89622	0.0030	-5.1555	-1.3111
		80	-2.06333*	0.89622	0.0370	-3.9855	-0.1411
		100	-3.85000*	0.89622	0.0010	-5.7722	-1.9278
		120	-1.96000*	0.89622	0.0460	-3.8822	-0.0378
	60	0	13.59000*	0.89622	0.0000	11.6678	15.5122
		20	2.47333*	0.89622	0.0150	0.5511	4.3955
		40	3.23333*	0.89622	0.0030	1.3111	5.1555
		60					
		80	1.17	0.89622	0.2130	-0.7522	3.0922
		100	-0.61667	0.89622	0.5030	-2.5389	1.3055
		120	1.27333	0.89622	0.1770	-0.6489	3.1955
	80	0	12.42000*	0.89622	0.0000	10.4978	14.3422
		20	1.30333	0.89622	0.1680	-0.6189	3.2255
		40	2.06333*	0.89622	0.0370	0.1411	3.9855
		60	-1.17	0.89622	0.2130	-3.0922	0.7522
		80					
		100	-1.78667	0.89622	0.0660	-3.7089	0.1355
		120	0.10333	0.89622	0.9100	-1.8189	2.0255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางจ.4แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการสัมผัสโดยวิธี LSD (ต่อ)

	(I) เวลา	(J) เวลา	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	100	0	14.20667*	0.89622	0.0000	12.2845	16.1289
		20	3.09000*	0.89622	0.0040	1.1678	5.0122
		40	3.85000*	0.89622	0.0010	1.9278	5.7722
		60	0.61667	0.89622	0.5030	-1.3055	2.5389
		80	1.78667	0.89622	0.0660	-0.1355	3.7089
		100					
		120	1.89	0.89622	0.0530	-0.0322	3.8122
	120	0	12.31667*	0.89622	0.0000	10.3945	14.2389
		20	1.2	0.89622	0.2020	-0.7222	3.1222
		40	1.96000*	0.89622	0.0460	0.0378	3.8822
		60	-1.27333	0.89622	0.1770	-3.1955	0.6489
		80	-0.10333	0.89622	0.9100	-2.0255	1.8189
		100	-1.89	0.89622	0.0530	-3.8122	0.0322
		120					

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางจ.5สรุปผลการวิเคราะห์

เวลา (นาที)	ผลการวิเคราะห์
0	ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกจุด
20	ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 0 60 และ 100 นาที
40	ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 0 60 80 100 และ 120 นาที
60	ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 0 40 และ 60 นาที
80 - 100	ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ.6 ผลการวิเคราะห์ Homogeneous subsets

ประสิทธิภาพ						
	เวลา	N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	
Duncana	0	3	63.47			
	40	3		73.8267		
	20	3		74.5867		
	120	3		75.7867	75.7867	
	80	3		75.89	75.89	
	60	3			77.06	
	100	3			77.6767	
	Sig.			1	0.051	0.071
	Means for groups in homogeneous subsets are displayed.					
	a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้