

การดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี  
ADSORPTION OF COPPER (II) BY CHEMICALLY MODIFIED  
POMELO PEEL

นางสาวฉวีรัตน์	ฤทธิรงค์
นางสาวมกรวี	กวยาวงศ์
นายสุทธนา	แจ้งชวณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยทางด้านหลักผู้ศร วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๖

การดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี

**ADSORPTION OF COPPER (II) BY CHEMICALLY MODIFIED**

**POMELO PEEL**

นางสาวมณีรัตน์	ฤทธิรงค์
นางสาวมกรวี	กวยาวงศ์
นายยุทธนา	แจ้งอรุณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

**ADSORPTION OF COPPER (II) BY CHEMICALLY MODIFIED  
POMELO PEEL**

**MANEERUT      LITTHIYONG  
MUKRAWI      KAWAYAWONG  
YUTTHANA      JANGAROON**

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

# การดูฉบับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี

นางสาวมณีรัตน์	ฤทธิรงค์
นางสาวมกรวี	กวยาวงศ์
นายยุทธนา	แจ้งอรุณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556



โครงการพิเศษ	การดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมณีนันท์ ฤทธิรงค์ 53051231
	นางสาวมุกกรวี กวยาวงศ์ 53051235
	นายบุษยธนา แจ็งอรุณ 53051239
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ระหว่างเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงทางเคมี การนำเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำมาดูดซับใหม่ การปรับปรุงเปลือกส้มโอทางเคมีนั้น ใช้สารเคมีดังนี้คือ  $\text{NaOH}$  และ  $\text{CaCl}_2$  ในการปรับปรุง ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับทองแดง การดูดซับจะเกิดขึ้นที่สภาวะที่ pH เท่ากับ 5, เวลาสัมผัสดำเนินการ 20 นาที, ความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำหนักส้มโอ 100 มิลลิกรัม เมื่อนำสภาวะต่างๆที่เหมาะสมมาทำการทดลองคือ ชั่งเปลือกส้มโอ 0.1 กรัมใส่บีกเกอร์จากนั้น นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 25 มิลลิลิตรที่วัด pH เท่ากับ 5 แล้วนั้น เทใส่บีกเกอร์ที่มีเปลือกส้มโอ แล้วเทลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกนำไปเขย่าที่เครื่อง 20 นาที หาเปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงได้เท่ากับ 91.03 % และ 85.33 % ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ มีเปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงเท่ากับ 40.11% และเปอร์เซ็นต์การคายซับเท่ากับ 55.10% อีกทั้งยังมีการจำลองการดูดซับของสมการ Langmuir และสมการ Freundlich มาอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอม ซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับทองแดงที่ปรับปรุงทางเคมีโดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี มีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9248

คำสำคัญ : ปรับปรุงทางเคมี, เปลือกส้มโอ, การดูดซับ, ไอโซเทอม, ทองแดง

<b>Title</b>	Adsorption of Copper (II) by Chemically Modified Pomelo Peel
<b>Students</b>	Ms.Maneerut Litthiyong Ms.Mukrawi Kawayawong Mr.Yutthana Jangaroon
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa

## ABSTRACT

The aim of this special project was to study the suitable condition to adsorb copper in synthetic wastewater by pomelo peel modified with NaOH and CaCl<sub>2</sub>. The adsorption isotherm ( Langmuir and Freundlich ), comparison of adsorption efficiency between modified and non-modified pomelo peel, desorption of copper from the modified pomelo peel were included in this study. The suitable condition to adsorb copper was at pH 5, 20 min. contact time, 50 mg/L Cu<sup>2+</sup> and 100 mg pomelo peel. The highest adsorption efficiency were 91.03% and 85.33% when using modified and non-modified pomelo peel, respectively. The percentage of desorption of copper was found to be 55.10%. The readsorption of copper in to modified pomelo peel after desorption process was about 40.11%. Freundlich isotherm was the best isotherm used to explain the adsorption (  $R^2 = 0.9248$  ).

**Keywords :** chemically modified, pomelo peel, adsorption, isotherm, copper

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สืบเนื่องมาจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ คอยช่วยเหลือ ช่วยแก้ปัญหาในด้านต่างๆ ตลอดจนการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษนี้ ออกมาเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบ ขอขอบคุณท่านอาจารย์กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์ และท่านอาจารย์ปัทมา ลิฬหาวงศ์ ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีทุกท่าน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การช่วยเหลือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณสมาชิกทุกท่านที่ร่วมแรงร่วมใจทำกันอย่างเต็มกำลัง ไม่เคยเหน็ด และขอขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อนในสาขาที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือ ทำให้โครงการพิเศษนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ สำเร็จลุล่วงด้วยดี ประโยชน์ที่บังเกิดจากโครงการพิเศษนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านด้วยความเต็มใจ

นางสาวมณีนรัตน์      ฤทธิรงค์

นางสาวมกรวี            กวยาวงศ์

นายบุษุทธนา            แจ็งอรุณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
คำย่อและสัญลักษณ์	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 ทองแดง	4
- กลไกการเกิดพิษ	4
- การแก้ไขการเกิดพิษและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ	5
2.2 กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	5
2.3 การดูดซับ	6
- หลักการ	6
- กลไกของกระบวนการดูดซับ	7
- กลไกการดูดซับ	7
- ประเภทของการดูดซับ	8
- ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ส้มโอ	11
- เส้นใยอาหาร	12
- ประเภทของเส้นใยอาหาร	12
- คุณสมบัติทางเคมีของเพกทิน	15
- สรรพคุณและประโยชน์ของส้มโอ	16
2.5 อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี	17
- หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน	17
- ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	18
2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ	20
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	27
3.1 เครื่องมือและสารเคมี	27
3.2 วิธีการทดลอง	28
A. การเตรียมวัตถุดิบเปลือกส้มโอและการคัดเลือก	28
B. การเตรียมวัตถุดิบเปลือกส้มโอที่ปรับปรุง	28
C. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	28
3.2.1 การทดสอบการดูดซับทองแดงเบื้องต้นด้วยเปลือกส้มโอสีขาว สีเขียว และเปลือกผสม	29
3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง ด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง	29
3.2.2.1 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	29
3.2.2.2 ศึกษาหาค่าเวลาที่เหมาะสม	30
3.2.2.3 ศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ $\text{Cu}^{2+}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	31
3.2.4 ศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่	31
3.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอ ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง	32
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>33</b>
4.1 การเลือกใช้ส่วนประกอบของเปลือกส้มโอ	33
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง ด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง	34
4.2.1 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	34
4.2.2 ศึกษาหาค่าเวลาที่เหมาะสม	35
4.2.3 ศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม	36
4.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ $\text{Cu}^{2+}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ	37
4.4 การศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่	39
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอ ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง	40
4.6 การศึกษา Isotherm	41
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>45</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>48</b>
ภาคผนวก ก	51
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง	61
ภาคผนวก จ	64
ภาคผนวก ฉ	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างในการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี	9
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างปริมาณเพกทินที่มีอยู่ในพืชผักผลไม้	16
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอแต่ละส่วนที่จะใช้เลือกทดลอง	33
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การใช้วัสดุที่ผ่านการดูดซับครั้งแรก การนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และเปอร์เซ็นต์การคายซับ โดยใช้กรดHCl	39
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของ Isotherm	41
ตารางที่ 4.4 ผลของสมการ Freundlich Isotherm	42
ตารางที่ 4.5 ผลของสมการ Langmuir Isotherm	43
ตารางที่ ก.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	51
ตารางที่ ก.2 ค่าที่ยอมรับได้ของโลหะหนักให้มีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	53
ตารางที่ ข.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง	54
ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	55
ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เหมาะสม	57
ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม	58
ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม	59
ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองหาค่าการดูดซับ และการคายซับด้วยเปลือกส้มโอ ที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ผ่านการปรับปรุง	60
ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้	61
ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองปริมาณสารดูดซับและ $Cu^{2+}$ ที่เหลือในสารละลาย	64
ตารางที่ จ.2 ผลการทดลองของ Isotherm	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ จ.3 ผลของสมการ Freundlich Isotherm	67
ตารางที่ จ.4 ผลของสมการ Langmuir Isotherm	68

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	13
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผนังเซลล์พืช (plant cell wall structure) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ เซลลูโลสและเพกทิน	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเพกทิน	15
รูปที่ 2.4 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer	19
รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ	22
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (%)	34
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (นาที) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	35
รูปที่ 4.3 การหาค่าน้ำหนักเปลือกส้มโอต่อปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม	36
รูปที่ 4.4 การหาค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับทองแดง ด้วยเปลือกส้มโอ	38
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง 40	
รูปที่ 4.6 กราฟไอโซเทอม Freundlich Isotherm ของการดูดซับทองแดงที่ได้จากการทดลอง	42
รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอม Langmuir Isotherm ของการดูดซับทองแดงที่ได้จากการทดลอง	43
รูปที่ ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงที่ได้จากการทดลอง 54 กับ ค่าการดูดกลืนแสง	
รูปที่ ฉ.1 กราฟระหว่าง pH กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	69
รูปที่ ฉ.2 กราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	70
รูปที่ ฉ.3 กราฟระหว่างน้ำหนักเปลือกส้มโอต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 25 มิลลิลิตร กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	70
รูปที่ ฉ.4 กราฟระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัม/ลิตร) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	71

## คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
ppm	ความเข้มข้นหนึ่งในล้านส่วน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
g	กรัม
Mw	มวลโมเลกุล
m	น้ำหนักผงเปลือกส้มโอ
mg	มิลลิกรัม
mL	มิลลิลิตร
min	นาที
h	ชั่วโมง
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
CaCl <sub>2</sub>	แคลเซียมคลอไรด์
HCl	กรดไฮโดรคลอริก
pH	ระดับความเป็นกรด-ด่าง
°C	องศาเซลเซียส
%	เปอร์เซ็นต์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องด้วยปัจจุบันนี้โลหะหนักมีการปนเปื้อนอย่างแพร่หลายในน้ำเสียอุตสาหกรรม ซึ่งโลหะหนักมีหลายชนิด อาทิเช่น Cr Pb Cd Fe และ Cu เป็นต้น จากที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายในอดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า สารปนเปื้อนหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆที่ไหลออกมานั้นมีการปนเปื้อนสารจำพวกไอออนของโลหะหนัก ทองแดงเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่พบมากในน้ำเสียอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เกิดจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น การผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืช การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยเฉพาะในแหล่งน้ำ แต่ถึงอย่างไรนั้นทองแดงก็มีความจำเป็นต่อร่างกาย สิ่งมีชีวิต ถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสม แต่ถ้าได้รับทองแดงในปริมาณมากกว่า 2 ppm จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย สิ่งมีชีวิต อันตรายถึงขั้นเสียชีวิต (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

การกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ โดยทั่วไปวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ วิธีทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้วัสดุทางธรรมชาติเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียและทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ในสารละลาย เมื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก็จะช่วยให้ น้ำเสียที่ปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะมีความสะอาดมากขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการลดต้นทุนการกำจัดโลหะหนักที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (MATHEICKAL J.T., YU Q., WOODBURN G.M., 1999) ด้วยเหตุผลนี้จึงได้เลือกใช้เปลือกส้มโอมาเป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีและยังเป็นส่วนประกอบของเซลล์ลูไลส เพกทิน(กรดกาแล็กทูโรนิน) เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอีกด้วย โดยส่วนประกอบเหล่านี้จะช่วยพองพองฟูฟุ้งกันที่มีขั้วต่างๆไว้รวมทั้งกรดคาร์บอกซิลิก กรดฟีนอลิกที่เกี่ยวข้องในพันธะโลหะ และพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องในการกำจัดโลหะหนัก แต่วิธีนี้ก็ยังคงเป็นตัวดูดซับอย่างจำกัด เนื่องมาจากการชะล้างของสารอินทรีย์ เช่น ลิกนิน แทนนิน เพกทิน และเซลลูโลส จะรวมกับสารละลายทำให้ยังไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะหนักอย่างแท้จริง (TING Y.P., PRINCE I.G., LAWSON F., 1991) จึงมีการปรับปรุงเปลือกส้มโอโดยการตัดแปลงทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคลอไรด์ นำมาช่วยเป็นตัวดูดซับ เมื่อนำ

โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสมาบำบัดกับเปลือกส้มโอจะทำให้ความสามารถในการเชื่อมยึดติดกันระหว่างโลหะหนักกับเปลือกส้มโอมีมากขึ้น (ANNADURAI A., JUANG R.S., LEE D.J., 2002)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการนำวัสดุธรรมชาติที่หาง่ายตามท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง โดยศึกษาการดูดซับโลหะทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับส้มโอที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ในน้ำเสียด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี
- 1.2.2 เพื่อศึกษา Isotherm ของการดูดซับ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความสามารถในการนำเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่
- 1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ระหว่างเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทดสอบการดูดซับเบื้องต้นของส้มโอในส่วนเปลือกสีเขียว สีขาว และเปลือกผสม เพื่อเลือกส่วนที่ดูดซับโลหะได้ดีที่สุดไปทดลองต่อไป
- 1.3.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอ โดยแปรผันค่า pH (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) เวลาสัมผัส (0, 20, 40, 60, 80, 120, 150 นาที) น้ำหนักต่อปริมาตร (2.5, 6.25, 12.5, 25, 50, 100 มิลลิกรัมต่อ 25 มิลลิลิตร)
- 1.3.3 ศึกษา Isotherm ของการดูดซับ ทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich
- 1.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยแปรผันความเข้มข้นดังนี้ 0, 50, 100, 200, 400 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 1.3.5 ทำการคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำกลับมาดูดซับใหม่ด้วยสภาวะการดูดซับแบบเดิม
- 1.3.6 ใช้เปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงมาดูดซับโดยใช้สภาวะเดียวกับเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกันระหว่างวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงของเสียให้มีคุณภาพมากขึ้น
- 1.4.3 สามารถแก้ปัญหาคารปนเปื้อนของน้ำเสียจากทองแดง โดยใช้วัสดุธรรมชาติ
- 1.4.4 ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.4.5 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะอื่นต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทองแดง (Massaro, Edward J., Ed., 2002)

ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 63.546 มีเลขอะตอมเท่ากับ 29 จัดอยู่ในธาตุโลหะทรานซิชัน เป็นสมาชิกของธาตุหมู่ II B ในตารางธาตุ มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuF}$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{CuFeS}_2$  เป็นต้น ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดีรองจากเงิน ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชต่างๆ การทำสีย้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การดื่มน้ำ การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อ

### กลไกการเกิดพิษ (Vom Himmel Kommt., Zum Himmel Steigt., *et al.*, 2002)

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กระบวนการภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสิ้นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

### การแก้ไขการเกิดพิษและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

- ผิวหนัง ควรสวมเสื้อผ้าที่รัดกุมและมีเครื่องป้องกันร่างกาย ก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทุกครั้ง เมื่อสารพิษถูกผิวหนังรีบล้างออกด้วยสบู่และน้ำสะอาด ถ้าสารพิษกระเด็นหรือหกเปื้อนเสื้อผ้า ต้องรีบเปลี่ยนเสื้อผ้าทันที แล้วล้างผิวด้วยสบู่และน้ำสะอาด จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาล

- ตา ควรมีเครื่องป้องกันสายตาที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสาร (ไม่ควรสวม Contact lens ขณะทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมี) เมื่อสารพิษกระเด็นเข้าตา ต้องรีบล้างออกด้วยน้ำสะอาด จำนวนมากสลับกับการค่อยๆ กระทบตาขึ้น-ลง จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

