

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาประสิทธิภาพการดูฉบับที่เกิดในนิตยสาร  
โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอ



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 49268  
วัน, เดือน, ปี 18 ก.พ. 2547

b.....  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study on Adsorption Efficiency of Nickle from Synthesis Wastewater by Using  
*Eichhornia crassipes* (Mart.) solms, *Colocasia estulenta* Sahott. and *Sesbania javanica* Miq**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน

นักศึกษา

จตุพร โหงวงษ์  
ธิดารัตน์ จรัสกุล  
สุธาสินี บุญยสถิตย์

ภาควิชา

เคมี

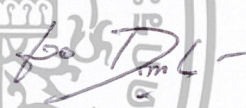
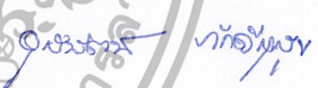

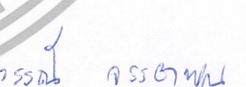
สาขาวิชา

เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ กิ่งนิตุคนธ์ สุวรรณรัตน์  
ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

| คณะกรรมการตรวจสอบ                    | ลายมือชื่อ   |
|--------------------------------------|--|
| ประธานกรรมการ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ |  |
| กรรมการ ดร. อุตสารัตน์ ภักดีคู่สูง   |  |
| กรรมการ อ. กิ่งนิตุคนธ์ สุวรรณรัตน์  |  |
| กรรมการ ดร. สุวรรณณี จรรยาพูน        |  |

(รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                  |   |                 |
|------------------|---|-----------------|
| โครงการพิเศษ     | การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์<br>โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน |                 |
| นักศึกษา         | จตุพร โหงวแข่ง<br>ชิคาร์ตัน จรัสกุล<br>สุธาสินี บุญยสถิตย์                          |                 |
| ภาควิชา          | เคมี  | คณะ วิทยาศาสตร์ |
| สาขาวิชา         | เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม   |                 |
| ปีการศึกษา       | 2545  |                 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์<br>ดร. สุวรรณ จรรยาพูน                              |                 |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการนำพืชมาล้างน้ำให้สะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.3 มิลลิเมตร นำพืชที่ได้มาอบอีกครั้งที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาระยะเวลา ค่า pH ประสิทธิภาพการดูดซับที่มวลพืชต่าง ๆ กัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของพืชทั้ง 3 ชนิดที่มวลพืช 1 กรัมเท่ากัน ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่า จำนวนวันที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของผักตบชวาและบอนสามารถดูดซับได้ดีที่สุดที่ 4 วัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 87.04% และ 58.80% ตามลำดับ ส่วนจำนวนวันที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของโสนคือ 3 วัน มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 88.59% ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลของผักตบชวา คือ pH 7 สามารถดูดซับได้ 77.04% บอนและโสนสามารถดูดซับได้ดีที่ pH เท่ากันคือ pH 5 โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 70.87% และ 83.72% ตามลำดับ ที่มวลพืช 1 กรัม พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลของโสนจะสูงกว่าผักตบชวา และบอน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 61.45% , 45.80% และ 40.37% ตามลำดับ ส่วนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่น้ำหนักพืชต่าง ๆ กับ พบว่า สมการ Freundlich ของผักตบชวา คือ  $y = 0.5858x + 0.3656$  ที่  $R^2 = 0.398$  สมการของบอน คือ  $y = 1.2809x + 0.6837$  ที่  $R^2 = 0.3433$  สมการของโสน คือ  $y = 0.7114x + 0.3812$  ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R^2 = 0.8668$  และมีค่าคงที่ที่คำนวณได้ของผักตบชวา บอน และ โสน คือ 2.3206 , 4.8273 และ 2.4055 ตามลำดับ

คำสำคัญ การดูดซับ , นิกเกิล , ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) solms) , บอน (*Colocasia esculenta* Sahott.) , โสน (*Sesbania javanica* Miq)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title** Study on Adsorption Efficiency of Nickle from Synthesis Wastewater by Using *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms , *Colocasia estulenta* Sahott. and *Sesbania javanica* Miq

**Name** Jatuporn Ngowkheng  
Thidarat Charutkul  
Sutasinee Boonyasathid

**Department** Chemistry Faculty Science

**Program** Environmental Resource Chemistry

**Academic Year** 2002

**Special Project Advisor** Arjarn Glinsukol Suwannarat  
Dr. Suwannee Janyapoon

### ABSTRACT

This special project studied on adsorption efficiency of nickle from the synthesis wastewater using *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms , *Colocasia estulenta* Sahott. and *Sesbania javanica* Miq. as adsorbents. Adsorbents were prepared by washing with clean water then baking at 70 °C for 24 hours. The dry adsorbents were ground and sieved through a 0.3 mm sieve. Then they were baked again at 70 °C for 1 hour. Optimum conditions were studied in terms of contact time, pH, and adsorption efficiency . In the study, nickle was measured by using Atomic Absorption Spectrophotometer in a wavelength of 232 nanometers. It was found that the optimum contact times of both *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms and *Colocasia estulenta* Sahott. were 4 days and adsorption efficiency were 87.04 and 58.80 percent, respectively. The optimum contact times of *Sesbania javanica* Miq. was 3 days and adsorption efficiency was 88.59 percent. Optimum pH for adsorption nickle of *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms was at pH 7 at the adsorption efficiency 77.04 percent. While both *Colocasia estulenta* Sahott. and *Sesbania javanica* Miq. had optimum pH at pH 5 at the adsorption efficiency 70.87 and 83.72 percent, respectively. For adsorption isotherm at any biomass weight , adsorption efficiency of *Sesbania javanica* Miq. was better than *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms and *Colocasia estulenta* Sahott. The efficiency of *Sesbania javanica* Miq. , *Eichhornia*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*crassipes* (Mart.) solms. and *Colocasia estulenta* Sahott. were  $y = 0.7114x + 0.3812$  at  $R^2 = 0.8668$  ,  $y = 0.5858x + 0.3656$  at  $R^2 = 0.398$  and  $y = 1.2809x + 0.6837$  at  $R^2 = 0.3433$  , respectively.

Keyword

Adsorption , Nickle , *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms. (waterhyacinth) , *Colocasia estulenta* Sahott. (Elephant Ear) , *Sesbania javanica* Miq.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้ทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณ อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ติดตามผลการทำงาน และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องโครงการพิเศษนี้ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ ดร. อุตาร์ตัน ภัคดีสูสุข ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องของการทำรายงาน รวมถึงคณาจารย์ในภาควิชาเคมีทุก ๆ ท่าน อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านอย่างเต็มที่

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องบดตัวอย่าง และภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องร่อน เพื่อแยกขนาดสำหรับโครงการพิเศษครั้งนี้

อีกทั้ง คุณมาลี โหงว่ง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บผักตบชวา โสน และบอน เพื่อนำมาใช้ในการวิจัย และคุณวรพงษ์ ถนอมชีวนนท์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติ พี่น้อง เพื่อนต่างสถาบัน และเพื่อน ๆ ในสถาบัน ทั้งในภาควิชาเคมี รวมถึงรุ่นพี่ รุ่นน้อง ภาควิชาเคมีทุก ๆ คนที่เป็นกำลังใจให้กับพวกเราตลอดเวลา พร้อมทั้งครูบาอาจารย์ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบันทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลืองานด้านต่าง ๆ ของโครงการพิเศษ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลง在最ที่สุด

|           |           |
|-----------|-----------|
| จตุพร     | โหงว่ง    |
| ธิดารัตน์ | จรัสกุล   |
| สุธาสินี  | บุญสถิตย์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|                                       | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                       | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                    | ค    |
| กิตติกรรมประกาศ                       | จ    |
| สารบัญ                                | ฉ    |
| สารบัญตาราง                           | ณ    |
| สารบัญรูป                             | ญ    |
| บทที่ 1 บทนำ                          |      |
| 1.1 ความเป็นมาของ โครงการพิเศษ        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์                      | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย                 | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน | 2    |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ               | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ               |      |
| 2.1 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย     | 4    |
| 2.2 กระบวนการดูดซับ                   | 9    |
| 2.3 โลหะหนัก                          | 14   |
| 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของพืช           | 16   |
| 2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา           | 20   |
| 2.5.1 ผักตบชวา                        | 20   |
| 2.5.2 บอนน้ำ                          | 21   |
| 2.5.3 โสน                             | 22   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง             | 24   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย  |      |
| 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง                                 | 29   |
| 3.2 วิธีการทดลอง  |      |
| 3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์                                      | 30   |
| 3.2.2 การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา โสน และบอน                        | 30   |
| 3.2.3 ศึกษาความสามารถของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับ<br>นิกเกิล      |      |
| (1) ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม                                     | 31   |
| (2) ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ                                 | 32   |
| (3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างผักตบชวา<br>โสน และบอน   | 33   |
| (4) การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ                                       | 34   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง  |      |
| 4.1 ผลการศึกษาลักษณะของพืช  | 35   |
| 4.2 ผลการศึกษาศักยภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับนิกเกิล          |      |
| 4.2.1 ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม                                   | 41   |
| 4.2.2 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ                               | 44   |
| 4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างผักตบชวา โสน<br>และบอน | 47   |
| 4.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ                                     | 48   |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ   |      |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 53   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ  | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บรรณานุกรม   | 55   |
| ภาคผนวก  |      |
| ภาคผนวก ก หลักการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พ          | 57   |
| ภาคผนวก ข หลักการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ( SEM ) | 63   |
| ภาคผนวก ค มาตรฐานน้ำทิ้ง                                       | 70   |
| ภาคผนวก ง การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานникเกิด         | 74   |
| ภาคผนวก จ ตารางแสดงการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน                    | 75   |
| ภาคผนวก ฉ ตารางแสดงการหาค่าไอโซเทอร์ม                          | 80   |
| ภาคผนวก ช การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับและการศึกษาค่าคงที่ | 81   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ $1/n$ และ $K$ จากการคำนวณด้วยสมการคูชชับบแบบ<br>Freudlich | 51   |
| ตารางที่ 4.2 อธิบายความหมายของค่า $K$ และ $1/n$                                     | 52   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงการตกตะกอนทางเคมีของนิกเกิลที่ pH 10   | 5    |
| รูปที่ 2.2 แสดงการแลกเปลี่ยนไอออน   | 6    |
| รูปที่ 2.3 แสดงการออสโมซิสย้อนกลับ  | 7    |
| รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง  | 8    |
| รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir  | 12   |
| รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich  | 13   |
| รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส   | 17   |
| รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส   | 18   |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน  | 19   |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิกนิน  | 19   |
| รูปที่ 2.11 (ก) แสดงภาพของผักตบชวาที่นำมาใช้ในการทดลอง  | 21   |
| (ข) แสดงลักษณะของผักตบชวาที่ใช้ทดลองหลังจากผ่านการบดและร่อน   | 21   |
| รูปที่ 2.12 (ก) แสดงภาพของบอนที่นำมาใช้ในการทดลอง   | 22   |
| (ข) แสดงลักษณะของบอนที่ใช้ในการทดลองหลังจากผ่านการบดและร่อน   | 22   |
| รูปที่ 2.13 (ก) แสดงภาพของโสนที่นำมาใช้ในการทดลอง   | 23   |
| (ข) แสดงลักษณะของโสนที่ใช้ในการทดลองหลังจากผ่านการบดและร่อน   | 23   |
| รูปที่ 4.1 (ก) แสดงลักษณะของผักตบชวาที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง<br>Scanning Electron Microscope (SEM) | 36   |
| (ข) แสดงลักษณะของบอนที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง<br>Scanning Electron Microscope (SEM)                 | 36   |
| (ค) แสดงลักษณะของโสนที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง<br>Scanning Electron Microscope (SEM)                 | 36   |
| รูปที่ 4.2 แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของผักตบชวา<br>ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) | 37   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.3 แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของบอน<br>ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)                        | 38   |
| รูปที่ 4.4 (ก) แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของเนื้อไม้โสน<br>(ข) แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของแกนไม้โสน | 39   |
| รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลา<br>ที่เหมาะสมของผักตบชวา  | 41   |
| รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลา<br>ที่เหมาะสมของบอน   | 42   |
| รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลา<br>ที่เหมาะสมของโสน   | 43   |
| รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH<br>ที่เหมาะสมของผักตบชวา  | 44   |
| รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH<br>ที่เหมาะสมของบอน   | 45   |
| รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH<br>ที่เหมาะสมของ โสน   | 46   |
| รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับนิกเกิลของพืช 3 ชนิด<br>ณ มวลพืช 1 กรัม                                       | 47   |
| รูปที่ 4.12 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของผักตบชวา  | 48   |
| รูปที่ 4.13 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของบอน   | 49   |
| รูปที่ 4.14 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของโสน   | 49   |
| รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของผักตบชวา บอน และ โสน  | 50   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันมนุษย์ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกซึ่งของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะก่อให้เกิดปัญหาในระบบสิ่งแวดล้อม ทั้งดิน น้ำ และอากาศ โลหะหนักนับเป็นสารพิษชนิดหนึ่งที่มีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ การปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ เมื่อโลหะหนักปนเปื้อนในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำนั้น กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณโลหะหนักมากจะเกิดเป็นพิษเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้ามีน้อยก็จะทำให้เกิดเป็นพิษเรื้อรังหรือพิษสะสมในสิ่งแวดล้อม เช่น สะสมในสัตว์น้ำและสะสมในพืช เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์และพืชเป็นอาหาร ทำให้เกิดการสะสมในร่างกายซึ่งก่อให้เกิดอันตรายได้

นึกเกิดเป็นส่วนประกอบตั้งต้นในการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น โรงงานทำเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานแบตเตอรี่ การผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวที่มีนิกเกิลปนเปื้อนอยู่จะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมสูง ดังนั้น การกำจัดนิกเกิลออกจากรน้ำเสียสามารถช่วยลดการปนเปื้อนจากโลหะหนักชนิดนี้ได้

วิธีการบำบัดโลหะหนักมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) หรือ การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะมีประสิทธิภาพและข้อจำกัดในการใช้แตกต่างกัน บางวิธีมีกระบวนการที่ซับซ้อน ทำการดูแลรักษายาก และเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ วิธีการดูดซับเป็นวิธีการบำบัดโลหะหนักอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายต่ำ ดูแลง่าย ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกใช้วิธีการดูดซับมาบำบัดการปนเปื้อนของนิกเกิล โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวกลางในการดูดซับจากพืช 3 ชนิด คือ ผักตบชวา โสน และบอน พืชเหล่านี้เป็นพืชที่หาได้ทั่วไปในท้องถิ่น สามารถแพร่พันธุ์ได้เร็ว มีความปลอดภัยในการนำมาใช้เป็นตัวกลาง และมีโครงสร้างที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการดูดซับ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิล เพื่อให้การบำบัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อที่จะพัฒนาให้ใช้กับการดูดซับของโลหะหนักอื่น ๆ ต่อไปในอนาคตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำวัสดุที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาการบำบัดโลหะหนัก คือ นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับที่ได้จากพืช 3 ชนิด คือ ผักตบชวา โสน และบอน
3. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางทั้งสาม
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางทั้งสาม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับที่ได้จากพืช 3 ชนิด คือ ผักตบชวา โสน และบอน โดยที่ผักตบชวาและบอน ใช้บริเวณ ก้านใบ ส่วน โสน ใช้บริเวณลำต้น เนื่องจากเปลือกจะแข็งมากและไม่มีลักษณะของโครงสร้างในการดูดซับ
2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้พืชทั้งสามชนิด ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับ ระยะเวลาในการดูดซับ และสภาวะความเป็นกรด-ด่าง
3. วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์และนิกเกิลที่เหลืออยู่หลังจากการดูดซับด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

1. กำหนดปัญหา
2. ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง
3. เลือกกลุ่มตัวอย่าง
4. จัดทำเค้าโครงอย่างละเอียด
5. วางแผนการทดลอง
6. จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
7. ศึกษาความสามารถในการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์จากพืชที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวา โสน และบอน
8. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์จากพืชทั้ง 3 ชนิด
9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำพืชในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดโลหะหนักที่เกิดขึ้นเป็นพิษในน้ำเสีย
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเกิดในน้ำเสียของพืชแต่ละชนิด
3. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับหนักเกิด โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน และนำสถานะที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักอื่น ๆ ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

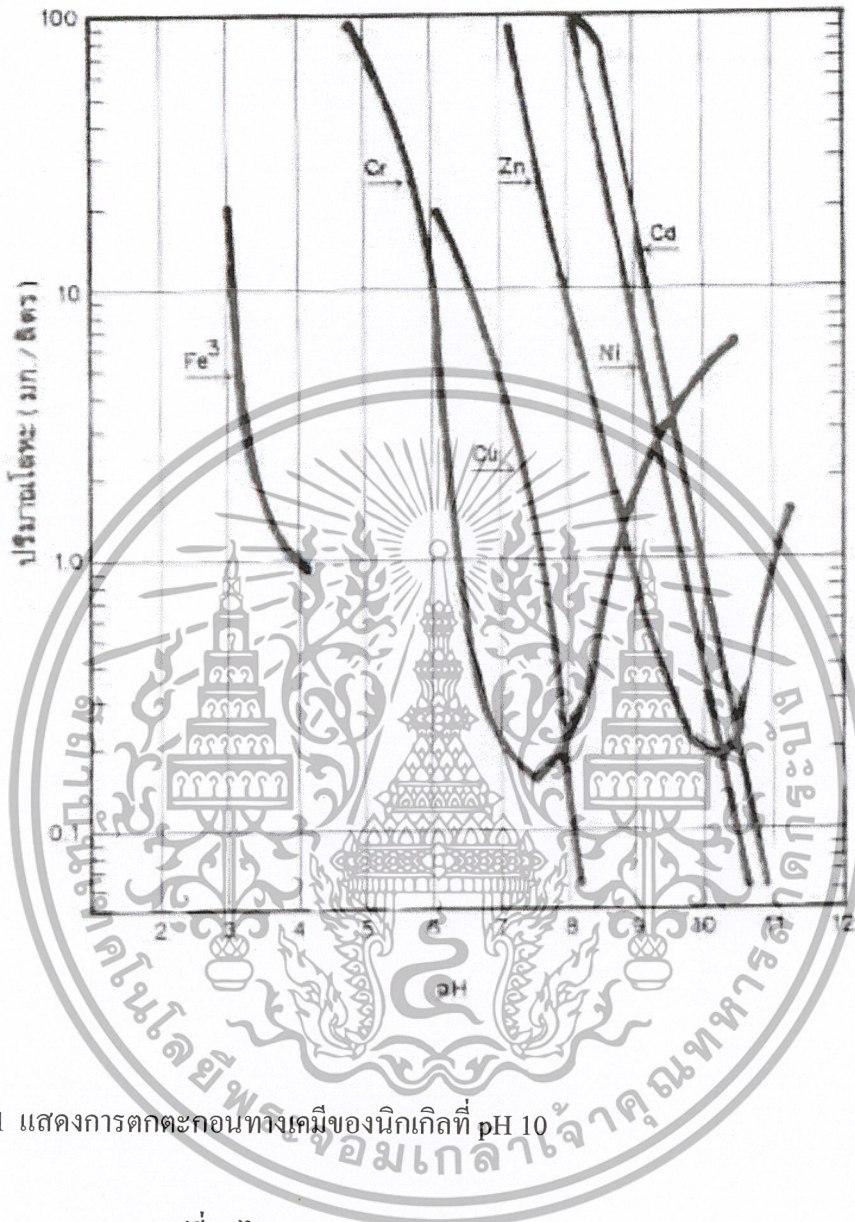
กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมได้แก่ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้ (ชุตินา, 2543)

##### 2.1.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน กระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลาย โดยวิธีเติมสารเคมีให้ผสมกับน้ำเสียอย่างทั่วถึง ซึ่งการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์



จากสมการ 2.1 จะเห็นได้ว่าการตกตะกอนของนิกเกิลจะเริ่มตกตะกอนตั้งแต่ pH 8 เป็นต้นไป ดังรูปที่ 2.1

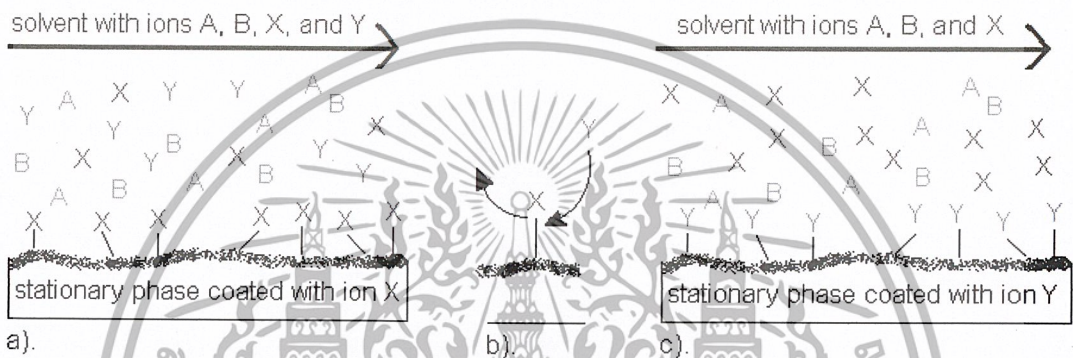
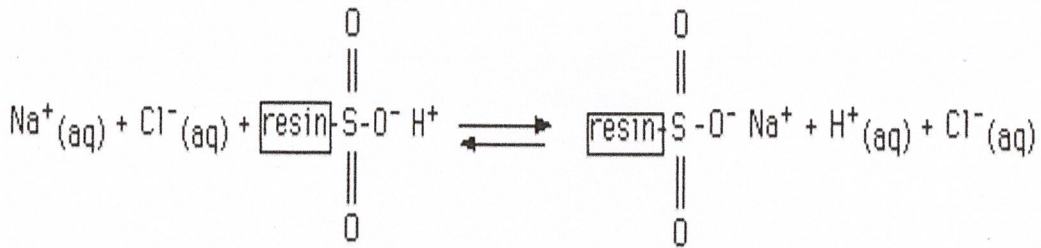


รูปที่ 2.1 แสดงการตกตะกอนทางเคมีของนิกเกิลที่ pH 10

### 2.1.2 การแลกเปลี่ยนไอออน ( Ion exchange )

กระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับด้วยเรซินไม่เท่ากัน ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมาจากธรรมชาติ และสังเคราะห์ขึ้น จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามซึ่งอยู่ในสารละลาย (รูป 2.1) เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะที่มีปริมาณน้อยและต้องการประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเช่นสมการ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินประจุบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

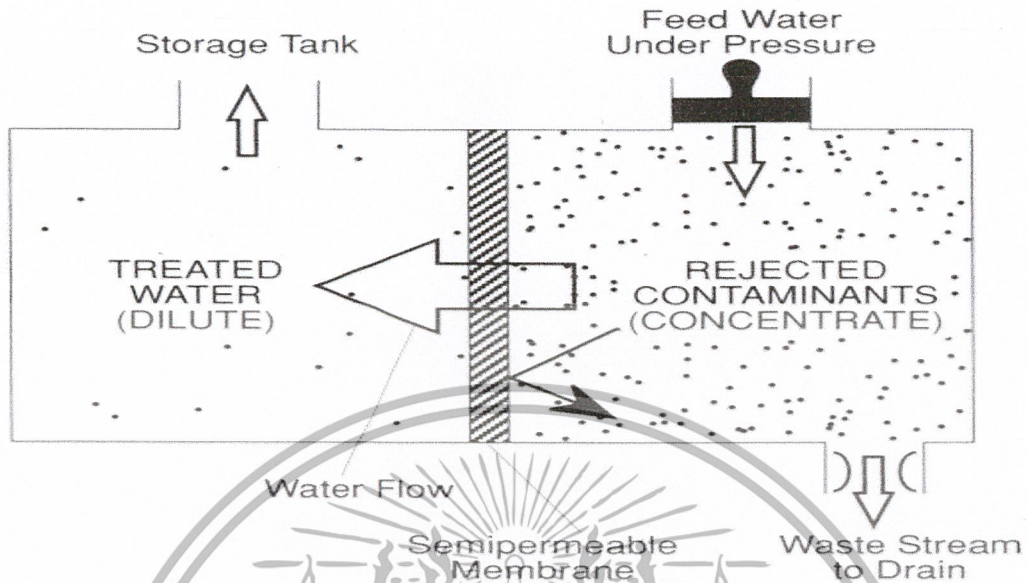


## รูปที่ 2.2 แสดงการแลกเปลี่ยนไอออน

### 2.1.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น จะต้องใช้ความดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ (รูปที่ 2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



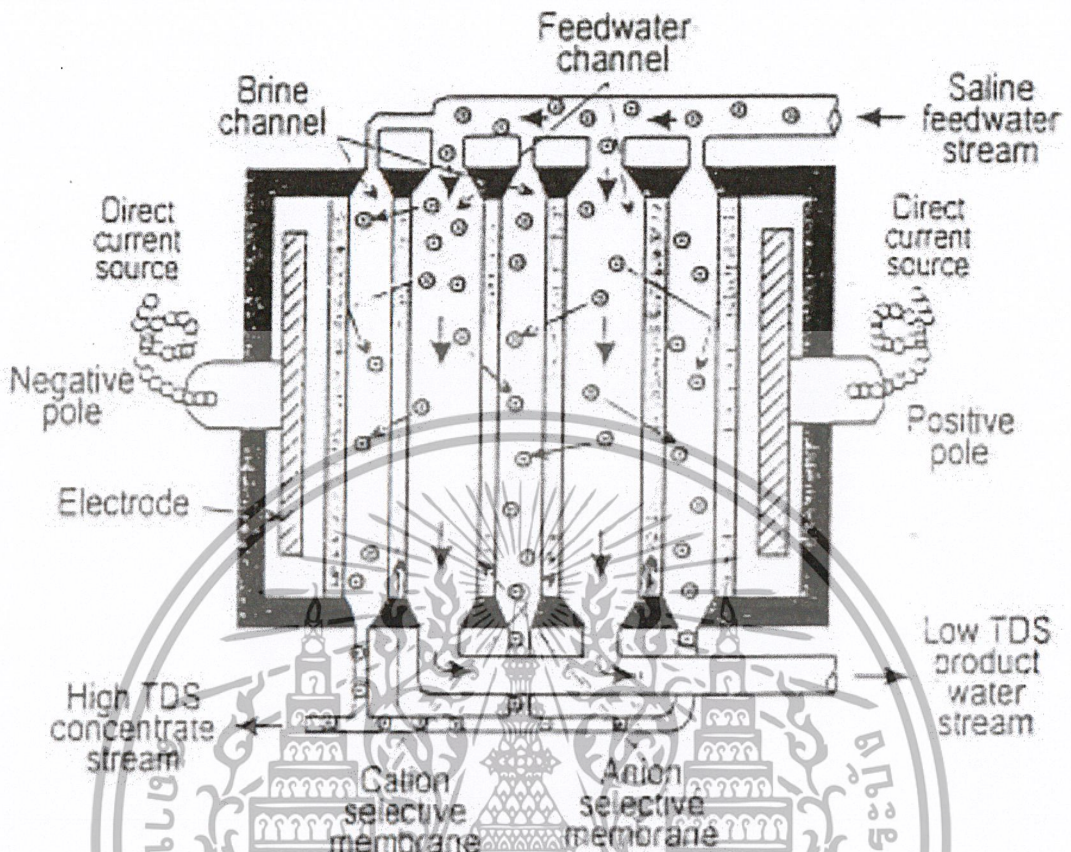
รูปที่ 2.3 แสดงการออสโมซิสย้อนกลับ

#### 2.1.4 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีการง่าย ๆ ทำโดยระเหยน้ำออกทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีทั้งระเหยที่ความดันบรรยากาศ และการระเหยภายใต้สุญญากาศ ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง ๆ เท่านั้น เป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