- การหายใจ เมื่อหายใจรับเอาสารเข้าไปเป็นจำนวนมาก ต้องรีบเคลื่อนย้ายผู้ได้รับสารออกจากบริเวณนั้น ไปสู่บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ถ้าหยุดหายใจให้รีบทำการผายปอด (mouth-to-mouth) แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

- การกลืนกินสารพิษ รีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

## 2.2 กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (วิจิตร บุญยะโหดระ, 2539)

เนื่องจากน้ำเสียมมีสิ่งสกปรกต่างๆ มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในรูปของแข็งและสารละลาย ดังนั้นกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยทั่วไปจึงประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยๆ หลายกระบวนการ โดยกระบวนการย่อยเหล่านี้จำแนกออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. กระบวนการทางกายภาพ (physical process) ประกอบด้วย
  - การดักด้วยตะแกรง (screening)
  - การทำให้ลอยตัว (floating)
  - การตกตะกอน (sedimentation or precipitation)
  - การแยกสิ่งแขวนลอยออกจากน้ำโดยแรงเหวี่ยง (centrifugation)
  - การกรอง (filtration)
2. กระบวนการทางเคมี (chemical process) ประกอบด้วย
  - การทำให้เป็นกลางโดยการเติมกรดหรือเบส (neutralization)

- การทำให้ตกตะกอนโดยการเติมสารเคมี (precipitation)
  - ออกซิเดชัน รีดักชัน หรือรีดอกซ์ (redox)
  - การทำให้อนุภาคแขวนลอยรวมตัวเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น โดยวิธีทางเคมี (chemical coagulation)
3. กระบวนการทางชีวภาพ (biological process) ประกอบด้วย
- กระบวนการใช้ออกซิเจนหรืออากาศ (aerobic process) ซึ่งวิธีนี้อาจเป็นแบบ oxidation pond, aerated lagoons, activated sludge, trickling filters และ biological disc filters เป็นต้น
  - กระบวนการไร้ออกซิเจนหรืออากาศ (anaerobic process) ซึ่งอาจเป็นแบบบ่อกักไร้อากาศ (anaerobic lagoons) การย่อยแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) และการสัมผัสแบบไร้อากาศ (anaerobic contact)
4. กระบวนการทางฟิสิกัลเคมีกัล (physical-chemical process) ประกอบด้วย
- การดูดซับโดยใช้ผงถ่าน (carbon adsorption)
  - การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)
  - ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis)

### 2.3 การดูดซับ (Adsorption) (พินล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2528)

#### หลักการ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อ

การควบคุม มีประสิทธิภาพดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อยและไม่มีการปนเปื้อน

#### กลไกของกระบวนการดูดซับ (Pradthana, 2008)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่แก๊สหรือสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) แก๊ส (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface)

ในการดูดซับ โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลืออยู่น้อยเพราะ โมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### กลไกการดูดซับ (กรองกาญจน์ ภูระรัตน์, 2530)

กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Bulk transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) จากสารละลาย (Bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือ โมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 (Film transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle transport หรือ Pore transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

### ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

#### 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

#### 2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างในการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1.ค่าความร้อนของการดูดซับ	<20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2.อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4.การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5.การดูดซับบนแก๊ส ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6.พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7.รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

ที่มา: Pradthana (2008)

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด แบ่งเป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ แอกลิวเทด ซิลิกา และสารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับกับ โมเลกุล หรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทนี้มีขีดจำกัด
2. ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 m<sup>2</sup>/g
3. ประเภทสารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษ ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินพวกนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 m<sup>2</sup>/g

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (Ryan W. and Radford C., 1987)

### 1. ขนาด รูปร่าง และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ขนาดของวัสดุ มีผลต่อพื้นที่ผิวเฉพาะมาก โดยขนาดวัสดุของสารดูดซับนั้นยังมีขนาดเล็กกลง ก็จะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงขึ้น รูปร่างของวัสดุ ก็มีผลเช่นเดียวกัน สำหรับวัสดุชนิดเดียวกัน ที่มีปริมาตรเท่ากัน รูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวเฉพาะน้อยที่สุด เมื่อกดให้แบนลง พื้นที่ผิวเฉพาะจะเพิ่มขึ้น และรูปร่างแบบเข็มมีพื้นที่ผิวมากที่สุด นอกจากนั้นแล้ว รอยแตกหรือรูพรุนที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ ก็จะมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวเฉพาะของวัสดุเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้วัสดุบางชนิด เช่น ซิลิกาที่สกัดได้จากซีเมนต์กลบ ซึ่งมีความละเอียดสูงและมีรูพรุนอยู่ในเนื้อมาก แม้น้ำหนักน้อย แต่มีพื้นที่ผิวที่สูง ความสามารถในการดูดซับจึงมีสูง (สุรศักดิ์ ไวกยวงศ์สกุล, 2545)

### 2. ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorption)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายในสารละลายอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย เมื่อการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย ยังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมความสามารถในการดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับความสามารถในการดูดซับ

### 3. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ในสารละลาย ซึ่งมีไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนที่สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง นอกจากนี้ ค่าพีเอชยังมีผลต่อค่าการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

#### 4. เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียตามโรงงานอุตสาหกรรม จะต้องใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการที่จะกำจัดโลหะหนักต่างๆ ออกไปให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับด้วย โดยระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมนั้น จะต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริง

#### 5. น้ำหนักของสารดูดซับ

น้ำหนักของสารดูดซับนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยจะทำให้เกิดความสามารถในการดูดซับที่ต่างกัน ซึ่งน้ำหนักของสารดูดซับถ้าน้ำหนักมาก ความสามารถในการดูดซับก็จะมีมากในทางตรงกันข้าม ถ้าสารดูดซับนั้นมีน้ำหนักน้อย ความสามารถในการดูดซับก็น้อยลงเช่นกัน ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงแปรผันกับน้ำหนักของสารดูดซับ

#### 6. ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ คือ ยิ่งมีความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะยิ่งลดลง ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายแปรผกผันกับความสามารถในการดูดซับ

### 2.4 ส้มโอ (Pomelo) (Sudarat Homhual, 2546)

ส้มโอ เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางในตระกูลเดียวกับส้ม มีชื่อสามัญในภาษาอังกฤษว่า Pomelo ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษาดัตช์ pampelmoose ซึ่งแปลตรงตัวว่า ส้มที่ลูกเท่าฟักทอง แหล่งกำเนิดอยู่ในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Citrus grandis* (L.) Osbeck จัดอยู่ในวงศ์ Rutaceae ส้มโอจัดว่าเป็นไม้ผลเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทย นิยมปลูกทางภาคตะวันตกของประเทศ ส้มโอมีวิตามินและเกลือแร่มากมายเช่น วิตามินซี ฟอสฟอรัส แคลเซียม กรดอินทรีย์ โมโนเทอร์ปีน และในส้มโอมีสารที่ช่วยต้านมะเร็งได้ด้วย

ลักษณะภายนอกของส้มโอ ผลรูปทรงกลมหรือรูปแป้น เส้นผ่าศูนย์กลาง 11-17 ซม. บริเวณขั้วผลนูนขึ้นเป็นกระจุก ผลอ่อนมีสีเขียวพอกแก่มีสีเขียวอมเหลือง เปลือกผลหนา 1-2 ซม. ผิวผลเรียบ มีต่อมน้ำมันมาก ข้างในมีเยื่อสีขาวหรือสีชมพู ลักษณะหยาบนุ่มรสหวานหรือขมเล็กน้อยเนื้อผลที่เป็นถุงน้ำ เปลือกผล มีรสขมฝื่อน ปรา่ หอมร้อน

### เส้นใยอาหาร (Dietary Fiber)

เส้นใยอาหารคือส่วนที่กินได้ของพืชโดยเฉพาะผักและผลไม้ ซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบของเปลือก ราก ใบ ลำต้น หรือเยื่อหุ้มเมล็ดของเมล็ดธัญพืชชนิดต่างๆ หรือคาร์โบไฮเดรตซึ่งประกอบไปด้วยโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) resistant starches สารประกอบอื่นๆ เช่น พอลิฟีนอล (polyphenol) และลิกนิน (lignin) ซึ่งทนต่อการย่อยและการดูดซึมภายในลำไส้มนุษย์ เส้นใยอาหารไม่มีสารอาหารและไม่ให้พลังงาน แต่มีบทบาทสำคัญต่อภาวะโภชนาการและสุขภาพ ส่วนกากใย (crude fiber) คือ ส่วนที่เหลือของเซลล์พืชจากการย่อยด้วยกรดและเบส ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าเส้นใยอาหารประมาณ 1.6-15.7 เท่า (วิชัย ตัน ไพจิตร, 2522)

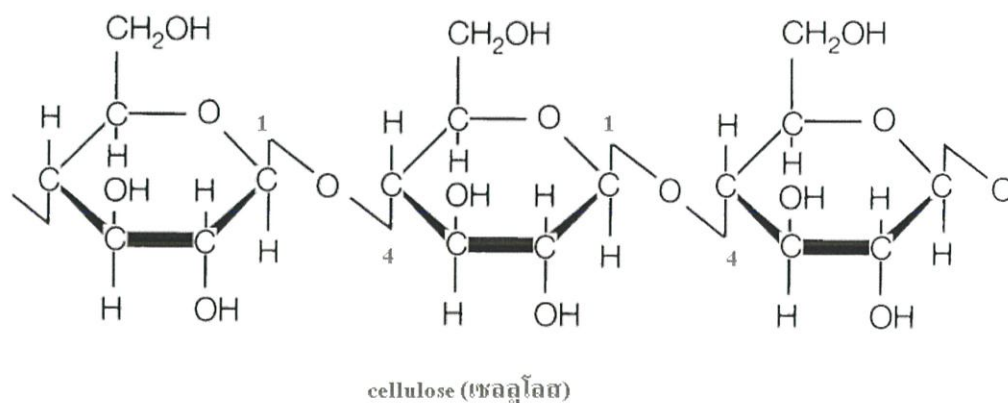
### ประเภทของเส้นใยอาหาร (Jimenez-Escrig and Sanchez-Muniz, 2000)

แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามความสามารถในการละลายน้ำ ได้แก่

1) เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber) ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวตินและเวกซ์ มีรายละเอียดดังนี้

#### 1.1 เซลลูโลส

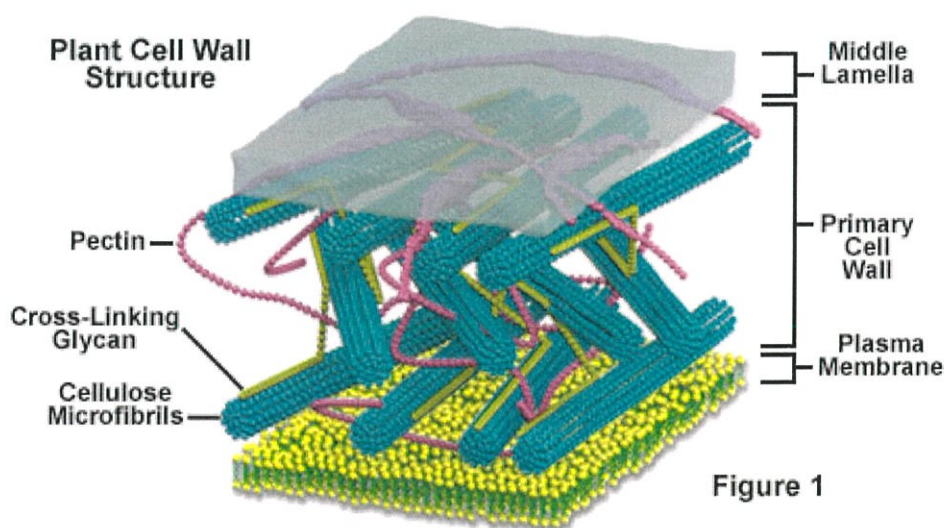
เซลลูโลสเป็นสายพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่ต่อกันแบบเบต้า 1,4 เป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลักของพืชทั่วไป โดยเฉพาะผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาวและแข็งแรง ในอาหารจำพวกผักและธัญพืชจะมีปริมาณเซลลูโลสถึงร้อยละ 20-50 ของน้ำหนักแห้ง และเซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ที่มา: พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ (2010)

เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช เช่น ผัก ผลไม้ และ เมล็ดธัญพืช ดังรูปที่ 2.2 โดยอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และเพกทิน เซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ และสัตว์กระเพาะเดี่ยว



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผนังเซลล์พืช (plant cell wall structure)

ที่มา: Michael W. Davidson (1995)

## 1.2 เฮมิเซลลูโลส

โครงสร้างหลักประกอบด้วยกลุ่มของน้ำตาลหลายชนิด โดยน้ำตาลกลุ่มใหญ่สุดจะเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว เช่น น้ำตาลไซโลส (xylose) นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลกลุ่มอื่นที่ต่ออยู่กับโครงสร้างหลัก เช่น น้ำตาลกลูโคส เป็นต้น

ความแตกต่างกันของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้ในสารละลายด่างอ่อน ส่วนเซลลูโลสไม่สามารถละลายได้ ในพืชสามารถพบเฮมิเซลลูโลสอยู่ร่วมกับเพกทินแทรกอยู่ในชั้นของผนังเซลล์

## 1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยมีสูตรโมเลกุล  $C_{49}H_{52}O_{14}$  มักพบรวมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบในพืชจำพวกไม้เนื้อแข็ง เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลแอลกอฮอล์ที่มีรูปร่างเป็นวงแหวน เช่น ซินนามิล (cinnamyl) เป็นต้น หน้าที่ของลิกนินจะช่วยให้ความแข็งแรงและทนต่อการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย

## 1.4 คิวตินและแวกซ์

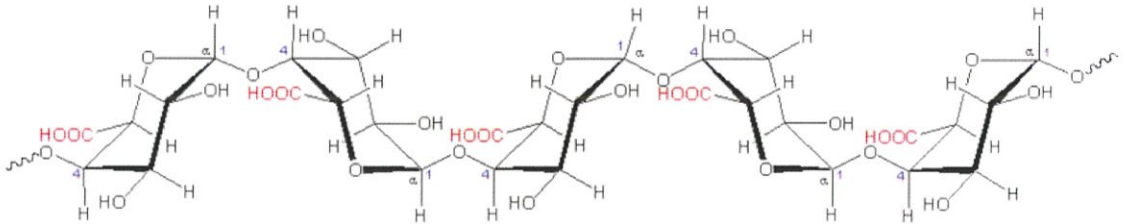
พบร่วมกับส่วนที่เป็นโครงสร้างของพืช โดยมีองค์ประกอบของไขมันที่ไม่รวมกับน้ำ ปกติจะพบในปริมาณที่น้อย

2) เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fiber) ประกอบด้วย เพกทิน เบต้ากลูแคน และกัมชนิดต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.1 เพกทิน (Pectin)

โครงสร้างเป็นสายพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) ที่ต่อกันแบบแอลฟา 1,4 โดยมีน้ำตาลหลายชนิดที่อยู่รวมกันในโครงสร้างหลัก เช่น น้ำตาลกาแล็กโทส น้ำตาลกลูโคส เป็นต้น การละลายน้ำของเพกทินขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ของกรด

กาเล็กทูโรนิก เพกทินสามารถพบได้ในพืชตระกูลส้ม เป็นต้น สามารถดูโครงสร้างทางเคมีของเพกทินประกอบได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเพกทิน

ที่มา: Liondelyon (2005)

#### คุณสมบัติทางเคมีของเพกทิน (พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์, 2551)

สารกลุ่มเพกทินเป็น โพลีแซกคาไรด์เชิงซ้อนในพืช พบในพืชชั้นสูงโดยปรากฏในชั้นระหว่างเซลล์หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังเซลล์ ทำให้เกิดช่องสำหรับอาหารและน้ำผ่านในผนังเซลล์ สารกลุ่มเพกทินเป็นสารเคลือบเส้นใยเซลลูโลสที่สำคัญและอาจเชื่อมต่อกับพันธะโควาเลนต์กับโพลีเมอร์อื่นๆ สารกลุ่มเพกทินจัดจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ โพรโตเพกทิน กรดเพกตินิก และกรดเพกติก เพกทินมีอิทธิพลต่อพัฒนาการการเจริญไปถึงการแก่ชรา และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชและผลไม้

มีการใช้เพกทินอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารด้วยคุณสมบัติในการก่อรูปเป็นเจล โดยใช้เป็นสารก่อเจลและความคงตัวในแอม เยลลี่ และผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยว ผิวของผลพืชตระกูลส้ม กากผลแอปเปิ้ล และลำต้นของซูการ์บีต เป็นแหล่งที่ดีของเพกทิน สามารถเปรียบเทียบตัวอย่างปริมาณของเพกทินที่มีอยู่ในพืชผักผลไม้ได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างปริมาณเพกทินที่มีอยู่ในพืชผักผลไม้

ชนิดพืช	ปริมาณเพกทิน (%)	ชนิดพืช	ปริมาณเพกทิน (%)
ถั่วลันเตา	5.98	มะนาว	2.90
ส้มเขียว	3.90	ส้ม	2.36
ถั่วเหลือง	3.45	แครอท	2.00

ที่มา: พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์ (2551)

## 2.2 เบต้ากลูแคน

ประกอบด้วยสายของน้ำตาลกลูโคสที่ต่อกันแบบเบต้า 1,3 และเบต้า 1,4 คุณสมบัติทั่วไปสามารถละลายน้ำได้ มีเพียงส่วนน้อยที่ไม่สามารถละลายน้ำ พบได้ในข้าวโอ๊ต ข้าวบาร์เลย์

## 2.3 กัมชนิดต่างๆ

- วุ้น (Agar) เป็นมิวซิเลจ (Mucilage) ที่ได้จากสาหร่าย โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย Sulfanoated polymer ของ Anhydrogalactose น้ำตาลกาแล็กโทสที่อยู่ในรูป D และ L น้ำตาลไซโลส

- คาราจีแนน (Carrageenan) โครงสร้างเป็นสายพอลิเมอร์ของ Sulfanoated galactose

สรรพคุณและประโยชน์ของสัมนโอ (Chuanquin, 2011)

- ใบ เป็นยาแก้ปวดข้อ ท้องอืดแน่น แก้ปวดหัว

- ดอก แก้ปวดกระเพาะอาหาร แก้ปวดกระบังลม ขับเสมหะ ขับลม

- ผล แก้เมาสุรา ขับลมในลำไส้และกระเพาะอาหาร ทำให้เจริญอาหารเหมาะสำหรับสตรีมีครรภ์เบื่ออาหาร ปากไม่สู้รสอาหาร

- เปลือกผล เป็นยาขับลม ช่วยขับเสมหะ แก้ไอคัดแน่นหน้าอก ไอ จุกแน่น ปวดท้องน้อย ไล่  
เลื่อน หรือคัมน์น้ำอาบแก้คัน ไล่ตำพอกฝี

- เมล็ด แก้ไล่เลื่อน แก้ปวดท้อง ไล่ไล่เด็กหัดตัวผิดปกติ

- ราก แก้หวัด แก้ไอ แก้ปวด ปวดท้องน้อยและกระเพาะอาหาร ไล่เลื่อน

## 2.5 อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2535)

### หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน

เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอันใดอันหนึ่ง โดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานที่แตกต่างกัน จึงมีค่าการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกันด้วย ยกตัวอย่างเช่น อะตอมของโลหะโซเดียมจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร เพราะแสงที่ความยาวคลื่นนี้จะเป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น Spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

สเปกตรัม(Spectrum) คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ถูกดูดกลืนกับความยาวคลื่น

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy) เป็นการศึกษากระบวนการซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของอะตอมอิสระที่ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่ง

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) คือ เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษากระบวนการการดูดกลืนแสงของอะตอมอิสระที่ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่ง

## ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) คือ อุปกรณ์ที่ให้แสงในความยาวคลื่นจำเพาะสำหรับธาตุที่ทำกรวิเคราะห์ โดยแหล่งกำเนิดแสงของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เรียกว่า Hollow Cathode Lamp (HCL)

2. ส่วนที่กระตุ้นให้ธาตุดังกล่าวกลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer) คือ ส่วนที่ทำให้ธาตุดังกล่าวเกิดการแตกตัวกลายเป็นอะตอมอิสระ โดยการใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งแบ่งตามกระบวนการให้ความร้อนออกได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

1) กระบวนการที่ทำให้ธาตุดังกล่าวแตกตัวเป็นอะตอมอิสระโดยใช้เปลวไฟ (Flame Atomization) เป็นการทำให้อะตอมแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (Flame) ที่เหมาะสม โดยสารตัวอย่างนั้นจะต้องเป็นสารละลายที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีสารแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรือสารอินทรีย์ก็ได้

กระบวนการ Atomization นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. Nebulization เป็นกระบวนการการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ (mist) ด้วยเครื่องที่เรียกว่า nebulizer

2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆของสารละลายรวมกันเป็นหยด ไม่สามารถลอยอยู่ในอากาศได้ จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)

3. Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆของสารละลายเกิดการผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel) และออกซิเจน (oxidant) ใน chamber ของ nebulizer

4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองขนาดเล็กนั้นถูกกำจัดออกไป เกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ของสารประกอบ และขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ

5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเปลวไฟ โดยที่พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะไปทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เป็นโมเลกุล และเกิดเป็นอะตอมอิสระ

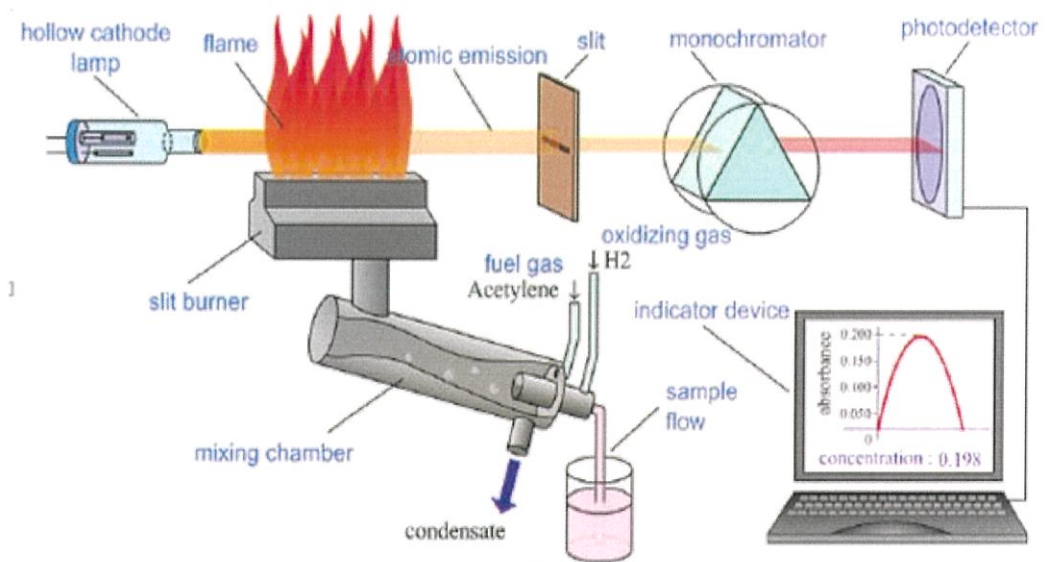
2) กระบวนการที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยความร้อนจากไฟฟ้า (Flameless/Graphite Furnace Atomization) เป็นการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrothermal Atomizer หรือ Graphite Furnace) โดยสามารถเลือกโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผามีค่าต่างกันได้ และใช้เวลาต่างกันได้

3. ส่วนทำหน้าที่คัดแยกแสง (Monochromator) โดยทำหน้าที่คัดแยกแสงให้ได้ตามความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการ

4. ส่วนตรวจวัดแสง (Detector) คือ ส่วนที่รับและแปลงสัญญาณจากแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

5. เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data System and Read-out Units)

ส่วนประกอบของเครื่อง AAS จะแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer มาก ต่างกันเฉพาะส่วนที่ 1) และ 2) เท่านั้น นอกนั้นทำงานเหมือนกัน



รูปที่ 2.4 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ที่มา: Goh Wan Yu Elton (2010)

## 2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) (จิตาภา ชัยศรีสมุทร และคณะ, 2552)

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมของการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

### 1. ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งของค่าความร้อนของการดูดซับที่เท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (1)

$$q_c = Q^\circ b C_c / (1 + b C_c) \quad \text{-----(1)}$$

เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

$C_c$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q^\circ$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

$b$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

หรือ  $C_c/q_c = 1/bQ^\circ + C_c/Q^\circ \quad \text{-----(2)}$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_c/q_c$  กับ  $C_c$  จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน  $C_c/q_c$  เป็น  $1/bQ^\circ$  และมีความชันเท่ากับ  $1/Q^\circ$

## 2. ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลาย ดังสมการ (3)

$$q_c = X/m = k_f C_c^{1/n} \text{-----}(3)$$

เมื่อ  $C_c$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

$X/m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$K_f$  และ  $n$  = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากสมการฟรุนดิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_c = \log X/m = \log k_f + (1/n) \log C_c \text{-----}(4)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_c$  ที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้กราฟเส้นตรง จุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า  $k_f$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$

บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_c$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรุนดิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารที่ถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

## 3. ไอโซเทอมแบบบรูนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)

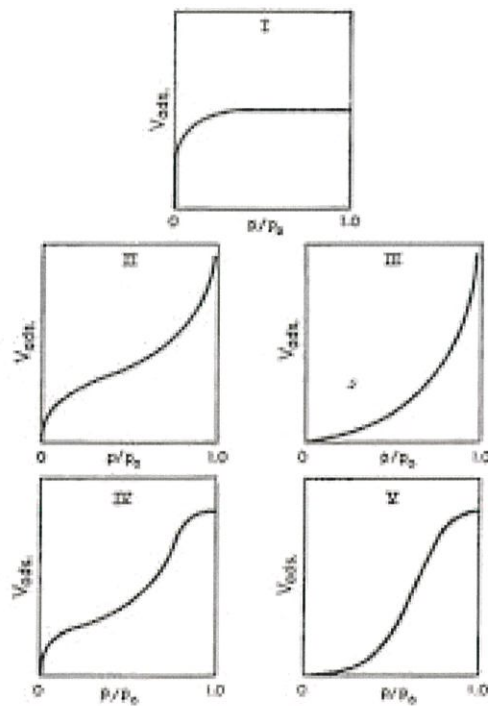
ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ ในปี ค.ศ. 1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอ ดังสมการ (5)

$$P \cdot P_0 / (P_0 - P) = 1/V_0 k + P/P_0 \text{-----}(5)$$

เมื่อ  $P$  = ความดันสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ

- V = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
- $V_0$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
- $P_0$  = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
- k = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ

ที่มา: จิตภา ชัยศรีสมุทร และคณะ (2552)

แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอึดตัวที่แน่นอน โดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว

แบบ II และ III เป็นไอโซเทอมที่สารดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้ เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว จนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II

แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)

แบบ V เป็นไอโซเทอมที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Ping Xin Sheng, Kin Ho Wee, Yen Peng Ting (2008)

เป็นการศึกษาการดูดซับโลหะหนักทองแดง(II) โดยใช้ชีวมวลของสาหร่ายทะเลมาทำการตรึงโลหะหนักทองแดง การดูดซับจะมีการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในการแก้ปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและดีอีกทางหนึ่งในการกำจัดโลหะหนัก เมื่อระหว่างการทดลองกระบวนการดูดซับพีเอช มีค่าสูงขึ้น ทองแดงมีความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้อัตราการดูดซับโดยชีวมวลก็เพิ่มมากขึ้นด้วย มีความสัมพันธ์ในทางบวกคือ แนวโน้มในทางที่ดี ต้องใช้ชีวมวล 3-5 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดโลหะหนักทองแดง

### 2. Godea F., Atalay E.D., Pehlivan E. (2008)

การศึกษากระบวนการดูดซับของโครเมียม จากสารละลายบนชี้เลี้ยงจากไม้สนแดง ชี้เลี้ยงถูกเก็บรวบรวมจากอุตสาหกรรมไม้ของเสี่ยและทำการปรับปรุงชี้เลี้ยงโดยใช้สารเคมีบำบัดทำให้ชี้เลี้ยง

มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีมากขึ้น หูดูดซับจลนศาสตร์ได้รับการทดสอบโดยใช้สมการของกราฟ Freundlich Isotherms กระบวนการดูดซับปัจจุบันนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C สภาวะพีเอชที่เหมาะสมคือที่ พีเอช 3 ใช้เวลาในการที่ขี้เลื่อยปรับปรุงสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์เวลาที่ดียที่สุดคือ 120 นาที การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นหนึ่งในกลไกที่สำคัญสำหรับกระบวนการในการดูดซับ ไอออนของ โลหะหนักที่มีผลร้อยละของการกำจัดโครเมียมสูงสุดที่พีเอช 3 กระบวนการดูดซับความจุช่วง 8.3-22.6 มก./ กรัม เป็นวิธีทางเลือกในการกำจัดโลหะหนักโดยที่ใช้ต้นทุนต่ำ เป็นการลดต้นทุน ซึ่งมี ประสิทธิภาพสามารถใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

### 3. Kessara Jitniyom<sup>1</sup>, Anchalee Suddhiprakarn<sup>1</sup> and Irb Kheoruenromne (2010)

การศึกษา การดูดซับ ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ของสมเมกไทต์ ปริมาณการดูดซับ โลหะหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณสมเมกไทต์ที่มีอยู่ในกลุ่มอนุภาคดินเหนียว โดยการเพิ่มค่าพีเอช สามารถเพิ่มการดูดซับ โลหะหนักให้สูงขึ้น ชนิดและปริมาณ โลหะหนักในสารละลายจะเป็นปัจจัยการ สกัดความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักของสมเมกไทต์ ค่าวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็น ถึงความแตกต่างของปริมาณการดูดซับของ โลหะหนักแต่ละชนิด และสภาพทางเคมีของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะค่าพีเอชของดิน และความเข้มข้นของ โลหะหนัก และปริมาณของสมเมกไทต์ในกลุ่มอนุภาค ขนาดดินเหนียว สามารถใช้เป็นปัจจัยครรชนี ในการประเมินความเป็นพิษของ โลหะหนักใน สภาพแวดล้อมของดินได้

### 4. Elsevier B.V. และคณะ (2004)

ศึกษาการกำจัด โลหะหนักทองแดงออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกของต้น ไม้ในประเทศ อินเดีย ประสิทธิภาพของการกำจัด โลหะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลาย ชนิดของ เปลือกไม้และเวลาที่ใช้สัมผัสกัน การกำจัด โลหะทองแดงโดยใช้เปลือกไม้ดิบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และสามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 65-78% ที่ pH ในช่วง 4-5 สารละลายที่ผ่านการกำจัด โลหะทองแดงแล้วจะมีสีอันเนื่องมาจากสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในเปลือกไม้ดิบนั้น ซึ่งจะ ทำให้สารละลายนี้มีค่า BOD และ COD สูง รวมทั้งมีปริมาณธาตุคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ ในปริมาณ สูงอีกด้วย แล้วด้วยเหตุนี้จึงควรมีปรับสภาพของเปลือกไม้ดิบก่อนการใช้งานหรือไปใช้เป็นวัสดุใน