#### 2.1.5 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด ( Ion selective membrane ) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีการนี้มีต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดขนาดของไอออนที่ต้องการได้



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง

### 2.1.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงแต่ไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

### 2.1.7 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการดูดซับในการกำจัดโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นวิธีการหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้กันมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กจนถึงขั้น โมเลกุล ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือกรองแบบธรรมดา โดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกว่าปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนมาเกาะที่ผิวว่ากระบวนการดูดซับ (Adsorption) ตัวที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์ดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิว (Surface) โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากหลุมฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (Suzuki, 1990)

### 2.2.1 ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) แบ่งได้ 3 ประเภท

2.2.1.1 สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ (Activated silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2.2.1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้กันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้ความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 450 – 1500 ตารางเมตรต่อกรัมและมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10 – 10000 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืชและสัตว์ จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน

2.2.1.3 ประเภทของสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันต์ แต่สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าคือ สามารถปรับสภาพใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก เช่น เปลือกแกง

## 2.2.2 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 กระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ยึดติดกับผิวตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่อ่อน (Weak Van der Waal's force) เรียกกระบวนการดูดซับนี้ว่า การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ (Reversible process) ส่วนกระบวนการที่ตัวดูดซับหลุดออกจากผิวตัวดูดซับเรียกว่า Desorption โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น เรียกว่า Multilayer

2.2.2.2 กระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับ โดยพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ และยากต่อการเกิด Desorption การดูดซับทางเคมีนี้ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่เป็นชั้นเดียวเรียกว่า Monolayer

## 2.2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

### 2.2.3.1 สมบัติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่แต่รูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

### 2.2.3.2 สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนที่เกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้

น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นแบบกิ่ง (Branched chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่า โมเลกุลที่เป็นเส้นตรง (Straight chain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.3 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น หาก pH ลดลง ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

### 2.2.3.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้นแต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

### 2.2.3.5 เวลาสัมผัส

เวลาดัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสต้องเหมาะสมที่จะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้จริง

## 2.2.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้กับความเข้มข้นของสารที่เหลือนอยู่ ณ จุดสมดุลเพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์

### 2.2.4.1 Langmuir Isotherm

การดูดซับแบบ Langmuir เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่น ๆ ซึ่งมีการสมมติฐานว่าการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับ โมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นผิวตัวดูดซับ ดังสมการ 2.3

$$Q = \frac{Q_m KC}{1+KC} \quad \text{----- (2.3)}$$

เมื่อ  $Q$  = จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักที่ความเข้มข้น  $C$

$Q_m$  = จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวดูดซับ

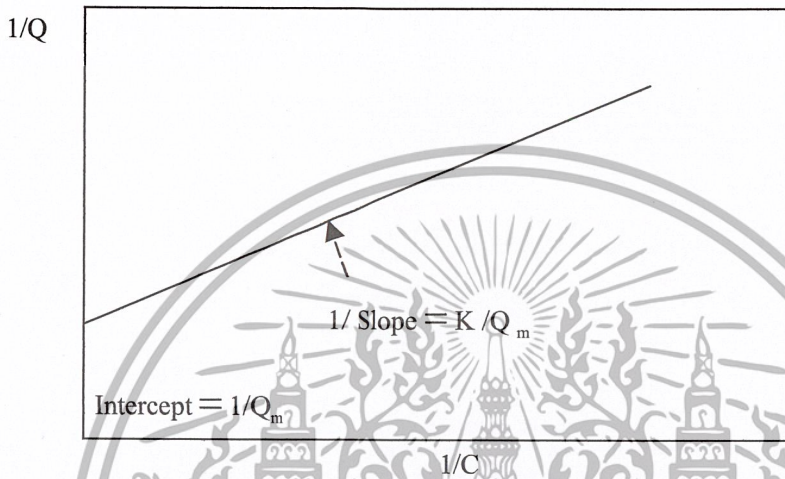
$C$  = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (mg/l, M)

$K$  = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเป็นสมการเส้นตรง (สมการ 2.4)จะได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{KQ_m} \frac{1}{C} \quad \text{-----(2.4)}$$



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir (Suzuki, 1990)

2.2.4.2 Freundlich Isotherm

การดูดซับแบบ Freundlich นี้เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อน ๆ แสดงดังสมการ 2.5

$$q_c = \frac{X}{M} = KC^{1/n} \quad \text{----- (2.5)}$$

เมื่อ

$q_c$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

$X$  = ปริมาณของสารที่ดูดซับ (mg)

$M$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ใช้ (g)

$C$  = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mg/l , M)

$K$  = ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

$1/n$  = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration dependence)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า  $X/M$  และ  $C$  จากการทดลองลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการ 2.6

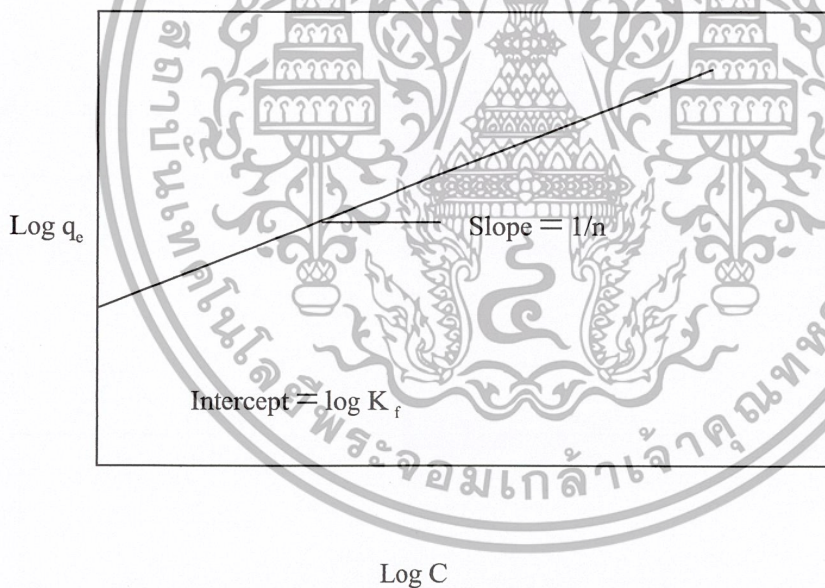
$$\text{Log } q_e = \text{Log} [X/M] = \log K + 1/n \log C \quad \text{----- ( 2.6)}$$

สามารถหาค่า  $K$  และ  $1/n$  ได้จากกราฟ โดยที่

$1/n$  = ความชันของกราฟ

$K$  = ค่า  $X/M$  ที่ค่า  $C = 1$  (รูปที่ 2.6)

หากค่า  $K$  และ  $1/n$  มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า  $1/n$  สูงแสดงว่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงข้ามกันเมื่อความเข้มข้นสูงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich (Suzuki, 1990)

การหาไอโซเทอร์มการดูดซับนั้น กระทำได้โดยการนำตัวดูดซับที่บดละเอียดปริมาณที่แตกต่างกันมาแช่กับน้ำที่มีสารปนเปื้อนจนถึงจุดสมดุลของการดูดซับจากนั้นแยกน้ำใส่ออกมาวิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อนที่เหลือ ผลการทดสอบที่ได้นำไปใช้คัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมในการใช้งานนั้น ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ Freundlich Isotherm ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท นิกเกิล โครเมียม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักมีสภาพเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีแผ่เป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบ และเสถียรกว่าโลหะอิสระ (ชูดิมา, 2543)

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมสูง ได้แก่ อาร์เซนิก (As) ทอง (Au) แคดเมียม (Cd) คอปเปอร์ (Cu) โครเมียม (Cr) ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) เทลลูเรียม (Te) และสังกะสี (Zn) และกลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงรองลงมา ได้แก่ แบเรียม (Ba) เบิลเลียม (Be) เหล็ก (Fe) โมลิบดีนัม (Mo) ไทเทเนียม (Ti) และ ยูเรเนียม (U)

ความเป็นพิษของกลุ่มโลหะหนักเหล่านี้เป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณแตกต่างกัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาที่สำคัญของโลหะหนักเหล่านี้คือ กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตจากการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต (Berman, 1980)

### 2.3.1 นิกเกิล

นิกเกิลพบอยู่โดยทั่วไปในเปลือกโลกในสภาพสินแร่ peritlandite , pyrrhotite อยู่ในรูปของซัลไฟด์ของเหล็กและนิกเกิล  $(NiFe)_xS_y$  สินแร่ amierite  $(Ni, Mg) - NiO_3 \cdot nH_2O$  หรือ สินแร่ของอาร์เซไนต์  $(NiAs)$  นอกจากนี้ยังพบในพืช สัตว์ ความเข้มข้นของนิกเกิล ในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างอยู่ระหว่าง 2.73 - 27.3 พีพีบี (วรพันธ์, 2532)

ประโยชน์ของนิกเกิลจากการศึกษาพบว่านิกเกิลเป็นธาตุที่สำคัญในสารอาหารของสัตว์ และพบเป็นส่วนประกอบของ RNA และ DNA แต่ร่างกายต้องการนิกเกิลเพียงเล็กน้อย มีความจำเป็นต่อเมตาบอลิซึมหลายประการ คนจะได้รับนิกเกิลจากอาหารวันละ 0.3 - 0.6 มิลลิกรัมต่อวัน และสามารถขับออกทางร่างกายได้ทั้งทางปัสสาวะและอุจจาระและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ คือนิกเกิลบริสุทธิ์ใช้เป็นขั้วแอโนดในตัวต้านทานของวิทยุและหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ทำโลหะผสมมากกว่า 3000 ชนิด เช่น นิกเกิลผสมเหล็กใช้ทำเครื่องยนต์หนักและส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า นิกเกิลผสมทองแดงใช้ทำเหรียญกษาปณ์ นิกเกิลผสมโครเมียมและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กใช้ทำโลหะสแตนเลส นิกเกิลยังใช้ในการทำหัวเทียน Reney นิกเกิล คืออะลูมิเนียมกับนิกเกิลผสมในอัตราส่วนที่เท่า ๆ กัน ใช้เป็นตัวคะตะไลต์ เพื่อให้เกิดไฮโดรเจนชั้นของน้ำมัน นิกเกิลไฮดรอกไซด์และเกลือของนิกเกิล ใช้ในกระบวนการทำแม่พิมพ์ เครื่องสำอาง สีทาบ้าน ชนิดแห้งเร็ว เกลือซัลเฟตของนิกเกิลใช้ทำสีน้ำมันและสีน้ำ (Berman, 1980)

การแพร่กระจายของนิกเกิลสู่สิ่งแวดล้อมและแหล่งน้ำเกิดโดยการกัดเซาะพังทลายของเปลือกโลก หิน ดิน และสินแร่ การทำเหมือง นอกจากนี้กระบวนการผลิตและกระบวนการใช้ในอุตสาหกรรมที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ส่วนใหญ่แล้วเกิดจากการกระทำของมนุษย์ (Berman, 1980)

โลหะนิกเกิลและสารประกอบของนิกเกิลทำให้เกิดผิวหนังอักเสบ ฝุ่นของนิกเกิลสามารถทำให้เกิดมะเร็งในช่องจมูกและปอด ฟูมของนิกเกิลทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ อาการเริ่มแรก que แสดงออกถึงการแพ้พิษนิกเกิล คือเกิดอาการคัน ประมาณวันที่ 7 หลังจากการสัมผัสนิกเกิล และต่อมาจะมีปฏิกิริยาตามบริเวณข้อศอก หนึ่งตา คอ และบริเวณใบหน้า ในกรณีที่เป็นเรื้อรัง สีของผิวหนังมักจะมื่ออาการเริ่มเปลี่ยนแปลงไปถ้าผู้ป่วยเริ่มมีอาการแพ้เกิดขึ้น มีการเกิดอาการแพ้อย่างต่อเนื่องเรื่อยไป (Berman, 1980)

สารประกอบนิกเกิลคาร์บอนิกเป็นของเหลวที่ไม่มีสี มักจะใช้ในกระบวนการทำให้นิกเกิลให้บริสุทธิ์ สารนี้เป็นพิษต่อร่างกายมาก ถ้าผู้ปฏิบัติงานได้รับจะทำให้เกิดโรคมะเร็งกับระบบทางเดินหายใจ สารประกอบอื่นๆ ของนิกเกิล เช่นนิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลซัลไฟด์ จะเป็นอันตราย ซึ่งจะมีอาการเริ่มต้นดังนี้ ปวดศีรษะ ง่วงซึม ไอ หายใจไม่สะดวก อ่อนเพลีย ปวดหลัง และหน้าอก อาเจียน ปวดท้อง ท้องร่วง และตาเขียวคล้ำ

การแพ้พิษนิกเกิลแบบเฉียบพลันก็จะทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ วิงเวียนศีรษะ เจ็บหน้าอก ไอ ชนิดรุนแรง ตัวซีดคล้ำ และมีอาการเกี่ยวกับระบบย่อยอาหาร คนไข้จะมีอาการอ่อนเพลียอย่างมาก มีไข้ เม็ดเลือดขาวผิดปกติ อาการโรคปอดบวมจะแทรกขึ้นทันที และทำให้ระบบทางเดินหายใจหยุดทำงานเฉียบพลัน ซึ่งทำให้เกิดการบวมน้ำในสมองและอาจตายได้ สำหรับผู้ที่พบว่าเสียชีวิตเนื่องจากพิษของนิกเกิล จะพบนิกเกิลในปริมาณมากในปอด และมีบางส่วนในไต ตับ และ สมอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของพืช

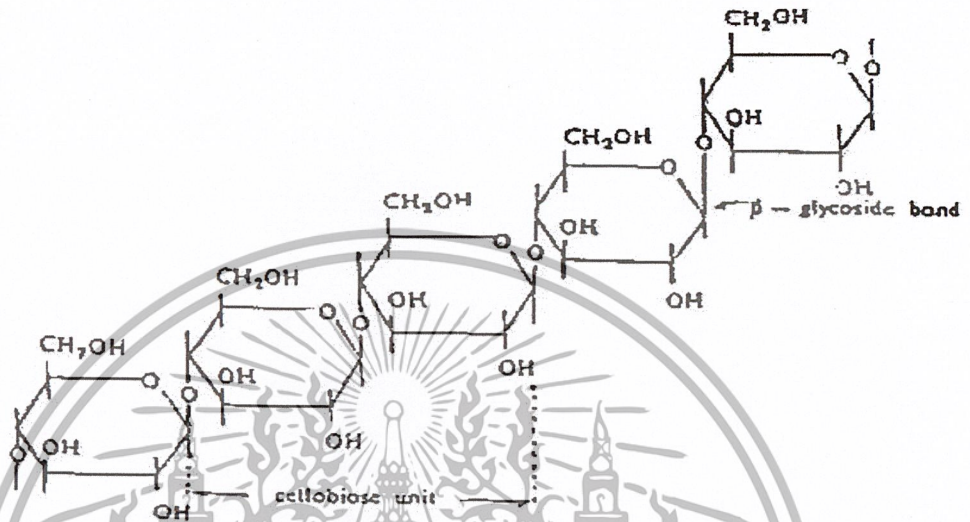
วัสดุพืชในธรรมชาติจะประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์ และเคมีอนินทรีย์อยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน สารประกอบฟีนอล สารที่มีองค์ประกอบของอีเทอร์ กรดอะลิฟาติกฟอสเฟต ซิลิเกต ซัลเฟต คาร์โบเนต ไนเตรต และแมกนีเซียม เป็นต้น จากองค์ประกอบพืชดังกล่าวมาแล้วนี้ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีอินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ ลิกนิน (Lignin) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับคาร์โบไฮเดรตถ้าแยกตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืช จะพบว่าที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

### 2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพืชที่มีมากที่สุด ในธรรมชาติมีประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช ในโครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D- glycoside เชื่อมต่อกันจากคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 เข้ากับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ด้วยพันธะ  $\beta$ -glycoside (รูป 2.8) ความยาวของโซ่จะ ประกอบไปด้วย D- glucose ตั้งแต่ 300 ถึง 2500 หน่วย และถ้า ไฮโดรไลซ์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลซ์ทั้งหมดจะได้ D- glucose

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ จะไม่เกิดการละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถที่จะละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ ดังนั้นสามารถที่จะแบ่งชนิดของเซลลูโลสออกตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างแก่ ได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. a-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลาย 17.5 % NaOH
2. b-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลาย 17.5 % NaOH
3. g-Cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลาย 17.5 % NaOH และในสารละลายกรดเจือจาง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส (สังข์, 2540)

#### 2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

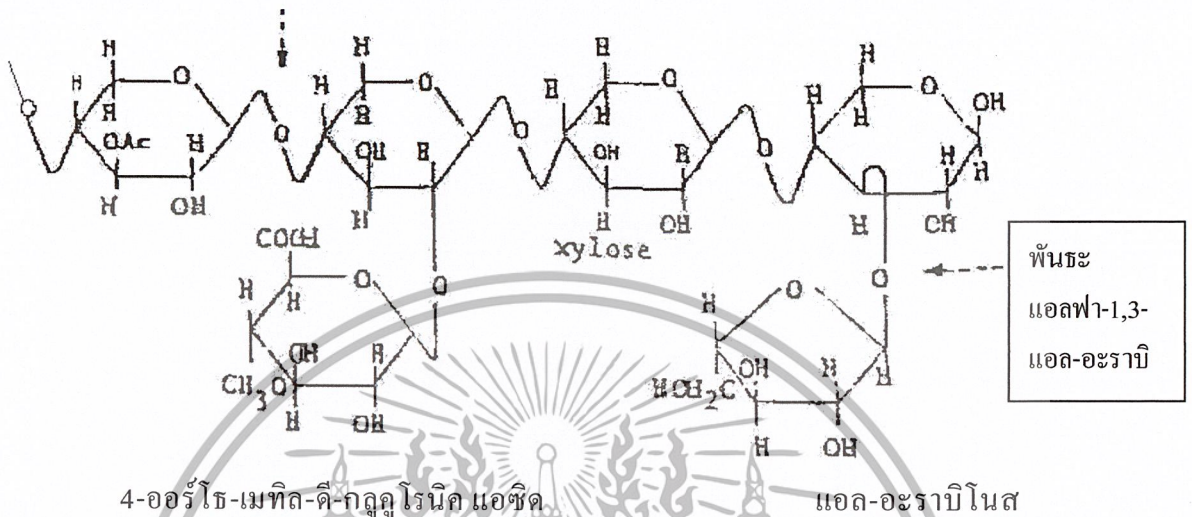
เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่มีมากรองลงมาจากเซลลูโลส จะมีลักษณะเป็น Heterogenous ที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกันเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) โครงสร้างจะเป็นลักษณะของกิ่งก้านสาขาแตกต่างไปจากเซลลูโลส (รูป 2.9) และน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาวประมาณ 30 - 50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลัก คือ ไซแลน (xylan) เมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตส และเฮกโซส

ไซแลนจะมีลักษณะโครงสร้างหลัก คือ พอลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลส ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-Xylosidic มี side chain พวกอะลาบินอส และกรดกลูคูโรนิก ไซแลนของพืชต่างชนิดกันมีโครงสร้างหลักที่เหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันเฉพาะชนิด จำนวนและตำแหน่งของหน่วย side chain ในพืชชนิดไม้เนื้อแข็ง ไซแลนจัดเป็นพวก acetylated - (4-O-methylglucurono) xylan มี 4-O-methyl-D-glucuronic acid เป็น side chain เชื่อมด้วยพันธะแอลฟาตรงตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 ของน้ำตาลไซโลส ส่วนชนิดของพืชไม้เนื้ออ่อนไซแลนจัดเป็นพวก arbin-(4-O-methylglucurono) Xylan มี side chain ของ 4-O-methyl-D-glucuronic acid เชื่อมด้วยพันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลฟาตรงตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 2 และมี L-arabinofuranose เชื่อมด้วยพันธะแอลฟาเช่นกัน แต่จะเชื่อมตรงตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 3



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (อ้าง, 2540)

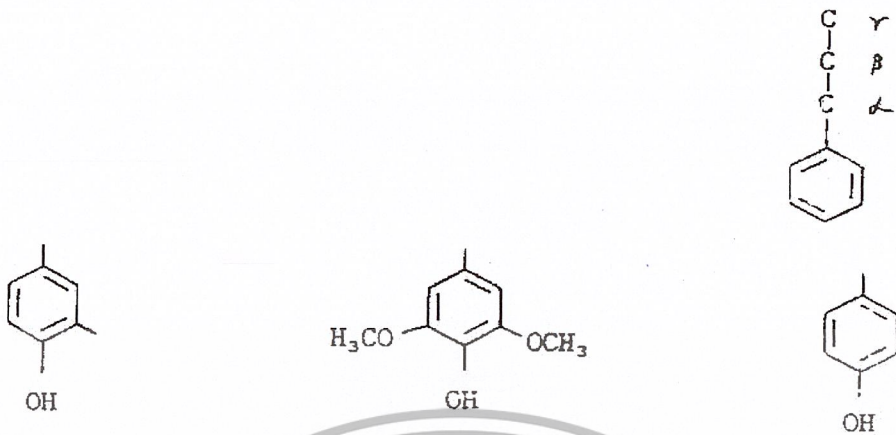
#### 2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่ในบริเวณรอบเซลล์ และป้องกันเซลล์จากการย่อยสลาย จากการค้นคว้าที่ผ่านมา ยังไม่พบโครงสร้างที่แน่นอนของลิกนิน ทราบแต่เพียงว่าลิกนินเป็นโพลิเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของโครงสร้าง Phenylpropane type ( $C_0 - C_3$ ) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ

- ก. Coniferyl alcohol ( $R_1=H, R_2=OCH_3$ )
- ข. Sinapyl alcohol ( $R_1=R_2=OCH_3$ )
- ค. p - coumaryl alcohol ( $R_1=R_2=H$ )

โดยปกติจะไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินจัดเป็นสารประกอบประเภทใดเพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียวที่จะเกาะกันเป็นสายยาว ซึ่งมีอยู่หลายแบบที่ประกอบด้วยหน่วยต่าง ๆ เหล่านี้ คือ Phenyl Propane , Guaiacyl Unit , Syringly Unit และ para - Hydroxyphenyl Unit ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูป 2.10 และโครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูป 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



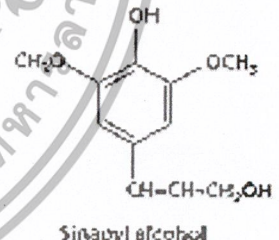
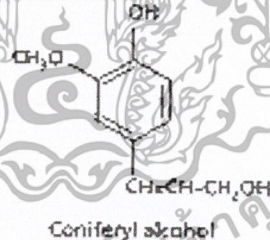
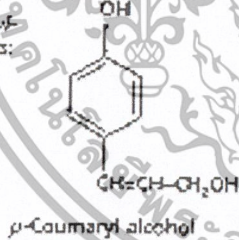
กัวอิมะซิท ยูนิต

ไซรินกิล ยูนิต

พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิต

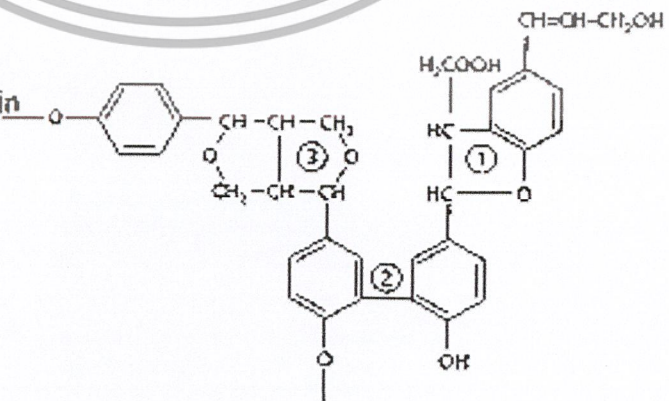
รูปที่ 2.9 ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน

3 main phenylpropane units:



Bonds

1. ring - side chain
2. ring - ring
3. side chain - side chain



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิกนิน (สังข์, 2540)

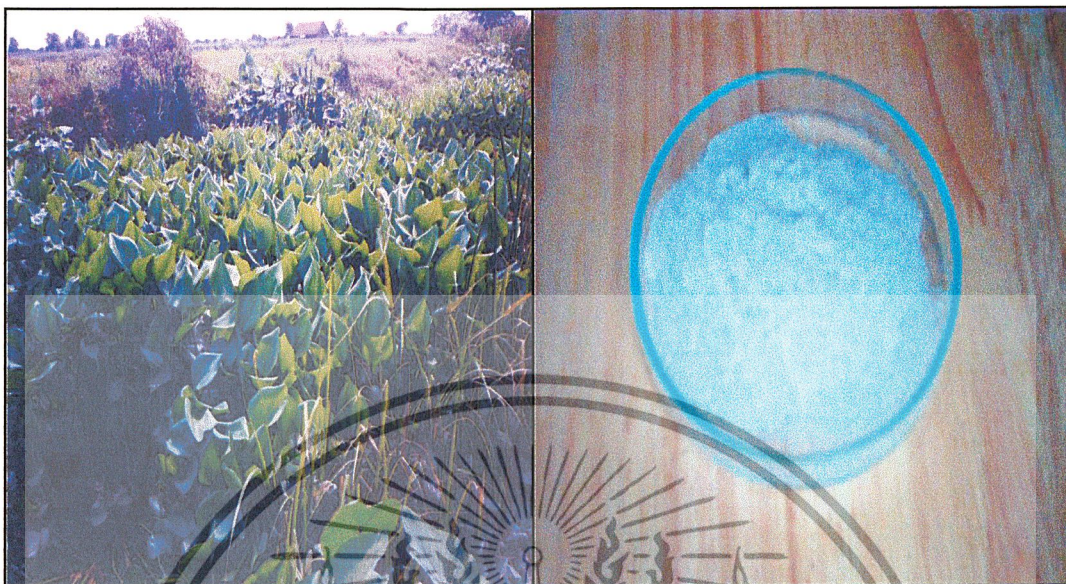
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา (ผักพื้นบ้าน, 2540)

### 2.5.1 ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) solms)

ผักตบชวา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Eichhornia crassipes* solms หรือชื่อสามัญว่า Waterhyacinth และชื่อไทยว่า ผักตบชวา , ผักปอง , ผักตบ , ผักปง ผักตบชวาเป็นวัชพืชลอยน้ำ (floating - plant) ที่มีการเจริญเติบโตออกงามได้ในแหล่งน้ำจืดทั่วไป จัดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในตระกูล Pontederiaceae และสกุล *Eichhornia* ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 5 ชนิดในสกุลนี้ สำหรับ ชนิดที่มีอยู่ในประเทศไทย คือ *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms. ผักตบชวามีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ และมีการแพร่ระบาดในประเทศไทยเนื่องจากการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย ในปี พ.ศ. 2444 ปัจจุบันมีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ในประเทศไทย