การดูดซับโลหะหนัก ด้วยกระบวนการทางเคมีหรือชีวภาพ การปรับปรุงสภาพนี้จะทำให้สารประกอบอินทรีย์บางส่วนถูกสกัดออกไปรวมทั้งทำให้ความจุและประสิทธิภาพของการเกิดคีเลต (chelating) ของเปลือกไม่มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 5. อรพิน โทนเดียว (2552)

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแปรผันค่าพีเอชที่ 2 3 4 5 6 และ 7 ระยะเวลาการปั่นกวนที่ 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 75 100 150 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่พีเอช 5 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของทองแดงคือที่พีเอช 6 ระยะเวลาในการปั่นกวน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่า การดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดิช สำหรับทองแดงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะให้สูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เมื่อนำกากชาไปใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมพบว่ากากชาสามารถบำบัดไอออนของสังกะสีและทองแดงจากน้ำที่ดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน และจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าการดูดซับที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักคือ สมการการดูดซับของฟรุนดิช

#### 6. กิตติพจน์ (2005)

ศึกษาการลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือ ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณเบนโทไนด์ ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของสารละลาย และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในสารละลายโลหะหนักชนิดเดียวและชนิดผสม ผลการศึกษาพบว่าเบนโทไนด์สามารถดูดซับโลหะนิกเกิล สังกะสีและแมงกานีสได้ โดยที่ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการสัมผัส ปริมาณเบนโทไนด์ ค่าความเป็นกรด

ค่าเริ่มต้นของสารละลาย ประเภทของโลหะหนัก และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในสารละลายโลหะหนักชนิดเดียวและชนิดผสม จากผลการทดลองจะพบว่า เบนโทไนด์จะเข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง และปริมาณเบนโทไนด์ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 2 กรัม โดยที่ความสามารถในการดูดซับนิกเกิลสูงสุด อยู่ที่พีเอช 4 และที่พีเอช 5 สำหรับการดูดซับสังกะสีและแมงกานีส รวมถึงสารละลายโลหะหนักชนิดผสมด้วย จากผลการศึกษาที่กล่าวมา พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักชนิดเดียวด้วยเบนโทไนด์จะมีค่ามากกว่า 99% ซึ่งจะสูงกว่าการดูดซับโลหะหนักชนิดผสม ทั้งนี้เนื่องจากในสารละลายชนิดผสม จะเกิดการแข่งขันของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในสารละลาย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักลดลง ในส่วนของแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่า การดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด จะมีความสัมพันธ์กับแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดลิช และ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักด้วยเบนโทไนด์ พบว่า โลหะหนักทั้ง 3 ชนิด มีลำดับความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ นิกเกิล > สังกะสี > แมงกานีส

#### 7. สัมพันธ์ สร้อยกล่อม และคณะ (2550)

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยสารสกัดจากเปลือกส้มโอ สกัดด้วยกรดซิตริก 3% w/v ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที โดยใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การได้ผลผลิต (% yield) ดีที่สุดคือใช้ เอทานอลความเข้มข้น 95% v/v โดยมีค่าเท่ากับ 62.19% และเปอร์เซ็นต์การได้ผลผลิตน้อยที่สุดเมื่อใช้เอทานอลเข้มข้น 85% v/v ซึ่งได้ 48.79 % นำสารสกัดที่ได้ทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก คือ  $Pb^{2+}$  และ  $Cr^{6+}$  วิเคราะห์โดย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พบว่า สารสกัดที่ดูดซับโลหะหนัก  $Pb^{2+}$  และ  $Cr^{6+}$  ที่ดีที่สุด คือเพกทินที่สกัดจากเปลือกส้มโอแล้วตกตะกอนด้วยเอทานอลเข้มข้น 75% v/v ที่ปริมาณเพกทิน 2.5 กรัม เวลา 20 นาที ดูดซับได้ 46.34 ppm และสารสกัดที่ดูดซับโลหะหนัก  $Cr^{6+}$  ได้ดีที่สุด ปริมาณเพกทิน 0.5 กรัม เวลา 5 นาที ดูดซับได้ 62.87 ppm

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่อง pH-meter ยี่ห้อ Denver instrument model 250
- 2) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer precisely รุ่น AAnalyst 200 (AAS-200 new)
- 3) เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker) ยี่ห้อ Julabo รุ่น SW1
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Percisa 205A
- 5) ตู้อบสาร (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM400 ประเทศเยอรมนี
- 6) เครื่องกรองลดความดัน ยี่ห้อ EYELA (Tokyo rikakikai co.,Ltd.) รุ่น Aspirator A-35
- 7) เดซิกเคเตอร์

##### 3.1.2 สารเคมี

- 1) คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท LOBA Chemie ประเทศอินเดีย
- 3) ไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส
- 4) แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
- 5) กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส
- 6) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 20% เกรดวิเคราะห์ บริษัท APS Ajax Finechem ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 7) เอทานอล 95% เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส

##### 3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ขวดวัดปริมาตร
- 2) ลูกยาง
- 3) กระจกบอกลง
- 4) บีกเกอร์
- 5) แท่งแก้วคนสาร
- 6) ขวดรูปชมพู่

- 7) ขวดพลาสติก
- 8) ปิเปต
- 9) หลอดหยดสาร
- 10) กรวยกรอง
- 11) ซ้อนตักสาร
- 12) กระจกนาฬิกา
- 13) กระจกชั่ง
- 14) อะลูมิเนียมฟรอยด์
- 15) ตะแกรงร่อน ขนาด 50 เมช ASTM E 11 บริษัท Endecotts Ltd ประเทศอังกฤษ

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### A. การเตรียมวัสดุดิบเปลือกส้มโอและการคัดเลือก

ในการเตรียมวัสดุที่จะใช้ทดสอบนั้น ได้นำเปลือกส้มโอมาคัดหรือหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ โดยแยกส่วนของเปลือกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนเปลือกสีเขียว ส่วนเปลือกสีขาว และส่วนเปลือกผสม จากนั้นนำเปลือกส้มโอแต่ละส่วนที่ได้ไปตาก แล้วยำไปอบที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้แห้ง จึงนำมาบดแล้วร่อนให้มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า  $0.45\text{ mm}$  นำอนุภาคที่ได้คือเปลือกส้มโอบดในแต่ละส่วนมาทดสอบการดูดซับตามข้อ 3.2.1

#### B. การเตรียมวัสดุดิบเปลือกส้มโอที่ปรับปรุง

ซึ่งส่วนเปลือกที่ดีที่สุดมา 100 กรัม จุ่มลงไปนในสารละลายที่ประกอบไปด้วย  $\text{NaOH } 0.5\text{ mol/L}$  ปริมาตร 250 mL  $\text{CaCl}_2$   $1.5\text{ mol/L}$  ปริมาตร 250 mL และเอทานอล 95% ปริมาตร 500 mL แช่ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยำมากรองล้างด้วยน้ำกลั่นจนได้ pH 7 จากนั้นเอาไปทำให้แห้งเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อทำการทดลองต่อไป

#### C. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ซึ่งคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 3.9271 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่น เดิมกรดไนตริก 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร

### 3.2.1 การทดสอบการดูดซับทองแดงเบื้องต้นด้วยเปลือกส้มโอสีขาว สีเขียว และเปลือกผสม

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่บดแล้วทั้ง 3 ส่วนคือ ส่วนเปลือกสีเขียว ส่วนเปลือกสีขาว และ ส่วน เปลือกผสม มาอย่างละ 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปต  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับ pH ให้เป็น 5 พร้อมใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 7) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS
- 8) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง

#### 3.2.2.1 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้วมา 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปต  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับ pH ให้เป็น 2 พร้อมใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) ทำเหมือนเดิมตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่ปรับ pH ให้เป็น 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ
- 6) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 7) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 8) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS
- 9) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.2.2 ศึกษาหาค่าเวลาที่เหมาะสม

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้วมา 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) บีเบต  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับค่า pH ให้เป็น pH ที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.1 พร้อมใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 0, 20, 40, 60, 80, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ
- 6) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 7) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS
- 8) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.2.3 ศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้วมา 2.5, 6.25, 12.5, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) บีเบต  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับค่า pH ให้เป็น pH ที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.1 ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.2
- 6) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 7) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS
- 8) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ $\text{Cu}^{2+}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้วมา 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปต  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 0, 50, 100, 200, 400 และ 600 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับค่า pH ให้เป็น pH ที่เหมาะสมจากการในข้อ 3.2.2.1 ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.2
- 6) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 7) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS
- 8) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.4 ศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่

- 1) ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงแล้วมา 0.3 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2) ปิเปต  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 75 มิลลิลิตร
- 3) วัดค่า pH ก่อนการทดลองทุกครั้ง จากนั้นปรับค่า pH ให้เป็น pH ที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.1 ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 1)
- 4) เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดด้วยพาราฟิล์ม
- 5) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที โดยใช้เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 3.2.2.2
- 6) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองวอท์ชแมน
- 7) นำส่วนใสไปวัดค่าวิเคราะห์หาคอปเปอร์ ด้วยเครื่อง AAS ส่วนตะกอนนำเก็บไว้
- 8) ส่วนตะกอนที่เก็บไว้ นำไปทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$
- 9) จากนั้นนำกากตะกอนที่ดูดซับและทำให้แห้งแล้วในข้อ 8) ชั่งมา 0.2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร และเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมล/ลิตร ปริมาตร 750 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นนำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที
- 10) ทำเหมือนข้อ 6) ถึงข้อ 7)

- 11) ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆรอบ เพื่อเป็นการล้างกรดออก แล้วนำไปทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 80 °C
- 12) จากนั้นนำกากตะกอนที่ได้จากข้อ 11) ชั่งมา 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 13) ปิเปต  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ข้อ 12)
- 14) ทำเหมือนข้อ 3) ถึงข้อ 7)
- 15) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

### 3.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลอง 3.2.4 โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมของ pH, เวลา, น้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้น ในการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มโอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงแทน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 การเลือกใช้ส่วนประกอบของเปลือกส้มโอ

จากการทดลองวิเคราะห์การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่บดละเอียดนำมาเป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพ สามารถแยกส่วนประกอบของเปลือกส้มโอที่บดละเอียดแยกออกมาได้ 3 ส่วน คือ ส่วนเปลือกสีเขียว ส่วนเปลือกสีขาว และส่วนเปลือกผสม (มีทั้งเปลือกสีเขียวและสีขาว) โดยจะเลือกเอาเปลือกส่วนสีขาวไปเป็นวัสดุในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งดูจากตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ที่สามารถดูดซับทองแดงได้ดีที่สุด เท่ากับ 55.09 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สภาวะในการดูดซับที่มีน้ำหนักส้มโอ 0.1 กรัม pH เท่ากับ 5 เวลาที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัม/ลิตร จึงเลือกใช้ส่วนเปลือกสีขาวมาเป็นวัสดุดูดซับแล้วนำส่วนเปลือกสีขาวไปปรับปรุงทางเคมีก่อนนำไปทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่ด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง

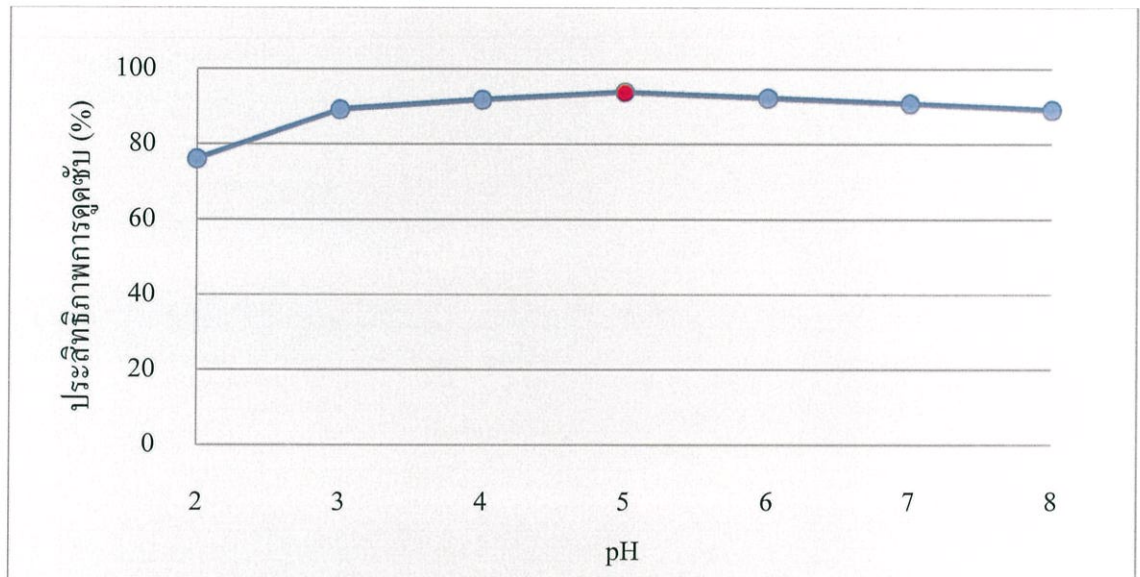
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอแต่ละส่วนที่จะใช้เลือกทดลอง

ส่วนประกอบของเปลือกส้มโอ	เปอร์เซ็นต์ที่สามารถดูดซับทองแดงได้ (%)
ส่วนเปลือกสีเขียว	50.03
ส่วนเปลือกสีขาว	55.09
เปลือกผสม (มีทั้งเปลือกสีเขียวและสีขาว)	51.2

## 4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง

### 4.2.1 ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

จากการศึกษาหาประสิทธิภาพของการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้ส้มโอส่วนเปลือกสีขาวที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ชั่งมา 0.1 กรัม ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปรับค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ดังนี้ 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 เพื่อหา ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง แล้วนำมานำมาเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในทุก pH ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



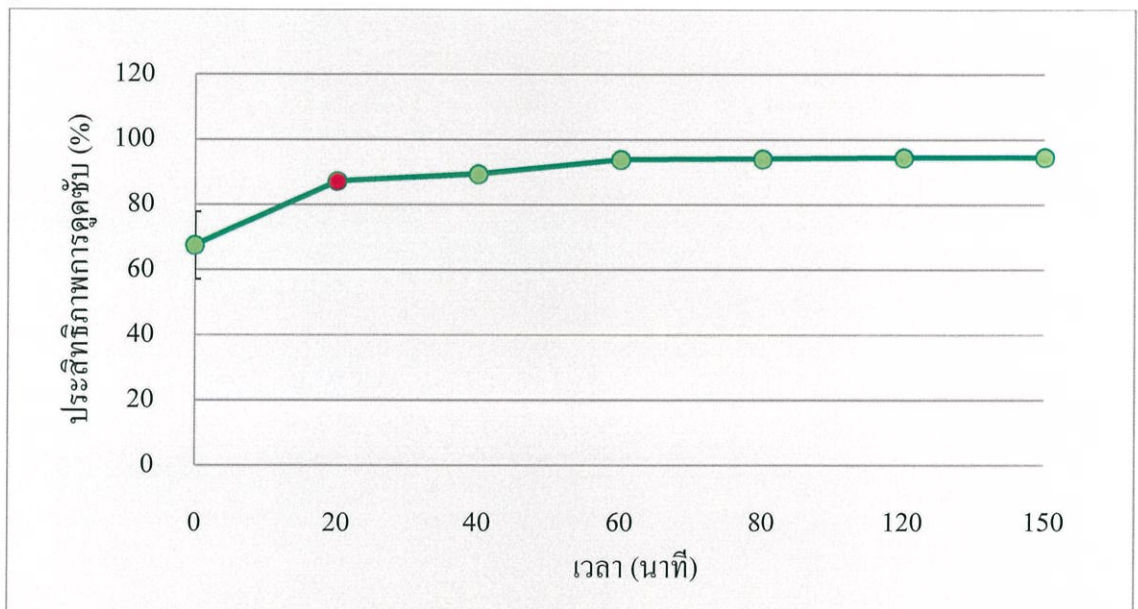
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (%)