ผักตบชวาเป็นพันธุ์ไม้น้ำจืดประเภทล้มลุกมีอายุอยู่ได้หลายปี ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล น้ำลึกและน้ำตื้น ถ้าในน้ำลึกจะมีท่อนลอย (floating structure) ซึ่งจะมีหัวรากลอย (floating rhizomes) และที่ฐานใบจะมีกระเปาะภายในมีลักษณะพองคล้ายฟองน้ำ ลำต้นจะมีสีเขียวสูงประมาณ 5 - 10 เซนติเมตร แต่ถ้าในดินโคลนจะสูงถึง 50 เซนติเมตร มีการเจริญแบบแตกกอ (sympodial) ใบมีการจัดเรียงตัวในลักษณะเบ่งรัศมีออกจากจุดเดียวกัน (rosette) เป็นแบบใบเดี่ยว ประกอบด้วยก้านใบ (petiole) และแผ่นใบ (blade) ถ้าเจริญอย่างไม่แน่นอน ก้านใบจะเปลี่ยนรูปร่าง เป็นท่อนลอยน้ำภายในประกอบด้วย aerenchymatous tissue แต่ก้านใบจะมีลักษณะยาวและไม่พองมากเมื่อเจริญเติบโตอย่างหนาแน่น มากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักของผักตบชวา คือ ราก ซึ่งระบบรากจะเป็นรากฝอย (fibrous root) มีลักษณะอวบขาว เมื่ออายุมากจะสั้น ความยาวจะขึ้นกับปริมาณของแหล่งอาหารในน้ำ ซึ่งรากจะมีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำ การสืบพันธุ์จะมี 2 แบบ คือ แบบอาศัยเพศโดยการใช้ดอก และแบบไม่อาศัยเพศ โดยการแตกหน่อ (ไหล) ซึ่งเป็นวิธีสำคัญในการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นทุก ๆ 6 - 8 วัน ทำให้ลำต้นและใบสามารถคลุมพื้นที่ผิวน้ำได้ร้อยละ 8 ต่อวัน การเจริญเติบโตต้องการปัจจัยคล้ายคลึงกับพืชสีเขียวทั่วไป คือแสงสว่าง และอาหาร ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีพีเอชอยู่ระหว่าง 4 - 10 และอุณหภูมิของน้ำ ไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และในต้นพืชจะมีน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 95 % (89.3 % ในใบและ 96.7 % ในก้านใบ)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.11 (ก) แสดงภาพของผักตบชวาที่นำมาใช้ในการทดลอง

(ข) แสดงลักษณะของผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองหลังจากผ่านการบดและร่อน

### 2.5.2 บอนน้ำ (*Colocasia esculenta* Sahott.)

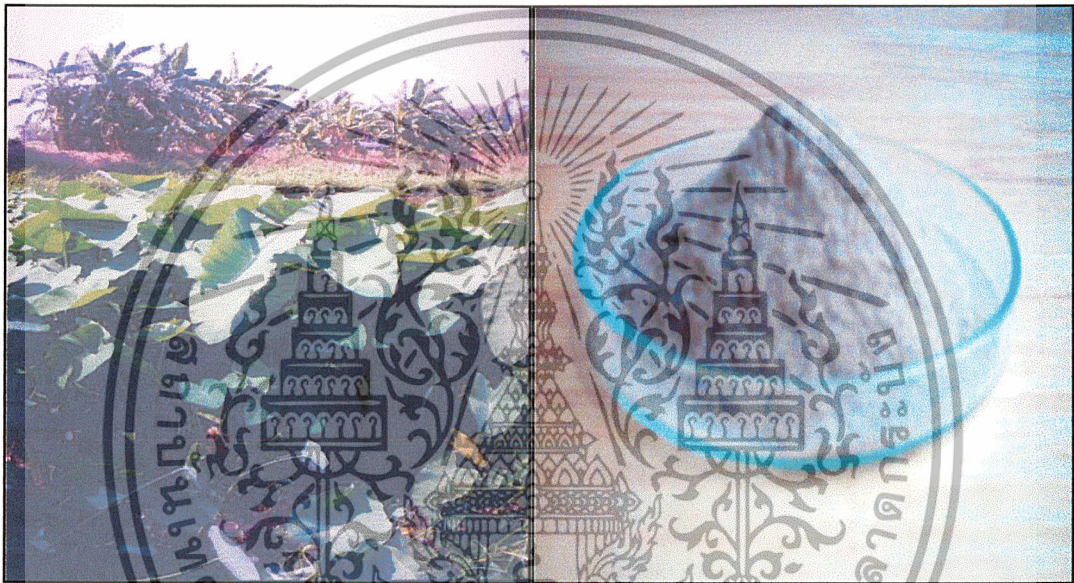
บอนน้ำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Colocasia esculenta* Sahott. หรือชื่อสามัญว่า Elephant Ear และมีชื่อไทยว่า บอน บอนเขียว บอนจินดา บอนท่า บอนน้ำ บอนหวาน บอนเป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Araceae บอนเป็นไม้ล้มลุก พบทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ริมน้ำ ริมห้วย ริมลำธาร ในป่า ชาวบ้านจำแนกเป็นบอนหวานและบอนคัน และบอนหวาน เป็นพืชที่มี ลำต้น(เหง้า) อยู่ใต้ดินและอายุหลายปี ขึ้นเป็นกลุ่มหลายต้นเรียงรายตามที่ลุ่ม ริมน้ำสูงประมาณ 70 - 120 เซนติเมตร ก้านใบออกจากต้นใต้ดิน ก้านใบยาว ในมีรูปร่างคล้ายหัวใจ ปลายแหลมฐานเว้าแหลม ใบกว้าง 20-30เซนติเมตร ยาว 35 - 40 เซนติเมตร หน้าใบเขียว เรียบไม่เปียกน้ำ หลังใบสีชาวนวล มีเส้นใบชัดเจน แต่ละกอจะมี 7-9 ใบ ดอกงอกจากลำต้นใต้ดินเป็นช่อยาว มีกาบ สีเหลืองอ่อนหรือเหลืองนวลหุ้มอยู่ ยาว 26 เซนติเมตร มีดอก เป็นกระเปาะสีเขียว เป็นแท่งอยู่ตรงกลาง กลิ่นหอม ช่วยล่อแมลง ต่อมาจะกลายเป็นผล

ชาวบ้านทางเหนือมีวิธีสังเกتبอนหวานและบอนคัน โดยสังเกตจากใบและต้นของบอนหวานจะมีสีเขียวสด หรือเขียวคล้ำ (เขียวออกน้ำตาล) ไม่มีนวล (นวลสีขาวที่เคลือบอยู่ ตามก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบ) ส่วนใบบอนคันจะมีสีเขียวฉนวนมีนวลเกาะอยู่ตามก้านใบสังเกตเห็นดอก ดอกของบอนหวานจะมีแมลงตอม แต่บอนคันไม่มี

บอนเป็นพืชที่ต้องการน้ำมาก แสงแดดพอสมควร มักขึ้นเองบริเวณที่ลุ่มหรือบริเวณริม น้ำ ริมลำธาร ปลูกง่ายไม่มีศัตรูพืชรบกวน การขยายพันธุ์ทำได้โดยการตัดไหลที่ออกมาจากต้น ไม้ เป็น ปล้อง ๆ โดยปล้องนั้นจะมีหน่อและรากงอกออกมา หรือขุดหน่ออ่อนที่มีรากแล้ว ไปปลูก บริเวณที่ต้องการ



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.12 (ก) แสดงภาพของบอนที่นำมาใช้ในการทดลอง

(ข) แสดงลักษณะของบอนที่ใช้ในการทดลองหลังจากผ่านการรดและร้อน

### 2.5.3 โสน (*Sesbania javanica* Miq.)

โสนมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sesbania javanica* Miq. เป็นพืชในตระกูล Papilionaceae และมีชื่อไทยว่า โสนหิน โสนกินดอก สีปริหลา ผักของแสด โสนในเมืองไทยมีอยู่หลายพันธุ์ด้วยกัน คือ โสนหิน โสนคางคก โสนหางไก่ใหญ่ โสนไก่เล็ก เนื้อไม้ของโสนมีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเบาของภาคกลาง ไม้โสนใช้ทำเป็นของเล่น เนื่องจากเนื้อไม้ของต้นโสนเป็นไม้เนื้อบาง เบา และเหนียว

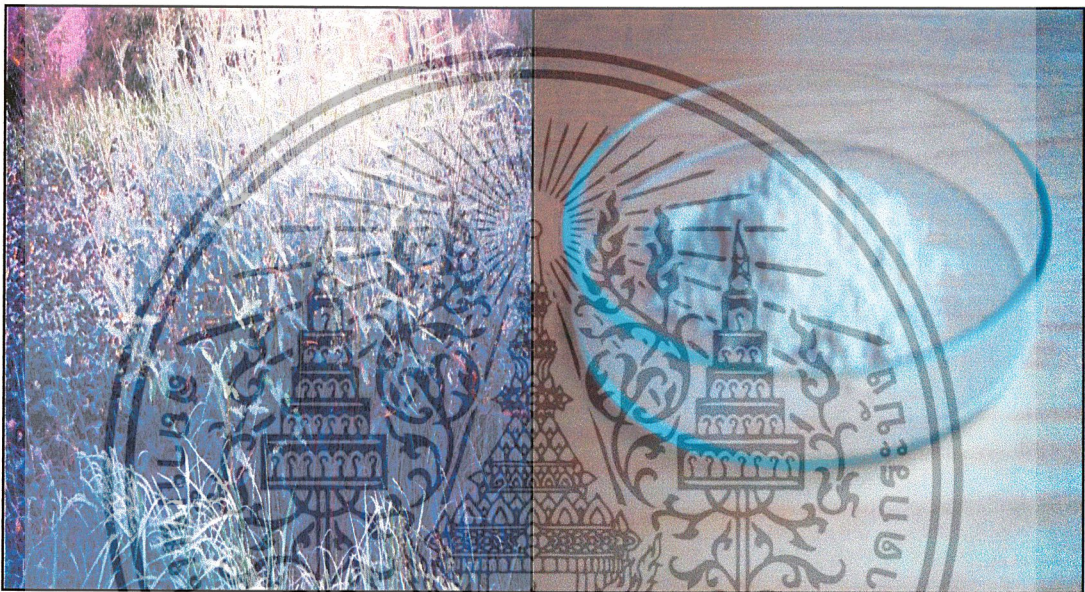
โสนเป็นไม้สกุลเดียวกับแค และเป็นไม้ล้มลุกปีเดียว พบในพื้นที่ที่มีน้ำขังสูงประมาณ 1-

4 เมตร ใบเป็นใบประกอบ มีใบย่อย 10 - 30 คู่ ใบสีเขียว ใบรูปร่างรีและกลม ปลายใบมน ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาว 1.2-2.5 เซนติเมตร กว้าง 2-4 มิลลิเมตร ดอกเป็นดอกช่อกลีบดอกสีเหลือง แต่ละช่อมีดอกย่อย 5-12 ดอก ช่อดอกยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ดอกย่อยยาว 2.5 เซนติเมตร บางครั้งกลีบนอกมีจุดกระ สีน้ำตาลหรือสีม่วงแดง กระจายอยู่ทั่วไป ฝักพอมและยาว ยาวประมาณ 18-20 เซนติเมตร กว้าง 4 มิลลิเมตร ฝักอ่อนสีเขียวเมื่อแก่กลายเป็นสีม่วงและสีน้ำตาล เมล็ดเล็กเรียงอยู่ภายในฝัก



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) แสดงภาพของ โสนที่นำมาใช้ในการทดลอง

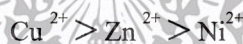
(ข) แสดงลักษณะของ โสนที่ใช้ในการทดลองหลังจากผ่านการบดและร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เกศสุชา พูลคำ (2537) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ขานอ้อยและผักตบชวาในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  โดยทำการวิจัยแบบ Column Method และ Column ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ยาว 40 ซม. วัสดุคิบที่ใช้มีขนาด 0.18-2.12 มม. ในการทดลองจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีและความเข้มข้นของน้ำเสีย กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพคือ Carboxymethylation Reaction และสารเชลลูโลสอีกชนิดหนึ่ง ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี โดยมีการควบคุมอัตราไหลของน้ำเสีย 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง โดยให้ไหลผ่านชั้นสารแลกเปลี่ยนไอออนสูง 20 ซม.

จากผลการทดลองพบว่า เรซินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักน้อยกว่าเรซินที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทางเคมี และสารเชลลูโลสมีลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังนี้



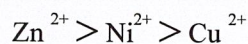
2. จวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล (2539) ทำการวิจัยการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้ขี้เลื่อย (Sawdust) ที่เป็นวัสดุเหลือใช้ และน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสีย 2 ชนิด คือ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่วและนิกเกิลผสมกันในอัตราส่วน 10:1 ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 10, 20 และ 30 มก./ลิตร และนิกเกิลเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก./ลิตร ตามลำดับ และน้ำเสียจากโรงงานประกอบรถยนต์ที่มีระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 18.35 มก./ลิตร และนิกเกิล 2.025 มก./ลิตร พร้อมทั้งศึกษาผลของการทำรีเจนเนอเรชัน ทำการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 7.5 มิลลิลิตร/นาที ผ่านชั้นขี้เลื่อยที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. ที่บรรจุสูง 30 ซม. เก็บตัวอย่างน้ำทุก 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ผลการทดลอง พบว่า ขี้เลื่อยปรับสภาพแล้วสามารถที่จะดูดซับตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียได้ โดยประสิทธิภาพของการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตะกั่วและนิกเกิล และชนิดของน้ำเสีย เมื่อความเข้มข้นของของตะกั่วและนิกเกิลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพจะลดลง และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์จะสูงกว่าในน้ำเสียจากโรงงานประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ขี้เลื่อยปรับสภาพที่ผ่านการทำรีเจนเนอเรชันแล้วด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่า ยังคงดูดซับตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจาก โรงงานประกอบรถยนต์ได้สูงสุด 70.16 % และ 53.83 % ตามลำดับ

3. **ชีวรัตน์ และคณะ (2544)** ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งตัวดูดซับที่นำมาทำการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันของขนาด และสารที่ใช้กระตุ้น โดยใช้เปลือกหอยแครงที่มีขนาด 8-16 และ 16-100 เมช กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชูและกรดเกลือ พบว่า เปลือกหอยแครงขนาด 16-100 เมชที่กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชูมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ค่าคงที่ที่คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ Freundlich มีค่าเท่ากับ 115.82 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมเปลือกหอยแครง และในการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ของตัวดูดซับโดยใช้น้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัม/ลิตร จากผลของการบำบัดน้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนได้ 522 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ โดยน้ำที่บำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร

4. **นันทนา อธิพรโกวิท (2538)** ได้ทำการวิจัยโดยใช้ผักตบชวาในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ 2 ซม. บรรจุวัสดุสูง 20 ซม. ผักตบชวาที่ใช้มีขนาด 0.18-2.12 มิลลิเมตร ในการทดลองจะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีและความเข้มข้นของน้ำเสีย กระบวนการปรับสภาพทางเคมีที่ใช้คือ Sulphoethylation Reaction และ Crosslink-Xanthation Reaction โดยมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง