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (%) โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม pH 2 ไปถึง pH 5 เปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ pH 5 ได้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงคือ 93.78 % เนื่องจากส่วนของเพกทิน ที่อยู่ในเปลือกส้มโอจะสามารถเกิดเป็นเจลในสภาวะที่มีความเป็นกรดที่เหมาะสม ดังนั้นจะทำให้เพกทินสามารถจับกับไอออนของ  $\text{Cu}^{2+}$  ไว้ได้โดยจะทำการจับกับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วต่างๆไว้ได้ โดยเฉพาะไอออนของโลหะหนัก ส่วนในสภาวะที่เป็นกลางถึงสภาวะที่เป็นเบสจะทำให้สารที่อยู่ในเปลือกส้มโอไม่สามารถไปจับไอออนที่มีขั้วของโลหะได้เพราะเพกทินจะไม่สามารถเป็นเจลไปดูดจับไอออนได้ (MATHEICKAL J.T., *et al.*, 1999), (TING Y.P., *et al.*, 1991), (ANNADURAI A., *et al.*, 2002) จากการทดสอบโดยใช้โปรแกรม SPSS ช่วงความเชื่อมั่น 95% ที่ pH 3, 4 และ 5 ไม่มีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติข้อมูลใกล้เคียงกัน เลือกใช้ pH 5 เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับที่มากกว่า

#### 4.2.2 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25 mL โดยใช้สภาวะที่ pH 5 และใช้เปลือกส้มโอส่วนเปลือกสีขาวที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ชั่งมา 0.1 กรัม นำมาเขย่าด้วยเครื่องที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที โดยแปรผันที่เวลา 0, 20, 40, 60, 80, 120 และ 150 นาที เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



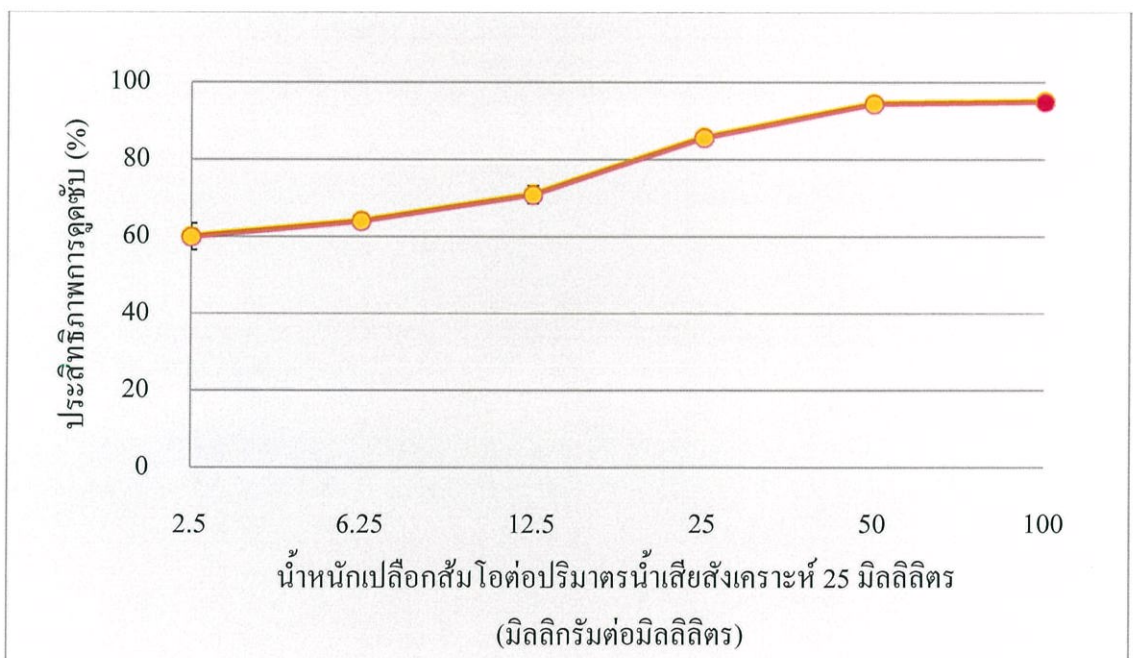
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (นาที) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

รูปที่ 4.2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา (นาที) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%) จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มเวลาจะทำให้เปลือกส้มโอมีระยะเวลาในการที่  $\text{Cu}^{2+}$  จะเข้าจับกับเพกทินได้มากขึ้น แต่เมื่อถึงเวลา 60 นาที จากกราฟจะเห็นว่าที่เวลานี้วัสดุดูดซับจะเริ่มคงที่และเริ่มไม่ไปจับกับ  $\text{Cu}^{2+}$  เพราะ  $\text{Cu}^{2+}$  ได้เข้าไปแทนที่ในผิวของเปลือกส้มโอทำให้ไม่สามารถดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ได้อีก (ANNADURAI A., et

al., 2002), (Ryan W. and Radford C., 1987) และเหตุที่เลือกใช้เวลา 20 นาที เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไป ถึง 40 นาที แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ไม่ต่างกันนัก เมื่อเทียบกับ เวลา 20 นาที ทำให้เป็นการประหยัดเวลา และไม่เสียเวลาในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  ในเวลาที่ 20 นาที จะมี ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 87.1 % ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะมีแนวโน้มที่ดี ตั้งแต่เวลาที่ 20 เป็นต้นไปจนถึง 150 นาที จึงเลือกเวลาที่ 20 นาทีใช้ในการทดลองต่อไป

#### 4.2.3 ศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 25 mL โดยใช้สภาวะที่ pH 5 และใช้เปลือกส้มโอส่วนเปลือกสีขาวที่ผ่านการ ปรับปรุงแล้ว ชั่งมา โดยทำการแปรผันน้ำหนักของเปลือกส้มโอเป็น 2.5, 6.25, 12.5, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง นำมาเขย่าด้วยเครื่องที่ ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที ใช้เวลา 20 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



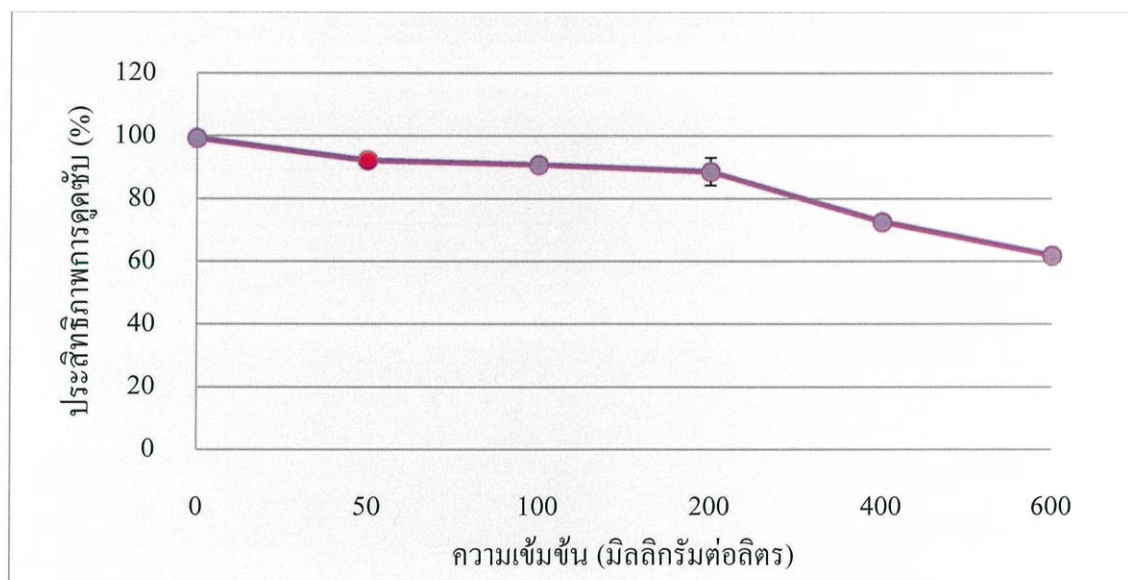
รูปที่ 4.3 การหาค่าน้ำหนักเปลือกส้มโอต่อปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของการศึกษาหาค่าน้ำหนักเปลือกส้มโอต่อปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักของเปลือกส้มโอต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ส่งผล

ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น เมื่อใส่ปริมาณเปลือกส้มโอ 100 มิลลิกรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 25 มิลลิตรจะมีค่าเท่ากับ 95.03 % ดูจากกราฟจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้นตามปริมาณของเปลือกส้มโอที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ยังเท่าเดิมคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เลยทำให้วัสดุดูดซับที่มีปริมาณมากกว่า มีโอกาสเข้าไปจับกับ  $\text{Cu}^{2+}$  มากขึ้น จากการนำค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่น้ำหนัก 2.5 ถึง 50 มิลลิกรัม ในช่วงความเชื่อมั่น 95% มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนน้ำหนักส้มโอ 50 ถึง 100 มิลลิกรัม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เลือกใช้น้ำหนัก 100 มิลลิกรัมเนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับที่มากกว่า

#### 4.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของ $\text{Cu}^{2+}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยแปรผันค่าความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  0, 50, 100, 200, 400 และ 600 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ปริมาตร 25 mL โดยใช้สภาวะที่ pH 5 และใช้เปลือกส้มโอส่วนเปลือกสีขาวที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ชั่งมา 0.1 กรัม นำมาเขย่าด้วยเครื่องที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที ใช้เวลา 20 นาที ทำการศึกษาความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อหาผลของค่าความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีผลต่อการดูดซับทองแดงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การหาค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มโอ

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  จาก 0 ไปถึง 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงในขณะที่เพิ่มความเข้มข้น เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากในระยะแรกความเข้มข้นของสารละลายต่ำ ทำให้เปลือกส้มโอสามารถเข้าไปจับไอออนของ  $\text{Cu}^{2+}$  ได้สูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อยๆ แแต่ยังใช้เปลือกส้มโอที่เป็นวัสดุดูดซับเท่าเดิมคือ 0.1 กรัม ทำให้เปลือกส้มโอไม่สามารถจับกับ  $\text{Cu}^{2+}$  ได้หมด นั้นเพราะความเข้มข้นที่สูงเกินไป โดยเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 92.29 % จากการทดสอบโดยใช้โปรแกรม SPSS พบว่าที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นที่ 95 % ที่ความเข้มข้น 50 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติข้อมูลมีความใกล้เคียงกันส่วนจากความเข้มข้นที่ 200 ถึง 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เลือกใช้ความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่น้อยและเริ่มมีค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ดี

#### 4.4 การศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำให้สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ pH 5 ทำการศึกษาโดยใช้ส้อมโอส่วนเปลือกสีขาที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ชั่งมา 0.3 กรัม นำมาแช่ที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อหาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่

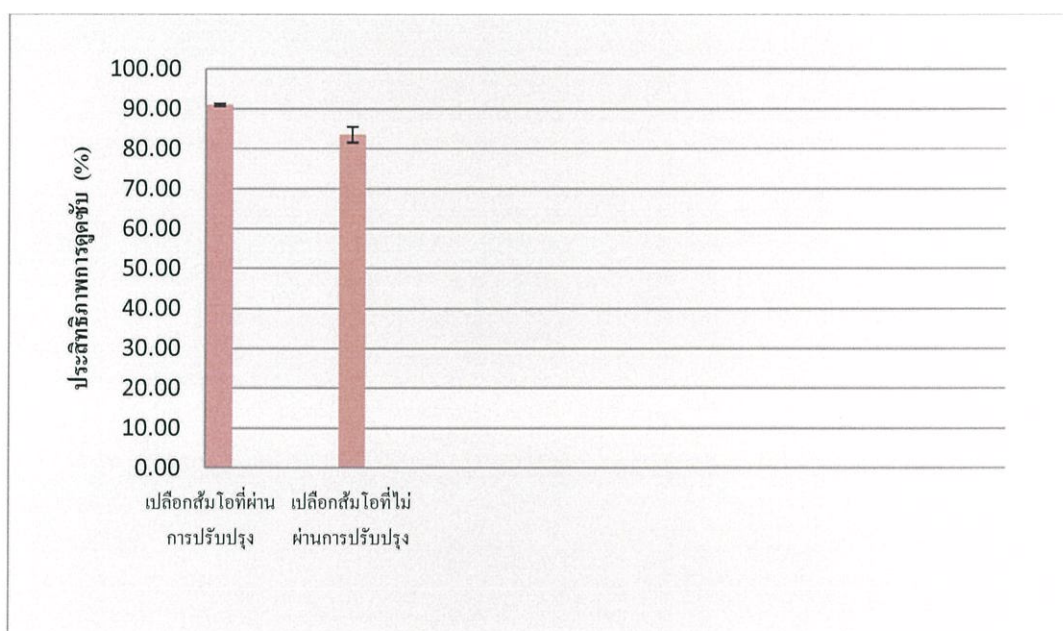
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การใช้วัสดุที่ผ่านการดูดซับครั้งแรก การนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และเปอร์เซ็นต์การคายซับโดยใช้กรด HCl

ใช้วัสดุที่ผ่านการดูดซับครั้งแรก	นำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่	การคายซับโดยใช้กรดHCl
เปอร์เซ็นต์การดูดซับ 91.03%	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ40.11%	เปอร์เซ็นต์การคายซับ 55.10%

จากตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองจะเห็นว่า การดูดซับทองแดงในครั้งแรกที่ใช้วัสดุที่ยังไม่ผ่านการดูดซับจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 91.03 % เนื่องมาจากวัสดุนั้นเป็นการใช้ดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ยังไม่ได้มี  $\text{Cu}^{2+}$  เข้ามาแทนที่ภายในเปลือกส้อมโอที่ปรับปรุงแล้ว ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับเต็มที่ ส่วนการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่นั้น จะต้องมีการคายซับโดยใช้กรด HCl มาทำการคายซับ หรือนำ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากวัสดุดูดซับ เปอร์เซ็นต์การคายซับจะมีค่าเท่ากับ 55.10 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่สามารถคายออกมาได้หมด ส่วนประสิทธิภาพการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่จะมีค่าเท่ากับ 40.11 % จะเห็นว่า มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่น้อยลง ดังนั้นในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่นั้นสามารถทำได้ แต่จะให้ประสิทธิภาพที่ลดลง

#### 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง

จากการทดลองนำวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงมาทดสอบในสภาวะเดียวกันคือ ความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัม/ลิตร pH 5 น้ำหนักของเปลือกส้มโอ 0.1 กรัม ความเร็วรอบในการเขย่า 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที จากกราฟแผ่นภูมิแท่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับแบบปรับปรุงโดยใช้ NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  มาใช้ในการปรับปรุงทางเคมีของเปลือกส้มโอ ทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับที่มากขึ้น จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุงจะมีค่าเท่ากับ 91.03 % จะมีค่ามากกว่าเปลือกส้มโอที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งมีค่าเท่ากับ 83.55 %