จากการทดลอง พบว่าอัตราที่ปรับสภาพเป็นชนิดซัลโฟเอทิล มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประมาณ 0.233-0.503 น้ำหนักกรัมสมมูลต่อกรัม และชนิดครอสส์ลิงค์-แซนเทท มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประมาณ 0.29-0.595 น้ำหนักกรัมสมมูลต่อกรัม ซึ่งมีค่าต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงค่าสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ พบว่าสารปรับสภาพชนิดครอสส์ลิงค์-แซนเทท มีค่าสารเคมีสูงกว่า สำหรับลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของทั้งสองชนิดเหมือนกัน ดังนี้



5. **Bhargava และคณะ (1985)** ได้ทำการวิจัยโดยใช้ซีลีออยในการกำจัดโครเมียม ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสีย การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiment โดยทำการแปรค่าตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของน้ำเสีย 1, 5, 10, 25 และ 50 มก./ลิตร โดยใช้ความเร็วในการกวน 50

รอบ/นาที่ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 5, 30, 60, 180 และ 360 นาที ทำการกรองเพื่อแยกขี้เลื่อยออกแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก

จากการทดลองพบว่า เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำ (1-5 มก./ลิตร) โครเมียมและตะกั่วถูกกำจัดได้ประมาณ 90-99.9 % และ 80-98.5 % ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้น 10-580 มก./ลิตร โครเมียมถูกกำจัดได้ประมาณ 55-75.5 % , ตะกั่ว 6-30 % และแคดเมียมกำจัดได้สูงเพียง 9 % เท่านั้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณขี้เลื่อยที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการทดลอง

6. Freitas (2000) ได้ทำการศึกษานำมวลพืชของต้นฮอลลิฮ็อก จากส่วนลำต้น ใบ และราก มาอบแห้งที่ 55 องศาเซลเซียส แล้วใช้เป็นตัวดูดซับโครเมียม นิกเกิล ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว จากสารละลายที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน 1000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยการเจือจางเป็น 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทำการดูดซับที่อุณหภูมิปกติ และทำการตรวจวัดปริมาณโลหะด้วยเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์ชนิดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งพบว่า ในรากโลหะที่ถูกดูดซับได้มีลำดับดังนี้คือ นิกเกิล แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และโครเมียม ตามลำดับ ในลำต้น : นิกเกิล ตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และโครเมียม ตามลำดับ ใบ : นิกเกิล แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม ตามลำดับ ซึ่งโลหะที่ถูกดูดซับมากที่สุดในทุกส่วนของลำต้น คือ นิกเกิล (ราก ใบ และลำต้น ตามลำดับ) และข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมายังแสดงว่า ส่วนที่ดูดซับนิกเกิลมากที่สุดคือราก ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่า รากของต้นฮอลลิฮ็อกสามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิล ประสิทธิภาพในการปลดปล่อยโลหะออกจากมวลพืชนั้นสามารถทำได้ถึง 55-90% และผลจากการนำมวลพืชกลับมาใช้ใหม่ก็ให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำพืชกลับมาใช้ใหม่

7. Krishnan และคณะ (1988) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ใบต้นธูปฤๅษี (Cattail Leaves) และเส้นผมของคน ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่  $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  การวิจัยนี้เลือกใช้แบบการทดลองทีละเท โดยมีการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย 1-100 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ปริมาณใบต้นธูปฤๅษีและเส้นผม 50-200 มิลลิกรัม โดยใบต้นธูปฤๅษีที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกตัดให้มีความยาว 5 ซม. และอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นผมที่ใช้จะถูกตัดให้มีความยาว 0.5 ซม. จากนั้นนำไปแช่ใน Ether นาน 30 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำ

จากการทดลองพบว่า ใบต้นธูปฤๅษีสามารถกำจัด  $Cd^{2+}$  ได้ประมาณร้อยละ 21-73,  $Hg^{2+}$  ได้ประมาณร้อยละ 43-54 และ  $Pb^{2+}$  ได้ประมาณร้อยละ 50-68 ส่วนเส้นผมสามารถกำจัด  $Hg^{2+}$  ได้เพียงอย่างเดียวโดยกำจัดได้ประมาณร้อยละ 74-83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**8. Randall และคณะ (1976)** ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกไม้กำจัดไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว โดยทำการปรับสภาพเปลือกไม้เพื่อลดสีที่ตกจากไม้ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 35% ในกรดซัลฟูริก 0.2 N นำเปลือกไม้มาบดและร่อนคัดขนาดระหว่าง 0.29-2.00 มม. อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 38 ชั่วโมง แล้วปรับสภาพทางเคมี โดยใช้สัดส่วนของเปลือกไม้ต่อฟอร์มัลดีไฮด์ต่อกรดซัลฟูริกเท่ากับ 2:1:20 กวนนาน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วล้างด้วยน้ำเย็นจนน้ำล้างมีพีเอชมากกว่า 4 จึงนำไปอบแห้ง

การทดลองนำเปลือกไม้ที่ไม่ได้ปรับสภาพมา 1 กรัม ผสมกับน้ำหรือสารละลายโลหะหนักจำนวน 100 มิลลิลิตร ส่วนเปลือกไม้ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ จะใช้สารละลายที่กรองจากขบวนการปรับสภาพมาเจือจางเป็น 10 เท่า เพื่อให้ได้สัดส่วนเปลือกไม้ต่อสารละลาย 1:100 แล้ว นำน้ำหรือสารละลายโลหะหนักที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ส่วนการทดลองกำจัดโลหะหนัก จะทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Operation) โดยใช้เปลือกไม้ 1 กรัมผสมสารละลายโลหะหนัก 100 มิลลิลิตร กังไว้นาน 24 ชั่วโมง แล้วทำการกรอง นำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำ และการทดลองแบบคอลัมน์ โดยการบรรจุเปลือกไม้ 40 กรัม ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. ป้อนสารละลาย  $Pb(NO_3)_2$  เข้มข้น 18 ppm ด้วยอัตราการไหล 8 มิลลิลิตร/นาที แล้วทำการวัดโลหะตะกั่วในน้ำหลังผ่านคอลัมน์

จากผลการทดลองพบว่า เปลือกไม้ที่ไม่ได้ปรับสภาพจะมีสีออกมามากกว่าเปลือกไม้ที่ปรับสภาพถึง 23-68 เท่า ตามแต่นชนิดของไม้ และจากการทดลองแบบทีละเทพบว่า พีเอชของน้ำเสียจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ความสามารถของการจับโลหะไอออนลดลง และความสามารถของการจับไอออนของโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของไม้แต่ละชนิด และสารประกอบที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า เปลือกไม้สามารถจับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีกว่าการทดลองแบบทีละเท โดยสามารถที่จะจับไอออนของตะกั่วได้ประมาณ 0.608 กรัมของตะกั่ว/กรัมเปลือกไม้

**9. Tan และคณะ (1988)** ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชากำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ใบชาที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นใบชาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปการเกษตร นำมาบดและคัดขนาด 60-80 เมช นำไปต้มในน้ำร้อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่ในกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการทดลองแบบ Batch Operation ใช้ปริมาณกากใบชาตั้งแต่ 0-40 มิลลิลิตร/ลิตร กับน้ำเสียในความเข้มข้นต่าง ๆ และที่ระดับพีเอชต่าง ๆ กัน เขย่านาน 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรอง แล้วนำไปวิเคราะห์หาสารตะกั่ว แคดเมียม และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังกะสีที่เหลือน้อยในน้ำ ส่วนการวิจัยแบบคอลัมน์ บรรจุกากใบชา 1.87 กรัม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียต่าง ๆ กันและที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่าง ๆ กัน

จากผลการทดลองแบบ Batch Operation พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากใบชาจะสามารถกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีได้มากขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 6 และความสามารถในการดูดซับตะกั่วแคดเมียม และสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.38, 0.28 และ 0.18 มิลลิโมล/กรัมของใบชาตามลำดับ และผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า โลหะหนักทั้ง 3 เมื่อมีความเข้มข้นในน้ำเสียเป็น 100 มก./ลิตร ในปริมาณน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรจะถูกกำจัดได้เกือบ 100% เมื่อใช้ใบชา 1.87 กรัมที่ระดับพีเอชเท่ากับ 6 และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดจะลดลง

10. Okieimen และ Onyenikpa (1989) ได้ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกเมล็ดแตงโมกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย การวิจัยเลือกใช้แบบคอลัมน์ ใช้ทดสอบการกำจัดตะกั่วด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ซม. ยาว 35 ซม. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 1 มิลลิลิตร/นาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร และแปรผันปริมาตรของน้ำเสียที่ใช้ 50, 100, 400, 800 และ 1000 มิลลิลิตร

ผลการทดลองพบว่า เปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่าเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี และสามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 62-95%

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารดูดซับ

ผักตบชวา

โสน

บอน

##### 3.1.2 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานนิกเกิล ( Standard nickel ) เข้มข้น 1000 ppm (Lab reagent , Carb Erba)
2. สารละลายนิกเกิลความเข้มข้น 1 ppm
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( Sodium hydroxide , NaOH ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล (Analytical grade , Fisher Chemicals)
4. กรดซัลฟูริก ( Sulfuric acid ,  $H_2SO_4$  ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล (Analytical grade , Merck)
5. กรดไนตริก ( Nitric acid ,  $HNO_3$  ) เข้มข้น 10% (Analytical grade , Merck)

##### 3.1.3 อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AA-680 ยี่ห้อ Shimadzu
2. Scanning Electron Microscope รุ่น Leo 1455VP ยี่ห้อ Leo
3. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง ( pH meter ) รุ่น 251 Denver Instrument Company
4. ตู้อบ ( Oven ) รุ่น DIN 40050-IP20 ยี่ห้อ Schutzart
5. เครื่องเขย่า ( Shaker ) รุ่น Hetofrig CB60 VS ยี่ห้อ Heto
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ( Analytical Balance ) TC-254 Denver Instrument Company
7. เครื่องบดตัวอย่าง
8. ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 0.3 มิลลิเมตร
9. ถาดสแตนเลส
10. ลูกยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ถุงมือ
12. กระจกบรอน้ำกลั่น
13. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
14. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
15. ชุดเครื่องกรอง Millipore
16. กรวยกรองบุชเนอร์
17. ขวดพลาสติก Polyethylene
18. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

**หมายเหตุ** อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผ่านการแช่  $\text{HNO}_3$  10% นาน 1 วัน ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

สารละลายนิกเกิลเข้มข้น 1 ppm เตรียมโดยเปิดสารละลายมาตรฐานนิกเกิล ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

#### 3.2.2 การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา โสน และบอน

นำก้านใบของผักตบชวาและบอน รวมทั้งลำต้น โสน มาล้างให้สะอาด

↓  
อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

↓  
บดพืชตัวอย่างด้วยเครื่องบด คัดขนาดให้ได้ 0.3 มิลลิเมตรด้วยตะแกรงคัดขนาด

↓  
อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

↓  
ทิ้งให้เย็นและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ศึกษาความสามารถของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับนิกเกิล

#### 3.2.3.1 ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

ใส่ผักตบชวา โสน และบอนอบแห้งลงในขวดพลาสติก Polyethylene ขนาด 1 กรัม



ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร



ปรับ pH สารละลายให้เป็น 6 ด้วย NaOH 0.1 N และ/หรือ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N นำไปเขย่า  
ที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน



กรองแยกพืชออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1, เบอร์ 42 และชุดกรอง millipore ตามลำดับ



วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่วันที่ 1, 2, 3, 4 และ 5  
ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer



ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่กับระยะเวลาการดูดซับ

### 3.2.3.2 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ใส่ผักตบชวา โสน และบอนอบแห้งลงในขวดพลาสติก Polyethylene ขนาด 1 กรัม



ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร



ปรับ pH ให้เป็น pH 4, 5, 6, 7, 8 ตามลำดับด้วย NaOH 0.1 N และ/หรือ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N  
นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ในช่วงเวลาที่ได้จากข้อ 3.2.3.1

กรองแยกพืชออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1, เบอร์ 42 และชุดกรอง millipore ตามลำดับ

วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลในแต่ละค่าของ pH

ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้ง

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่กับค่า pH

### 3.2.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างผักตบชวา บอน และ โสน

ชั่งผักตบชวา บอน และ โสน อบแห้งอย่างละ 1 กรัม ใส่ลงในขวด Polyethylene



ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร



ปรับ pH ให้ได้ค่าตามข้อ 3.2.3.2 ด้วย NaOH 0.1 N และ/หรือ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N



นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที ตามวันที่ได้จากข้อ 3.2.3.1



กรองแยกพืชออกจากด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1, เบอร์ 42 และชุดกรอง millipore ตามลำดับ



วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลที่เหลือด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer



ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



เขียนกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับของผักตบชวา บอน และ โสน

ณ มวลพืช 1 กรัม

### 3.2.3.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ชั่งผักตบชวาอบแห้งหนัก 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติก Polyethylene

↓  
ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

↓  
ปรับ pH ให้ได้ค่าตามข้อ 3.2.3.2 ด้วย NaOH 0.1 N และ/หรือ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N

↓  
นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที ตามวันที่ได้จากข้อ 3.2.3.1

↓  
กรองแยกพืชออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 , เบอร์ 42 และชุดกรอง millipore ตามลำดับ

↓  
วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลที่เหลือด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

↓  
ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

↓  
เขียนกราฟลอการิทึมระหว่างความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือในน้ำ (C)  
กับปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (XM)

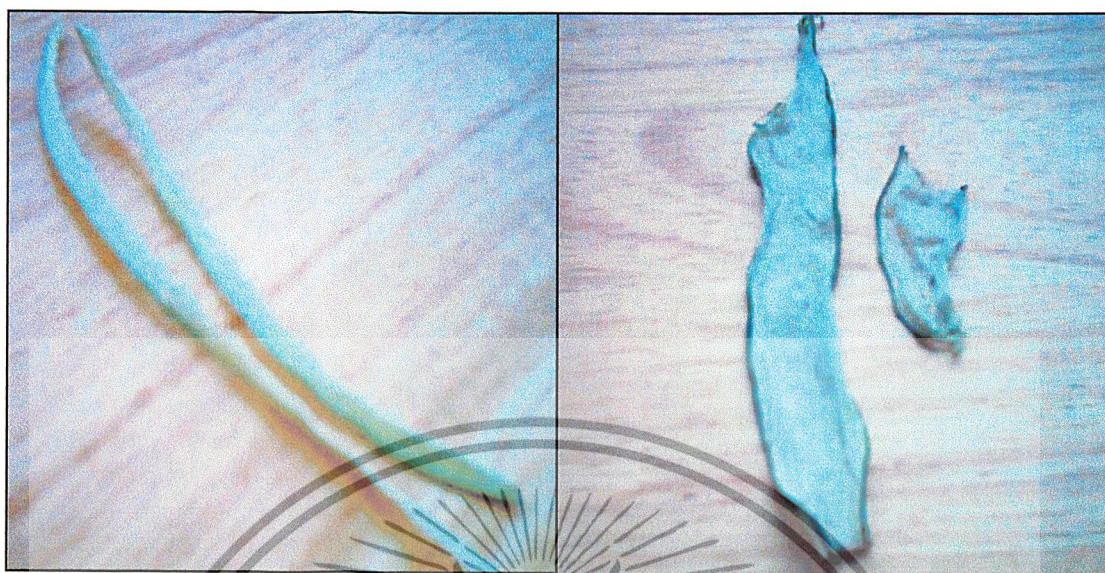
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การนำเสนอของโครงการพิเศษเรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยเครื่องกรองน้ำ โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน จะแบ่งการศึกษาเป็นส่วน ๆ โดยทำการศึกษาถึงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของพืชทั้ง 3 ชนิด เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำพืชมาใช้เพื่อดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ศึกษากลไกในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำที่มีการปนเปื้อน ศึกษาระยะเวลาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการบำบัด และนำประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีนิกเกิลปนเปื้อนจากพืชทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวา โสน และบอน มาเปรียบเทียบกันว่าพืชชนิดใดมีความเหมาะสมมากที่สุด การนำเสนอการทดลองจะอยู่ในรูปของภาพประกอบ และการอธิบายผล แยกเป็นการทดลองย่อย ๆ ตามลำดับ เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ

#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะของพืช

นำพืชทั้ง 3 คือ ผักตบชวา โสน และบอนมาล้างให้สะอาด นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างทั้งสามมาบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดให้ได้ 0.3 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาศึกษาสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของพืชทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวา บอน และ โสน ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.2-4.4 ตามลำดับ



(ก)

(ข)



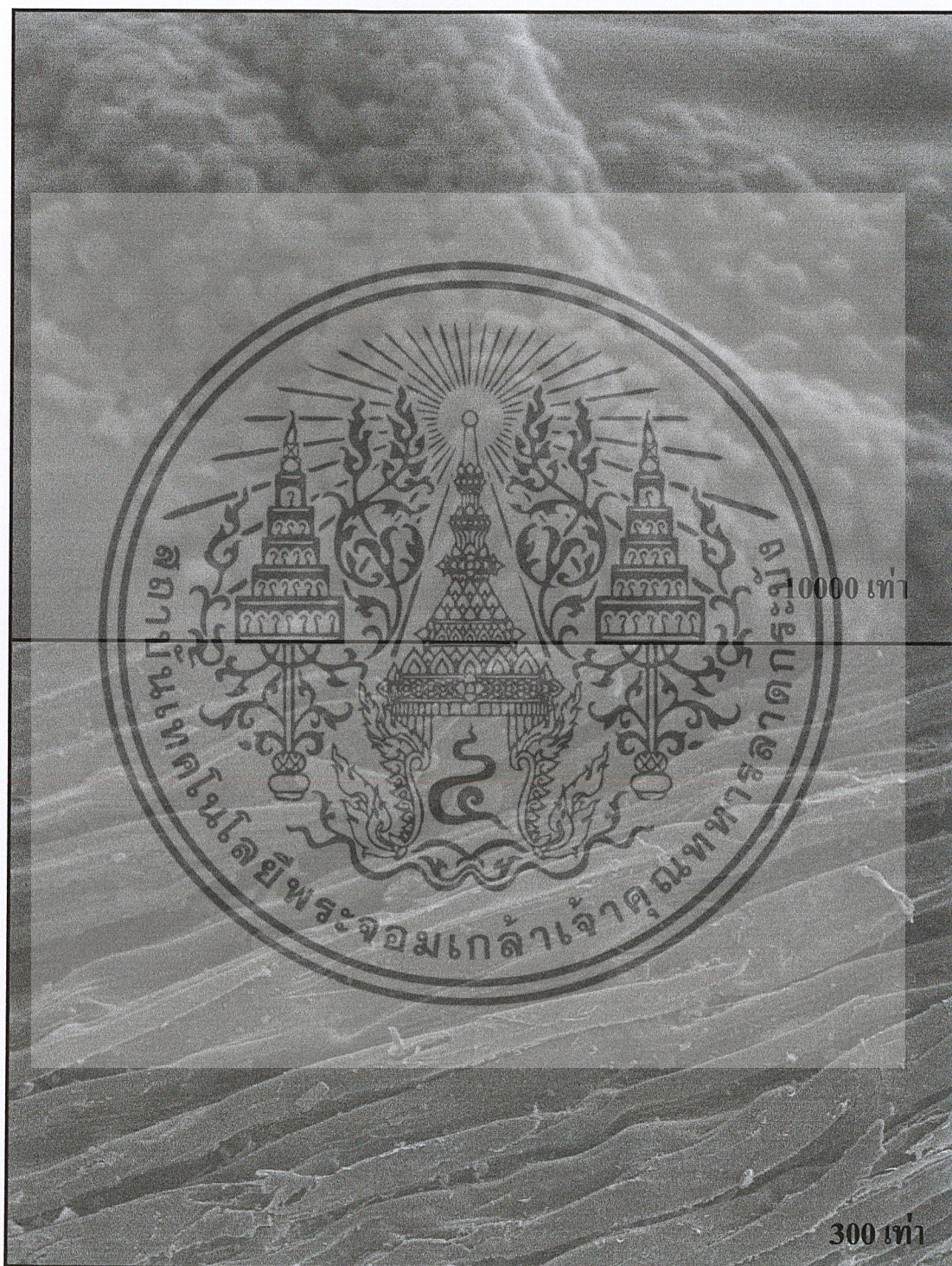
(ค)

**รูปที่ 4.1** (ก) แสดงลักษณะของพักตบชวาที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

(ข) แสดงลักษณะของบอนที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

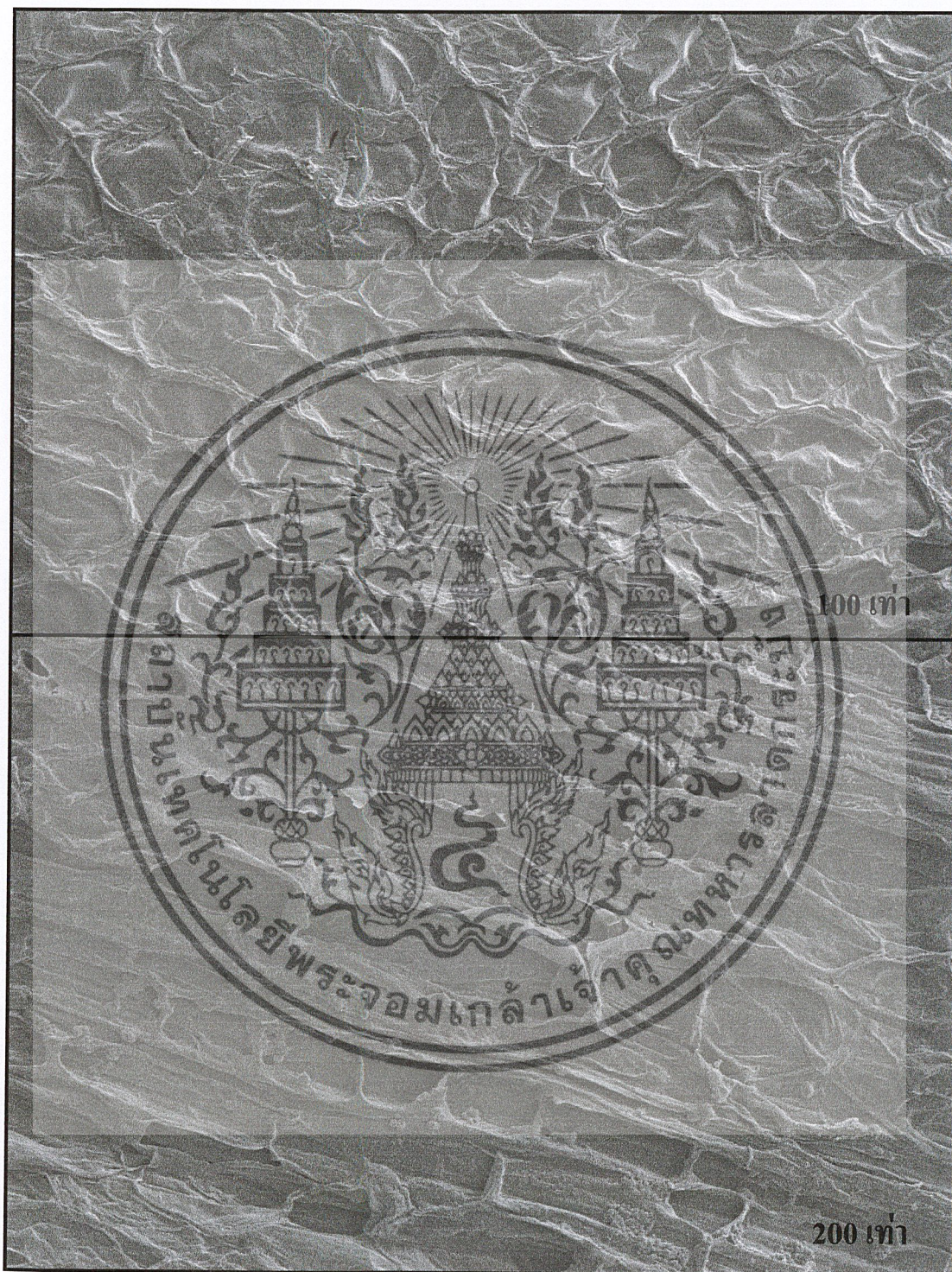
(ค) แสดงลักษณะของโสนที่อบแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



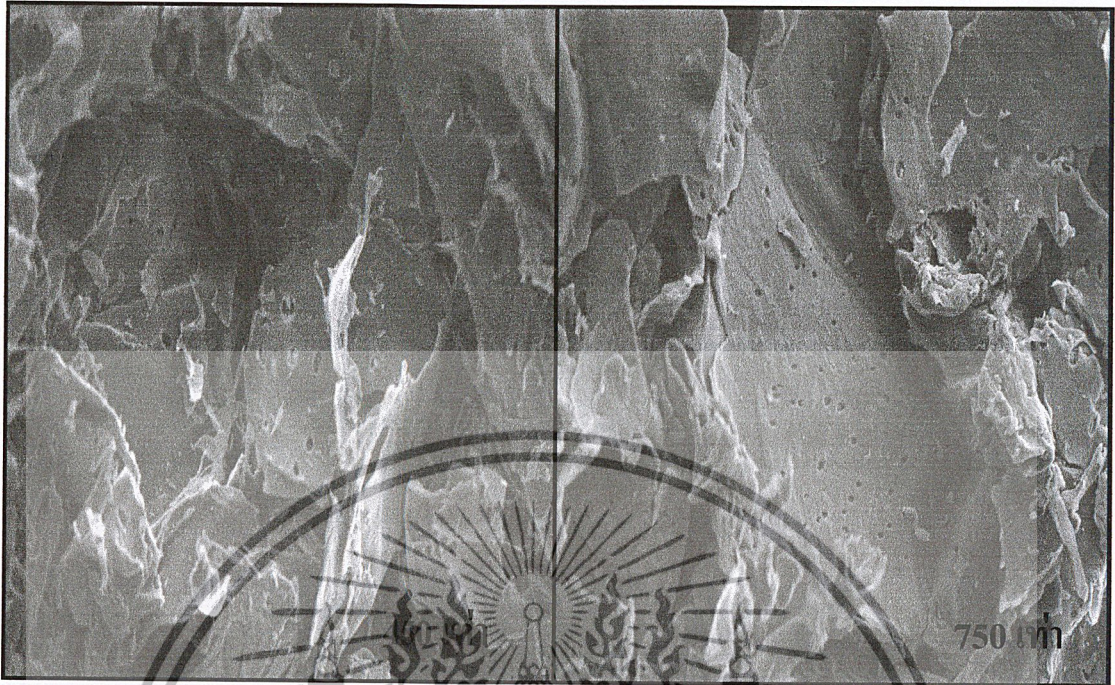
รูปที่ 4.2 แสดงสภาพความเป็นรูปพรุนและองค์ประกอบภายในของฝักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของบอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.4 (ก)** แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของเนื้อไม้โสน

**(ข)** แสดงสภาพความเป็นรูพรุนและองค์ประกอบภายในของแกนไม้โสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 จะเป็นลักษณะโครงสร้างภายในของผักตบชวาที่กำลังขยาย 300 เท่า พบว่า ที่บริเวณพื้นผิวจะขรุขระ เป็นร่องลึกลงไปตามแนวยาว และที่กำลังขยาย 10000 เท่า จะเห็นว่าภายในบริเวณร่องลึกที่พบนั้น พื้นผิวของแต่ละร่องยังมีลักษณะ โครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 4.3 จะเป็นลักษณะโครงสร้างภายในของบอน จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวภายในของบอนจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับผักตบชวา แต่จะใหญ่และตื้นมากกว่า ซึ่งจากการใช้กล้องที่กำลังขยาย 100 และ 200 เท่า ก็สามารถเห็นลักษณะของรูพรุนภายในของบอนได้อย่างชัดเจน