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง

#### 4.6 การศึกษา Isotherm

นำผลการทดลองจากตอนที่ 4.2.3 การศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสมมาใช้ในคำนวณหาสมการ กราฟไอโซเทอมที่เหมาะสมในการทดลอง และดูผลการคำนวณจากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับประกอบกัน คิดจากสมการ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm ดังนี้

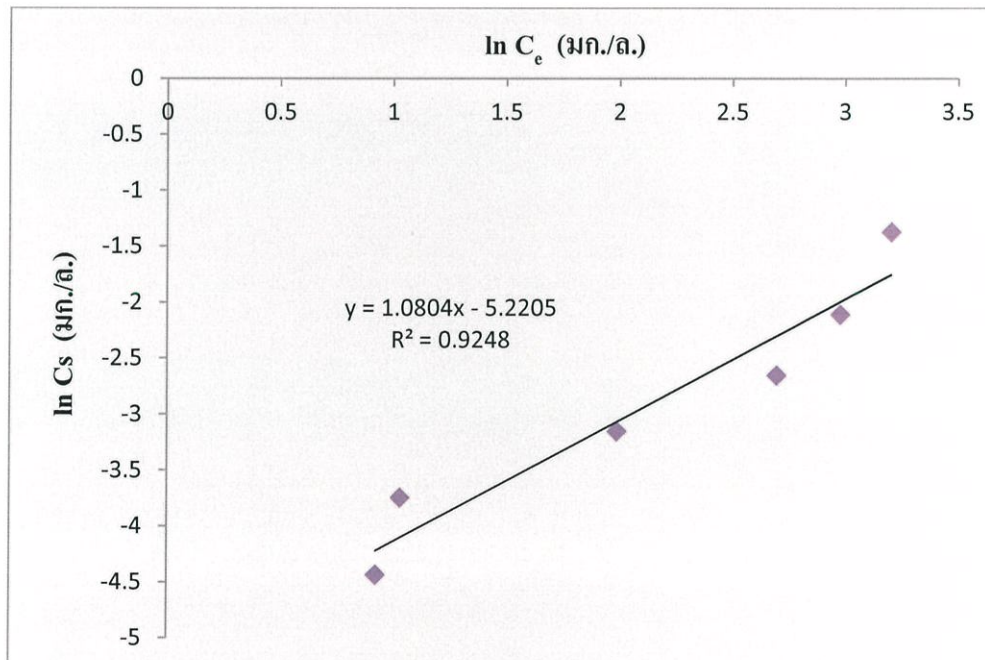
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของ Isotherm

สารดูดซับ (กรัม)	$C_e$ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	$C_0$ (กรัม)	$C_e$ (กรัม)	X (กรัม)	$C_s = X/m$
0	50	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.274 \times 10^{-3}$	0	-
0.0025	24.613	$1.25 \times 10^{-3}$	$6.153 \times 10^{-4}$	$6.347 \times 10^{-4}$	0.2539
0.00625	19.692	$1.25 \times 10^{-3}$	$4.923 \times 10^{-4}$	$7.577 \times 10^{-4}$	0.1212
0.0125	14.825	$1.25 \times 10^{-3}$	$3.706 \times 10^{-4}$	$8.794 \times 10^{-4}$	0.0704
0.025	7.300	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.825 \times 10^{-4}$	$1.068 \times 10^{-3}$	0.0427
0.05	2.808	$1.25 \times 10^{-3}$	$7.020 \times 10^{-5}$	$1.179 \times 10^{-3}$	0.0236
0.10	2.517	$1.25 \times 10^{-3}$	$6.29 \times 10^{-5}$	$1.187 \times 10^{-3}$	0.01187

ตารางที่ 4.4 ผลของสมการ Freundlich Isotherm

สมการ Freundlich Isotherm	
$\ln C_e$	$\ln C_s$
3.912	-
3.203	-1.3708
2.980	-2.1103
2.696	-2.6536
1.988	-3.1536
1.032	-3.7465
0.923	-4.4337

$$C_s = \frac{x}{m} = K_F C_e^{1/n} \text{ จะได้ } \ln(C_s) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e)$$

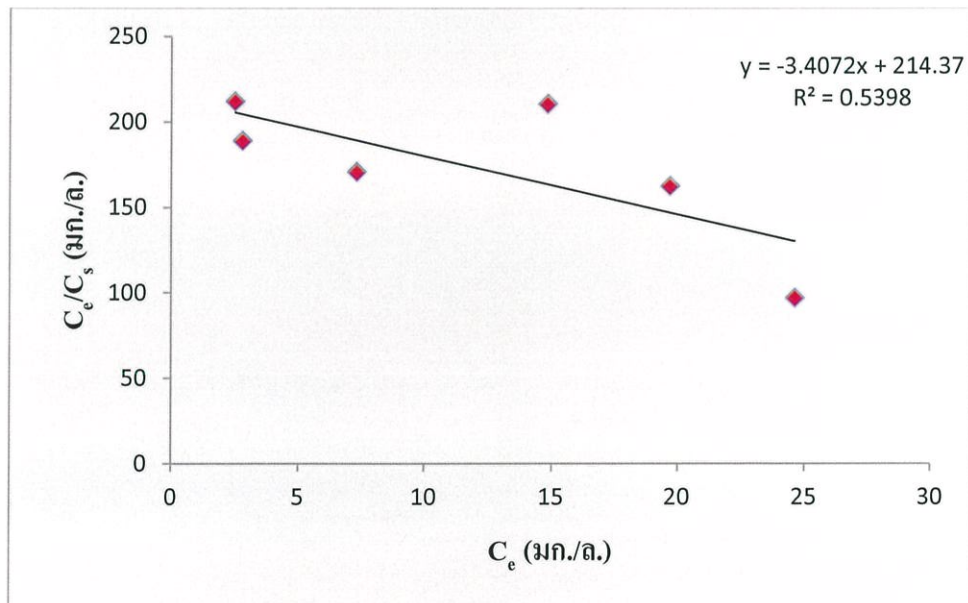


รูปที่ 4.6 กราฟไอโซเทอม Freundlich Isotherm ของการดูดซับทองแดงที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ผลของสมการ Langmuir Isotherm

สมการ Langmuir Isotherm	
$C_e$	$C_e/C_s$
50	-
24.613	96.9397
19.692	162.4752
14.825	210.5824
7.300	170.9602
2.808	118.9831
2.517	212.0472

$$C_s = \frac{X}{m} = \frac{ab C_e}{1 + b C_e} \text{ จะได้ } \frac{C_e}{C_s} = \frac{C_e}{a} + \frac{1}{ba}$$



รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอม Langmuir Isotherm ของการดูดซับทองแดงที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟของทั้งสองสมการ สามารถนำสมการมาคำนวณหาค่าความเหมาะสมในการอธิบายการทดลอง จะเห็นได้ว่าสมการของ Freundlich Isotherm ของการดูดซับทองแดง จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เส้นตรง ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการ Langmuir Isotherm การดูดซับทองแดงจึงเป็นการดูดซับตามแบบจำลองของ Freundlich Isotherm ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เส้นตรง ( $R^2$ ) = 0.924

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ในน้ำเสียด้วยเปลือกส้มโอ ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ศึกษาหาความเข้มข้น  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ศึกษาความสามารถในการนำเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ระหว่างเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การเลือกใช้ส่วนประกอบของเปลือกส้มโอ

เปลือกส้มโอที่บดละเอียดแยกออกมาได้ 3 ส่วน คือ ส่วนเปลือกสีเขียว ส่วนเปลือกสีขาว และส่วนเปลือกผสม (มีทั้งเปลือกสีเขียวและสีขาว) โดยจะเลือกเอาเปลือกส่วนสีขาวไปเป็นวัสดุในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ค่าเปอร์เซ็นต์ที่สามารถดูดซับทองแดงได้ดีที่สุด เท่ากับ 55.09 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สภาวะในการดูดซับที่มีน้ำหนักส้มโอ 0.1 กรัม pH เท่ากับ 5 เวลาที่ความเร็รรอบ 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัม/ลิตร จึงเลือกใช้ส่วนเปลือกสีขาวมาเป็นวัสดุดูดซับแล้วนำส่วนเปลือกสีขาวไปปรับปรุงทางเคมีก่อนนำไปทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่ด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง

##### 5.1.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุง

- จากการศึกษาหาค่า pH ที่เหมาะสมในการปรับปรุงเปลือกส้มโอด้วยสารเคมีเพื่อทำการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  ในน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าที่ pH 5 ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด
- จากการศึกษาหาค่าเวลาที่เหมาะสมโดยใช้ pH 5 ความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  50 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้เวลาที่เหมาะสมคือเวลาที่ 20 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 87.10 %

- จากศึกษาหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสมต่อการดูดซับ  $\text{Cu}^{2+}$  พบว่าน้ำหนักสั้มโอที่เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้น

- จากการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่ายิ่งความเข้มข้นสูงขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับยิ่งต่ำลง

### 5.1.3 การศึกษาความสามารถในการนำวัสดุดูดซับมาใช้ใหม่

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การดูดซับทองแดงในครั้งแรก ที่ใช้วัสดุที่ยังไม่ผ่านการดูดซับจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องมาจากวัสดุนั้นยังไม่ผ่านการดูดซับยังไม่ได้มี  $\text{Cu}^{2+}$  เข้ามาแทนที่ภายในเปลือกสั้มโอที่ปรับปรุง การนำวัสดุดูดซับนำกลับมาใช้ใหม่นั้นเป็นการลดปริมาณขยะภาคตะกอน จะต้องมีการคายซับโดยใช้กรด  $\text{HCl}$  มาทำการคายซับหรือนำ  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากวัสดุดูดซับ จะเห็นว่ามีความมีประสิทธิภาพการดูดซับที่น้อย อาจสืบเนื่องมาจาก ทำการคายซับออกมาได้ไม่หมด ยังมี  $\text{Cu}^{2+}$  หลงเหลือจับอยู่กับวัสดุดูดซับ แล้วนำวัสดุนั้นมาดูดซับใหม่เลยอาจทำให้ประสิทธิภาพในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่นั้นไม่ดีเท่าที่ควร

### 5.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกสั้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง

ประสิทธิภาพการดูดซับแบบปรับปรุงโดยใช้  $\text{NaOH}$  และ  $\text{CaCl}_2$  มาใช้ในการปรับปรุงทางเคมีของเปลือกสั้มโอ ทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับที่มากขึ้นจะเห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกสั้มโอที่ผ่านการปรับปรุงจะมีค่าเท่ากับ 91.03 % จะมีค่ามากกว่าเปลือกสั้มโอที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งมีค่าเท่ากับ 83.55 %

### 5.1.5 การศึกษา Isotherm

จากการคำนวณหาสมการของไอโซเทอมทั้งสองสมการ นำข้อมูลมาทำกราฟทั้งจากสมการ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm เมื่อนำมาคำนวณและทำกราฟสามารถวิเคราะห์เลือกได้ว่าสมการไอโซเทอมของ Freundlich Isotherm เหมาะสมกับข้อมูลที่ทำกรทดลองมากที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการปรับปรุงทางเคมี โดยใช้สารมีชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ
2. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุดูดซับที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดียิ่งขึ้น
3. ควรมีการทดลองจริงกับน้ำเสียจากโรงงานที่มีโลหะหนักทองแดงปนเปื้อน
4. ควรศึกษาการนำเปลือกส้มโอมาใช้ในการดูดซับใหม่ครั้งที่ 2 เพื่อเป็นการประหยัด และลดขยะกากตะกอน
5. ควรมีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม

## เอกสารอ้างอิง

1. โลหะหนัก “ความเป็นพิษของโลหะหนัก” [Online]. Available : <http://www.vet.ku.ac.th>
2. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539
3. MATHEICKAL J.T., YU Q., WOODBURN G.M. (1999) Biosorption of cadmium (II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine alga *Durvillaea potatorum* [J]. Water Res, 33:335-342.
4. TING Y.P., PRINCE I.G., LAWSON F. (1991) Uptake of cadmium and zinc by the alga *Chlorella vulgaris* (II): Multi-ion situation [J]. Biotechnol Bioeng, 37: 445-455.
5. ANNADURAI A., JUANG R.S., LEE D.J. (2002) Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels [J]. Water SciTechnol, 47: 185-190.
6. Massaro, Edward J., Ed. (2002) [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/ทองแดง>
7. Vom Himmel Kommt., Zum Himmel Steigt., Und wieder nieder., Zur Erde' muss and Ewig wechselnd. (2002) Health risks of water and sanitation. National Institute for Public Health and Environmental (RIVM). The Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands. Page 62-64. [Online]. Available: [http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc\\_toxic/a\\_tx\\_1\\_001c.asp?info\\_id=296](http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296)
8. วิจิตร บุญยะโทตระ (2539) ชีวิตและสิ่งแวดล้อม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9. พิมพ์ เรือนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิชย์ (2528) เคมีสภาวะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10. Pradthana (2008) [Online]. Available :  
<http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>
11. กรองกาญจน์ ภูระรัตน์ (2530) “ การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดพาราควอทโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีและการดูดซับด้วยถ่าน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
12. Ryan W. and Radford C. (1987) Whiteware Production, Testing and Quality Control, Pergamon Press. [Online]. Available :<http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/July/radio7-2.htm>
13. Sudarat Homhual (2546) แหล่งที่มา กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. ประมวลผลงานวิจัยด้านพิษวิทยา ของสถาบันวิจัยสมุนไพร เล่ม1. โรงพิมพ์การศาสนา: กรุงเทพมหานคร.[Online].Available  
:<http://www.thaicrudedrug.com/main.php?action=viewpage&pid=134>
14. Jimenez-Escrig and Sanchez-Muniz. (2000) [Online]. Available:  
[http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2984/7/276140\\_ch1.pdf](http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2984/7/276140_ch1.pdf)
15. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ (2010) แหล่งที่มา  
<http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html> [Online]. Available:  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-%E>
16. พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์ (2551) เพกทิน: พอลิเมอร์ชีวภาพทางเภสัชกรรม. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร. 188 หน้า. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/เพกทิน>
17. Chuankin (2011) [Online]. Available : <http://www.n3k.in.th/สมุนไพร/ประโยชน์ของส้มโอ>
18. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมรเพชรสม (2535) หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
19. จิดาภา ชัยศรีสมุทร., พรพิมล ส.กาญจนะชัย และพัชรารภรณ์ (2552) โครงการพิเศษ เรื่อง อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม Reactive Red 180 บนเบนโทไนด์
20. [Online].Available:[http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk\\_ch1.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf)

21. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และอำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล. ม.ป.ป. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม2. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. อัดสำเนา.
22. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรสิ่งแวดล้อม.2547. ราชกิจจานุเบกษา (ฉบับที่25). กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ
23. คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย , หน้า 127-130.
24. พิมพ์ชนก แพงไทร (2555) การกำจัดโลหะตะกั่วออกจากดินปนเปื้อนโดยการล้างดินด้วยสารละลายผสมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และโซเดียมอิตีทีเอ. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
25. Sebe G., Pardon F., Gerlier S. and De Jeso B. (2004) An investigation into the use of eelgrass(*Zostera noltii*) from removal of cupric ions from dilute aqueous solution. **Separation and Purification Technology**.
26. Nowack B., Kari F.G. and KruGer H.G. (2001) The remobilization of heavy metals from copper by almond shell. **Water, Air and Soil Pollution**. (125): 243-257.
27. Hanzlik J., Sebek J., Sebe O., Weishauptova Z. and Machovic V. (2009) Multicomponent adsorption of Ag(I), Cd(II) and Cu(II) by natural carbonaceous materials. **Water Research**. 38: 2178-2184
28. Ruddy B.R., Mirgsaffair N. and Gaballas I. (1999) Removal and recycling of copper from aqueous solutions using treated Indian barks. **Resources. Resources Conservation and Recycling**. 21: 227-245

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH)	pH 5.5 – 9.0
ค่าทีดีเอส (TDS/Total Dissolved Solids)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ไม่เกิน 3,000 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 mg/l</li> <li>· น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 mg/l หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย หรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 mg/l</li> </ul>
สารแขวนลอย (Suspended Solids)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ไม่เกิน 50 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 mg/l</li> </ul>
อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 °C
สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1.0 mg/l
ไซยาไนด์ (Cyanide)	ไม่เกิน 0.2 mg/l
น้ำมันและไขมัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ไม่เกิน 5.0 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 mg/l</li> </ul>

ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 mg/l
สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 mg/l
คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 mg/l
ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 <sup>o</sup> C / Biochemical Oxygen Demand: BOD)	· ไม่เกิน 20 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 60 mg/l
ค่าทีเคเอ็น (TKN: Total Kjeldahl Nitrogen)	· ไม่เกิน 100 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 200 mg/l
ค่าซีโอดี (COD: Chemical Oxygen Demand)	· ไม่เกิน 120 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 400 mg/l

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

ตารางที่ ก.2 ค่าที่ยอมรับได้ของโลหะหนักให้มีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

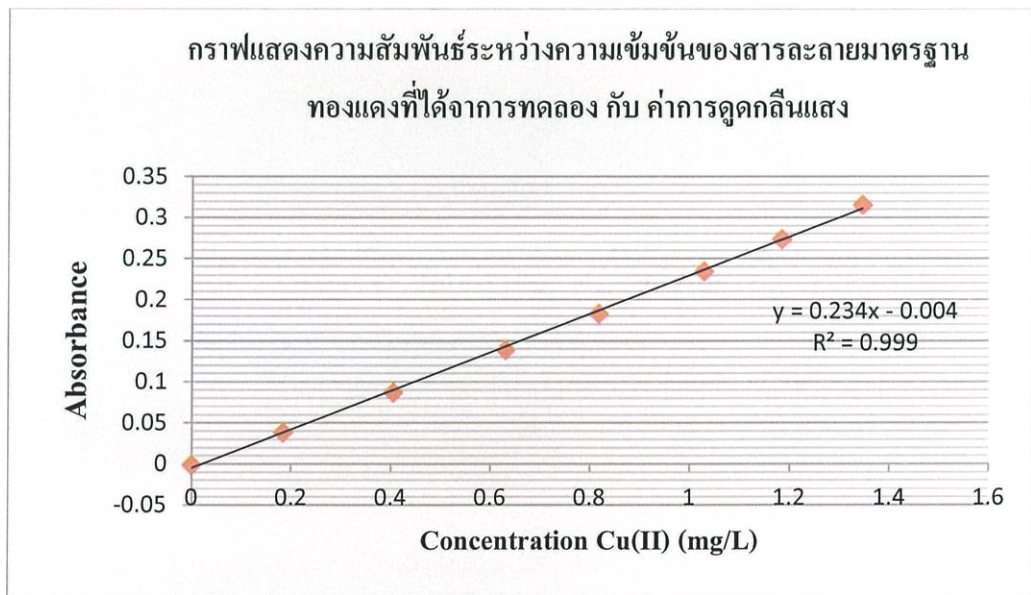
โลหะหนัก	ค่าที่ยอมรับได้
สังกะสี	ไม่เกิน 5.0 mg/l
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนซ์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 mg/l
โครเมียมชนิดไตรวาเลนซ์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 mg/l
ทองแดง	ไม่เกิน 2.0 mg/l
แคดเมียม	ไม่เกิน 0.03 mg/l
แบเรียม	ไม่เกิน 1.0 mg/l
ตะกั่ว	ไม่เกิน 0.2 mg/l
นิกเกิล	ไม่เกิน 1.0 mg/l
แมงกานีส	ไม่เกิน 5.0 mg/l
อาร์เซนิก	ไม่เกิน 0.25 mg/l
เซลีนียม	ไม่เกิน 0.02 mg/l
ปรอท	ไม่เกิน 0.005 mg/l

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

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง (mg/L) กับ ค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ทองแดง (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
0	0.000
0.2	0.184
0.4	0.405
0.6	0.631
0.8	0.818
1	1.029
1.2	1.184
1.4	1.346



รูปที่ ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดง

ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการดูดกลืนแสง

## ภาคผนวก ก

### ตารางผลการทดลอง

#### 1. การหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ครั้งที่	น้ำหนักส้มโอ (g)	pH		ความเข้มข้น ที่วัดได้(mg/L)	% Cu <sup>2+</sup> ที่ ดูดซับได้ (%)	เฉลี่ย (%)	SD
		ก่อน	หลัง				
1	0.0999	3.31	2.04	0.287	76.13	76.04	0.06
2	0.1002	3.15	2.01	0.295	75.47		0.40
3	0.1003	3.21	2.03	0.281	76.53		0.35
1	0.1004	3.22	2.99	0.121	89.87	89.2	0.47
2	0.1008	3.22	2.99	0.115	90.4		0.85
3	0.1000	3.16	2.95	0.152	87.33		1.32
1	0.1003	3.22	4.00	0.102	91.47	91.78	0.22
2	0.1005	3.00	3.99	0.091	92.4		0.44
3	0.1003	3.31	3.98	0.102	91.47		0.22
1	0.1004	3.27	5.00	0.082	93.2	93.78	0.41
2	0.1006	3.29	4.98	0.078	93.47		0.22
3	0.1000	3.31	5.05	0.064	94.67		0.63
1	0.1007	3.20	5.96	0.096	92	92.27	0.19
2	0.1002	3.21	5.97	0.090	92.53		0.18
3	0.1003	3.31	6.16	0.092	92.27		0
1	0.1007	3.41	7.02	0.168	86	90.8	-
2	0.1009	3.44	6.95	0.113	90.67		0.13
3	0.1007	3.45	6.99	0.109	90.93		0.13
1	0.1004	3.20	8.14	0.132	89		0.1

2	0.1008	3.38	8.06	0.169	<del>85.87</del>	89.1	-
3	0.1005	3.27	8.02	0.129	89.2		0.1

หมายเหตุ / = ไม่นำมาคิด

## 2. การหาค่าเวลาที่เหมาะสม

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เหมาะสม

ครั้งที่	เวลา (นาที)	น้ำหนักส้มโอ (g)	pH		ความเข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	% Cu <sup>2+</sup> ที่ ดูดซับได้ (%)	เฉลี่ย (%)	SD
			ก่อน	หลัง				
1	0	0.102	3.31	4.89	0.249	<del>46.3</del>	67.5	-
2		0.103	3.32	4.78	0.177	60.2		7.3
3		0.101	3.28	5.04	0.129	74.8		7.3
1	20	0.102	3.34	5.09	0.080	<del>82.7</del>	87.1	-
2		0.100	3.12	5.11	0.061	86.3		0.8
3		0.102	3.29	4.95	0.062	87.9		0.8
1	40	0.102	3.28	4.92	0.052	88.8	89.13	0.23
2		0.104	3.52	5.09	0.048	89.2		0.12
3		0.105	3.60	5.07	0.054	89.4		0.66
1	60	0.101	3.22	4.81	0.030	93.52	93.75	0.16
2		0.101	3.23	5.01	0.032	93.10		0.46
3		0.100	3.05	5.13	0.027	94.62		0.62
1	80	0.102	3.30	4.97	0.035	92.40	93.96	1.10
2		0.102	3.33	5.08	0.032	93.10		0.61
3		0.105	3.37	4.86	0.025	96.37		1.70
1	120	0.101	3.18	5.21	0.027	94.62	94.34	0.20
2		0.101	3.20	5.08	0.035	93.40		0.66
3		0.103	3.41	5.17	0.023	94.99		0.46
1	150	0.101	3.21	5.05	0.022	95.16	94.43	0.52
2		0.101	3.19	4.90	0.027	94.62		0.13
3		0.102	3.22	4.91	0.030	93.52		0.64

หมายเหตุ / = ไม่นำมาคิด

### 3. การหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม

ครั้งที่	น้ำหนักส้มโอ (mg)	pH		ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	% Cu <sup>2+</sup> ที่ดูดซับได้ (%)	เฉลี่ย (%)	SD
		ก่อน	หลัง				
1	2.5	4.82	5.14	0.779	61.75	59.96	1.28
2	2.5	4.77	5.08	0.711	62.15		1.83
3	2.5	4.81	5.02	0.897	55.97		2.82
1	6.3	5.17	5.17	0.755	62.95	64.05	1.1
2	6.25	4.99	5.01	0.711	65.15		1.1
3	6.3	5.02	5.02	0.897	<del>55.97</del>		-
1	12.5	5.12	5.12	0.576	71.74	70.91	0.59
2	12.5	5.10	5.10	0.645	68.37		1.8
3	12.5	5.11	5.11	0.558	72.61		1.2
1	25	5.36	5.02	0.321	84.30	85.69	0.98
2	25	5.27	5.06	0.274	86.58		0.63
3	25	5.22	5.04	0.281	86.19		0.35
1	50	5.76	4.92	0.117	94.27	94.48	0.15
2	50	5.51	4.92	0.100	95.05		0.4
3	50	5.58	4.98	0.120	94.11		0.26
1	100	5.92	5.02	0.105	94.82	95.03	0.15
2	100	5.91	5.12	0.100	95.05		0.01
3	100	5.87	5.05	0.097	95.21		0.13

หมายเหตุ / = ไม่นำมาคิด

## 4. การหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

ตารางที่ ๓.4 ผลการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

ครั้งที่	ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนัก ส้มโอ (g)	pH		ความเข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	% Cu <sup>2+</sup> ที่ดูดซับ ได้ (%)	เฉลี่ย (%)	SD
			ก่อน	หลัง				
1	0	0.1011	7.78	5.08	0.406	99.16	99.5	0.24
2		0.1015	7.85	5.01	0.181	99.62		0.08
3		0.1010	7.74	5.03	0.138	99.71		0.15
1	50	0.1009	3.19	4.93	0.150	92.50	92.29	0.15
2		0.1005	3.13	4.92	0.125	93.76		1.04
3		0.1018	3.11	5.03	0.188	90.60		1.19
1	100	0.1018	2.69	5.03	0.205	89.74	90.95	0.86
2		0.1014	2.72	4.90	0.150	92.50		1.1
3		0.1011	2.71	4.95	0.188	90.60		0.25
1	200	0.1011	2.28	5.03	0.125	<del>93.76</del>	86.18	-
2		0.1019	2.28	4.94	0.288	85.60		0.58
3		0.1011	2.25	5.06	0.265	86.76		0.58
1	400	0.1019	1.90	5.10	0.528	73.60	72.68	0.65
2		0.1001	1.89	4.91	0.563	71.85		0.59
3		0.1012	1.92	4.99	0.548	72.60		0.06
1	600	0.1009	1.70	4.90	0.914	61.91	62.03	0.08
2		0.1014	1.66	5.01	0.912	62.00		0.02
3		0.1020	1.69	4.92	0.908	62.17		0.1

หมายเหตุ / = ไม่นำมาคิด

### 5. การดูดซับ และการคายซับด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ผ่านการปรับปรุง

ตารางที่ ๕.5 ผลการทดลองหาค่าการดูดซับ และการคายซับด้วยเปลือกส้มโอ

ที่ผ่านการปรับปรุง และไม่ผ่านการปรับปรุง

ครั้งที่	น้ำหนักส้มโอ (g)	pH		ความเข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	% Cu <sup>2+</sup> ที่ ดูดซับได้ (%)	เฉลี่ย (%)	SD
		ก่อน	หลัง				
การดูดซับด้วยเปลือกส้มโอที่ผ่านการปรับปรุง							
1	0.3011	3.33	4.90	0.192	90.94	91.03	0.064
2	0.3013	3.33	5.13	0.192	90.94		0.064
3	0.3015	3.32	4.90	0.186	91.22		0.134
การคายซับ							
1	0.2004			0.945	55.47	55.1	0.26
2	0.2008			0.931	56.08		0.69
3	0.2002			0.981	53.74		0.96
การนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่							
1	0.1006	2.42	4.93	0.097	95.41	95.13	0.198
2	0.1010	2.42	4.97	0.097	95.41		0.198
3	0.1006	2.44	4.95	0.115	94.57		0.396
การดูดซับด้วยเปลือกส้มโอที่ไม่ผ่านการปรับปรุง							
1	0.3012	3.03	4.95	0.372	82.45	83.55	0.78
2	0.3008	3.02	4.96	0.341	83.92		0.26
3	0.3006	3.02	4.90	0.333	84.29		0.52

หมายเหตุ / = ไม่นำมาคิด

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

คำนวณหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้จากการทดลอง (เจือจาง 50 เท่า)

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้

ครั้งที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้ (mg/L)
1	$1.048 \times 50 = 52.4$
2	$0.991 \times 50 = 49.55$
	เฉลี่ย = 50.975

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  50.975 mg

ถ้าในปริมาตร 25 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$   $\frac{50.975 \text{ mg} \times 25 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 1.274 \text{ mg}$

คำนวณหา %  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่เจือจาง 50 เท่า ของน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อหาค่าน้ำหนักต่อปริมาตรที่เหมาะสม

ครั้งที่ 1 น้ำหนักส้มโอ 2.5 mg วัดค่าความเข้มข้นได้ 0.779 mg/L (เจือจาง 25 เท่า)

จะได้ว่า  $0.779 \times 25 = 19.475 \text{ mg/L}$

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ 19.475 mg

ถ้าในปริมาตร 25 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้  $\frac{19.475 \text{ mg} \times 25 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 0.487 \text{ mg}$

ดังนั้น %  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ =  $\frac{1.274 \text{ mg} - 0.487 \text{ mg}}{1.274 \text{ mg}} \times 100 = 61.77 \%$

คำนวณหา % การดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง

ความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้ (mg/L) =  $1.060 \times 50 = 53 \text{ mg/L}$  (เจือจาง 50 เท่า)

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  53 mg

ถ้าในปริมาตร 75 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$   $\frac{53 \text{ mg} \times 75 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 3.975 \text{ mg}$

ครั้งที่ 1 (ปรับปรุง)

น้ำหนักส้มโอ 0.3011 g วัดค่าความเข้มข้นได้ 0.061 mg/L (เจือจาง 25 เท่า)

จะได้ว่า  $0.192 \times 25 = 4.8 \text{ mg/L}$

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ 4.8 mg

ถ้าในปริมาตร 75 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้  $\frac{4.8 \text{ mg} \times 75 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 0.36 \text{ mg}$

ดังนั้น %  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ =  $\frac{3.975 \text{ mg} - 0.36 \text{ mg}}{3.975 \text{ mg}} \times 100 = 90.94 \%$

ครั้งที่ 1 (ไม่ปรับปรุง)

น้ำหนักส้มโอ 0.372 g วัดค่าความเข้มข้นได้ 0.372 mg/L (เจือจาง 25 เท่า)

จะได้ว่า  $0.372 \times 25 = 9.3 \text{ mg/L}$

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ 9.3 mg

ถ้าในปริมาตร 75 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้  $\frac{9.3 \text{ mg} \times 75 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 0.6975 \text{ mg}$

ดังนั้น %  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ =  $\frac{3.975 \text{ mg} - 0.6975 \text{ mg}}{3.975 \text{ mg}} \times 100 = 82.45 \%$

คำนวณหา % การดูดซับของแดงจากการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่

ความเข้มข้นเริ่มต้นที่วัดได้ (mg/L) =  $1.060 \times 50 = 53 \text{ mg/L}$  (เจือจาง 50 เท่า)

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  53 mg

ถ้าในปริมาตร 25 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$   $\frac{53 \text{ mg} \times 25 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 1.325 \text{ mg}$

ครั้งที่ 1 (ปรับปรุง)

น้ำหนักส้มโอ 0.1006 g วัดค่าความเข้มข้นได้ 0.125 mg/L (เจือจาง 25 เท่า)

จะได้ว่า  $0.097 \times 25 = 2.425 \text{ mg/L}$

ในปริมาตร 1000 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ 2.425 mg

ถ้าในปริมาตร 25 mL จะมีปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้  $\frac{2.425 \text{ mg} \times 25 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 0.061 \text{ mg}$

ดังนั้น %  $\text{Cu}^{2+}$  ที่ดูดซับได้ =  $\frac{1.325 \text{ mg} - 0.061 \text{ mg}}{1.325 \text{ mg}} \times 100 = 95.41 \%$

## ภาคผนวก จ

### การคำนวณไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลการทดลอง

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองปริมาณสารดูดซับและ  $\text{Cu}^{2+}$  ที่เหลือในสารละลาย

สารดูดซับ (มิลลิกรัม), m	0	2.5	6.25	12.5	25	50	100
$\text{Cu}^{2+}$ ที่เหลือในสารละลาย (มก./ล.), $C_e$	50	24.613	19.692	14.825	7.300	2.808	2.517

นำข้อมูลจากตารางด้านบน มาสร้างสมการของ Langmuir Isotherm และของ Freundlich Isotherm และหาว่าสมการใดเหมาะสมกับข้อมูลข้างต้นที่สุดและคำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

วิธีทำ

1) แสดงสมการ Langmuir Isotherm

$$C_s = \frac{X}{m} = \frac{ab C_e}{1 + b C_e} \quad \text{จะได้} \quad \frac{C_e}{C_s} = \frac{C_e}{a} + \frac{1}{ba}$$

เมื่อ  $C_s$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

$a$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบ  
ชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

2) แสดงสมการ Freundlich Isotherm

$$C_s = \frac{X}{m} = K_F C_e^{1/n} \quad \text{จะได้} \quad \ln(C_s) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} \ln(C_e)$$

เมื่อ  $C_s$  = ปริมาณของตัวดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบ

ชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$K_F, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

3) คำนวณหาค่าต่างๆของทั้งสองสมการ

- ปริมาณของสารปนเปื้อนเริ่มต้น ( $C_0$ )

$$= 50 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 1.25 \times 10^{-3} \text{ ก.}$$

- ปริมาณของสารปนเปื้อนที่เหลือ ( $C_c$ )

ณ 0 กรัมของสารดูดซับ

$$= 50 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 1.250 \times 10^{-3} \text{ ก.}$$

ณ 0.0025 กรัมของสารดูดซับ

$$= 24.613 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 6.153 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

ณ 0.00625 กรัมของสารดูดซับ

$$= 19.692 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 4.923 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

ณ 0.0125 กรัมของสารดูดซับ

$$= 14.825 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 3.706 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

ณ 0.025 กรัมของสารดูดซับ

$$= 7.300 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 1.825 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

ณ 0.05 กรัมของสารดูดซับ

$$= 2.808 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 7.020 \times 10^{-5} \text{ ก.}$$

ณ 0.10 กรัมของสารดูดซับ

$$= 2.517 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 25 \text{ มล.} \times \frac{1 \text{ ล.}}{1000 \text{ มล.}} \times \frac{1 \text{ ก.}}{1000 \text{ มก.}} = 6.290 \times 10^{-5} \text{ ก.}$$

- คำนวณหา  $C_c$  ณ 0.0025 กรัมของสารดูดซับ =  $24.613 \times 25/10^6$  ก.

$$X \text{ ณ } 0 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (1.25 \times 10^{-3}) = 0 \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.0025 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (6.153 \times 10^{-4}) = 6.347 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.00625 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (4.923 \times 10^{-4}) = 7.577 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.0125 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (3.706 \times 10^{-4}) = 8.794 \times 10^{-4} \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.025 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (1.825 \times 10^{-4}) = 1.068 \times 10^{-3} \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.05 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (7.020 \times 10^{-5}) = 1.179 \times 10^{-3} \text{ ก.}$$

$$X \text{ ณ } 0.10 \text{ กรัม} = C_0 - C_c = (0.125 \times 10^{-3}) - (6.290 \times 10^{-5}) = 1.186 \times 10^{-3} \text{ ก.}$$

- คำนวณหา  $C_s = X/m$

$$C_s \text{ ณ } 0 \text{ กรัม} = \frac{0}{0} = 0 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.0025 \text{ กรัม} = \frac{6.347 \times 10^{-4}}{0.0025} = 0.2539 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.00625 \text{ กรัม} = \frac{7.577 \times 10^{-4}}{0.00625} = 0.1212 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.0125 \text{ กรัม} = \frac{8.794 \times 10^{-4}}{0.0125} = 0.0704 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.025 \text{ กรัม} = \frac{1.068 \times 10^{-3}}{0.025} = 0.0427 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.05 \text{ กรัม} = \frac{1.179 \times 10^{-3}}{0.05} = 0.0236 \text{ ก.}$$

$$C_s \text{ ณ } 0.10 \text{ กรัม} = \frac{1.187 \times 10^{-3}}{0.10} = 0.0119 \text{ ก.}$$

ตารางที่ จ.2 ผลการทดลองของ Isotherm

สารดูดซับ (กรัม)	$C_e$ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	$C_0$ (กรัม)	$C_e$ (กรัม)	X (กรัม)	$C_s = X/m$
0	50	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.274 \times 10^{-3}$	0	-
0.0025	24.613	$1.25 \times 10^{-3}$	$6.153 \times 10^{-4}$	$6.347 \times 10^{-4}$	0.2539
0.00625	19.692	$1.25 \times 10^{-3}$	$4.923 \times 10^{-4}$	$7.577 \times 10^{-4}$	0.1212
0.0125	14.825	$1.25 \times 10^{-3}$	$3.706 \times 10^{-4}$	$8.794 \times 10^{-4}$	0.0704
0.025	7.300	$1.25 \times 10^{-3}$	$1.825 \times 10^{-4}$	$1.068 \times 10^{-3}$	0.0427
0.05	2.808	$1.25 \times 10^{-3}$	$7.020 \times 10^{-5}$	$1.179 \times 10^{-3}$	0.0236
0.10	2.517	$1.25 \times 10^{-3}$	$6.29 \times 10^{-5}$	$1.187 \times 10^{-3}$	0.01187

ตารางที่ จ.3 ผลของสมการ Freundlich Isotherm

สมการ Freundlich Isotherm	
$\ln C_e$	$\ln C_s$
3.912	-
3.203	-1.3708
2.980	-2.1103
2.696	-2.6536
1.988	-3.1536
1.032	-3.7465
0.923	-4.4337

ตารางที่ จ.4 ผลของสมการ Langmuir Isotherm

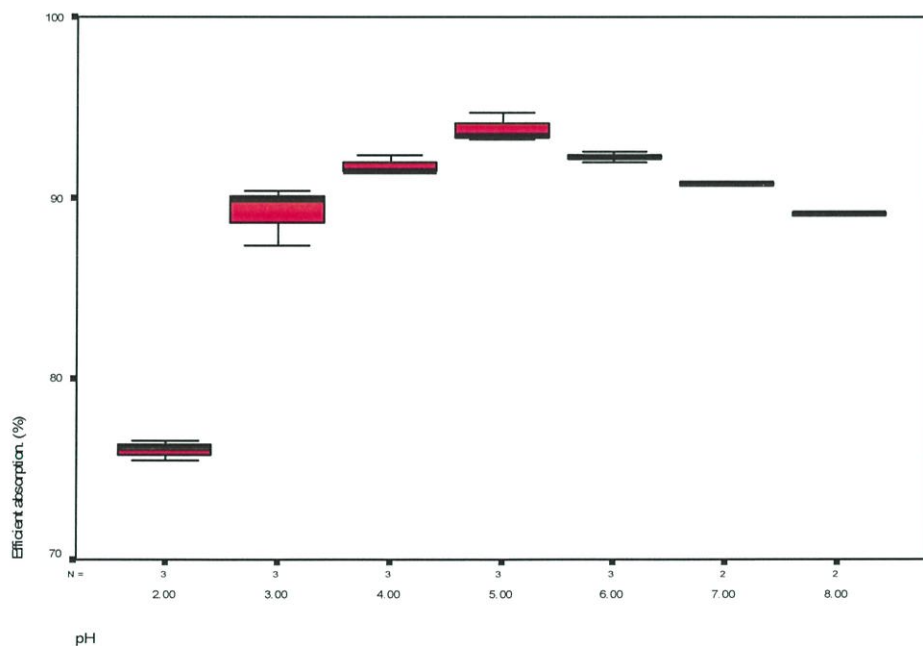
สมการ Langmuir Isotherm	
$C_e$	$C_e/C_s$
50	-
24.613	96.9397
19.692	162.4752
14.825	210.5824
7.300	170.9602
2.808	118.9831
2.517	212.0472

## ภาคผนวก ฉ

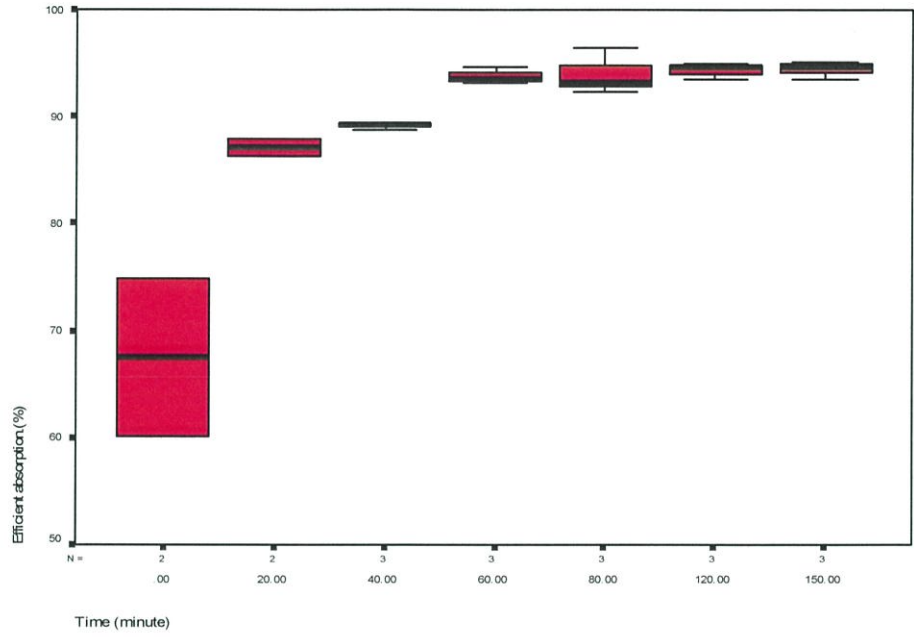
### การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS

(Statistical Package for the Social Sciences)

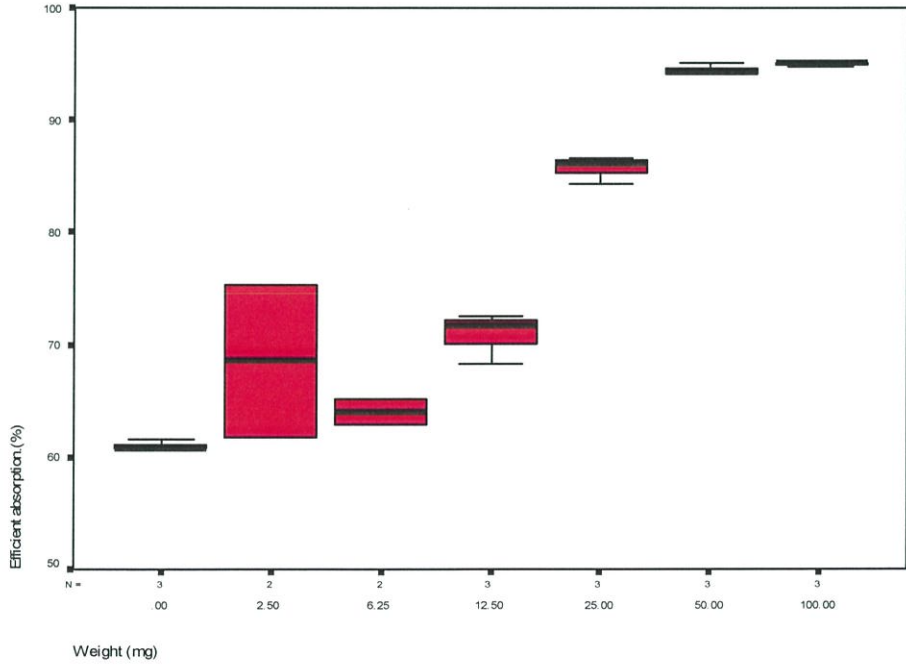
สถิตินับเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่องานวิจัย การคำนวณตัวเลขหลายๆที่ ต้องการความเที่ยงตรงและรวดเร็วด้วยมือหรือ เครื่องคิดเลขธรรมดาแทบเป็นไปไม่ได้ การนำคอมพิวเตอร์และโปรแกรมเข้ามาใช้ จึงมีความจำเป็นเทียบได้กับความจำเป็นที่ต้องใช้สถิติในการวิจัย ในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์อยู่เป็นจำนวนมาก SPSS เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติและงานวิจัย ที่มีประวัติการพัฒนามานานหลายสิบปี



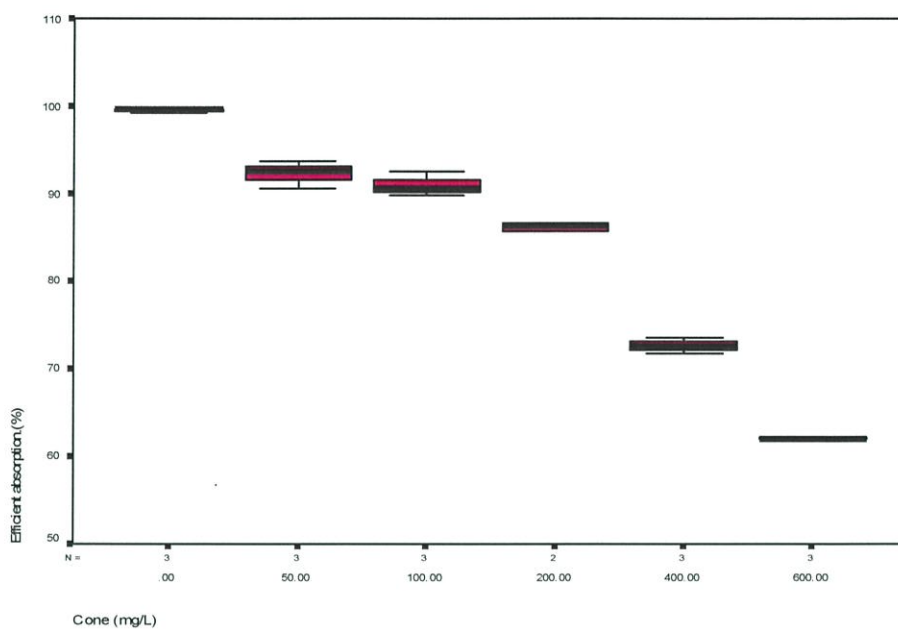
รูปที่ ฉ.1 กราฟระหว่าง pH กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)



รูปที่ ๓.2 กราฟระหว่างเวลา (นาที) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)



รูปที่ ๓.3 กราฟระหว่างน้ำหนักเปลือกส้ม ใส่อต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 25 มิลลิลิตร กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)



รูปที่ ๑.๔ กราฟระหว่างความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัม/ลิตร) กับ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%)