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า โสนมีอยู่ 2 ส่วนที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ ส่วนของเนื้อไม้ และ ส่วนของแกนใน โดยจากรูป ก จะเป็นส่วนของเนื้อไม้ โสน เห็นได้ว่าพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ มีรูพรุนรูเล็กอยู่ตามบริเวณเนื้อไม้ และจากรูป ข เป็นส่วนของแกนในของต้นโสน ซึ่งจากการใช้กล้องที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่า แกนในมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ มีรูพรุนมากและค่อนข้างลึกกว่าผักตบชวาและบอน ส่วนที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นว่า บริเวณพื้นผิวในแต่ละรูพรุนจะมีรูเล็กอีกด้วย ทั้งนี้จะเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับทำให้สามารถดูดซับได้มากยิ่งขึ้น

## 4.2 ผลการศึกษาความสามารถของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการดูดซับนิกเกิล

### 4.2.1 ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

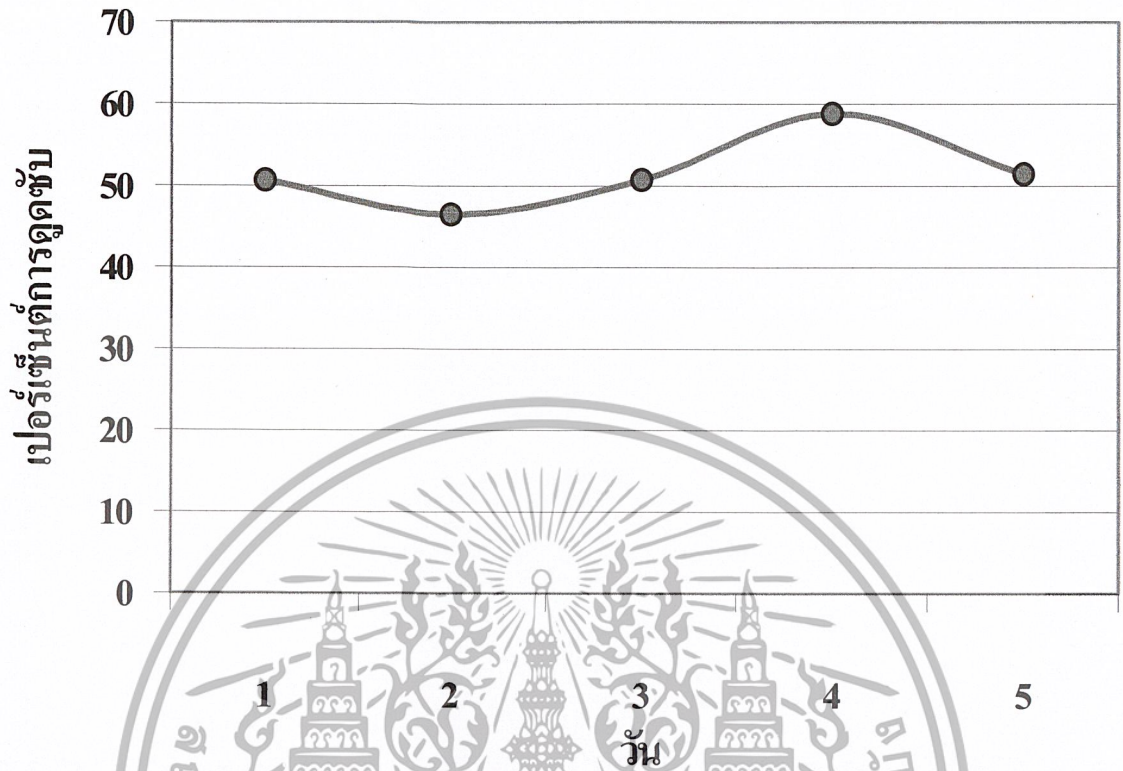
จากการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อพีช 1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่เวลาต่าง ๆ กัน แล้ววิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลกับระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมของผักตบชวา โสน และบอน ได้ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ (จากตารางภาคผนวก 1-จ ถึง 3-จ)



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมของผักตบชวา

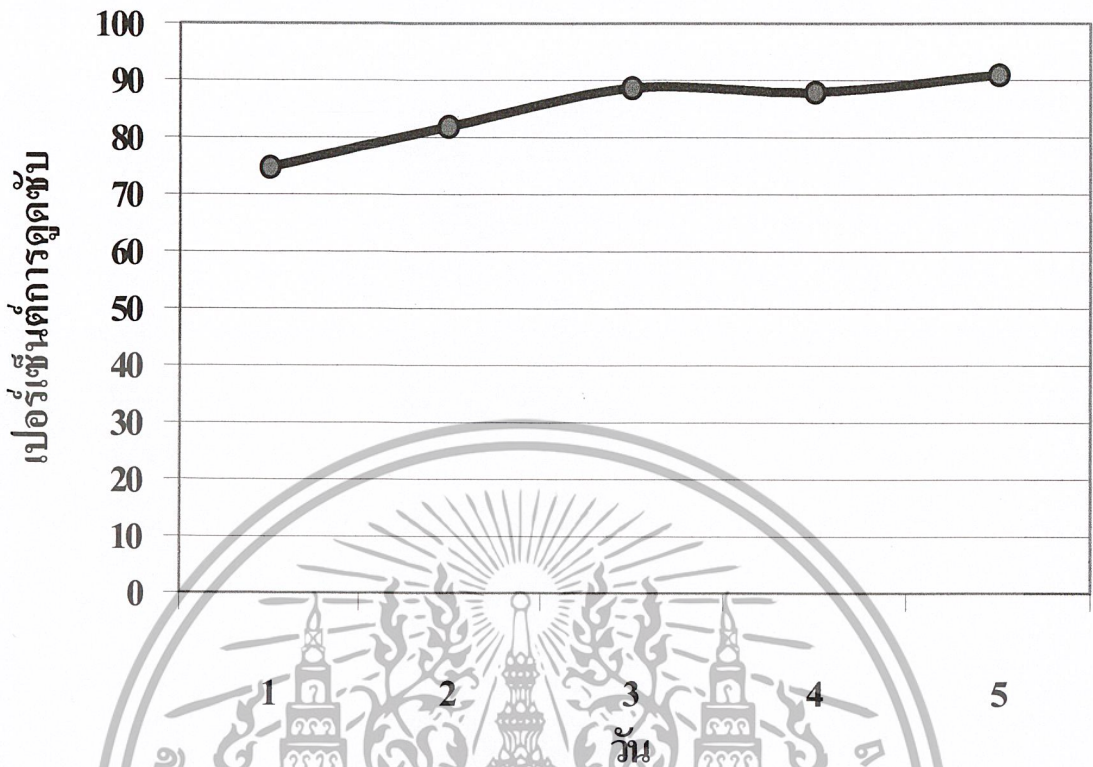
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า การดูดซับนิกเกิลจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2-4 วัน แต่ในวันที่ 5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับจะลดลงที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่ามีการปลดปล่อยนิกเกิลที่ดูดซับเข้าไปแล้วออกมา เนื่องจากมวลพีชของผักตบชวาเกิดการเน่า ทำให้โครงสร้างในการจับกับนิกเกิลถูกทำลาย ดังนั้นจึงทำการเลือกระยะเวลา การดูดซับที่ดีที่สุดคือวันที่ 4 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 87.04 เปอร์เซ็นต์ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.002 (จากตารางภาคผนวก 1-จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมของบอน

จากกราฟการดูดซับของบอนจะพบว่า การดูดซับที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่ 4 วันเช่นเดียวกับ ผักตบชวา สามารถดูดซับได้ 58.8% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.042 (จากตารางภาคผนวก 2-จ) และแนวโน้มในวันที่ 5 ก็จะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากการ desorption



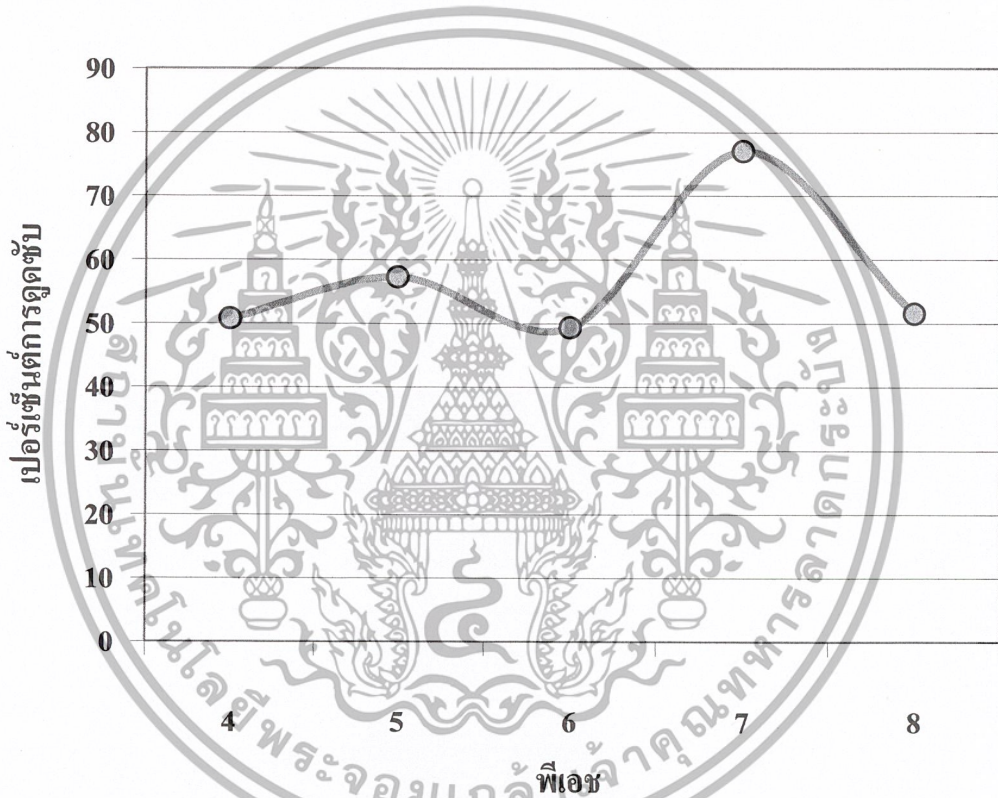
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมของโสน

จากกราฟจะได้วันที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับของโสน คือ 3 วัน เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 88.59% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.009 (จากตารางภาคผนวก 3-จ) ซึ่งในวันต่อ ๆ ไป นั้น การดูดซับค่อนข้างคงที่จึงเลือกจุดที่มีการดูดซับที่ดีที่สุดจุดแรก

จากกราฟการดูดซับของมวลพืชที่วันต่าง ๆ จะพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และเมื่อถึงจุดสูงสุดค่าการดูดซับที่ได้ก็จะลดลง เนื่องจากเกิดการ desorption ในกรณีของโสน เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ดีที่สุดสูงถึง 88.59% ในขณะที่ฝักตบขามี 87.04% และบอนสามารถดูดซับได้น้อยที่สุดเพียง 58.8%

#### 4.2.2 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

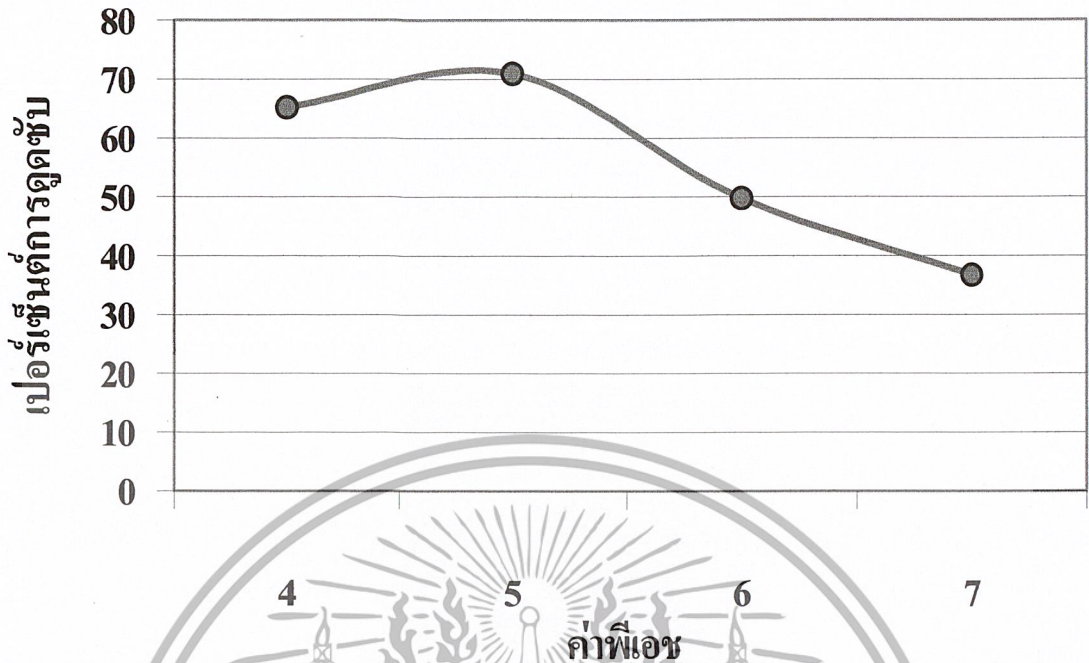
จากการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้สารละลาย นิกเกิลสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 ppm ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อพีช 1 กรัม ปรับค่าพีเอชให้ได้ค่า ต่าง ๆ กัน นำไปเขย่าตามเวลาที่เหมาะสม แล้ววิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ นำมาเขียน กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ ของผักตบชวา โสน และบอน ได้ดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH ที่เหมาะสมของผักตบชวา

จากกราฟของผักตบชวาจะพบว่า ค่า pH ที่มีการดูดซับสูงที่สุด คือ ที่ pH 7 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ การดูดซับ 77.04% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.014 (จากตารางภาคผนวก 4-จ) และใน ช่วง pH 8 การดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการเริ่มตกตะกอนของตัว นิกเกิลเอง

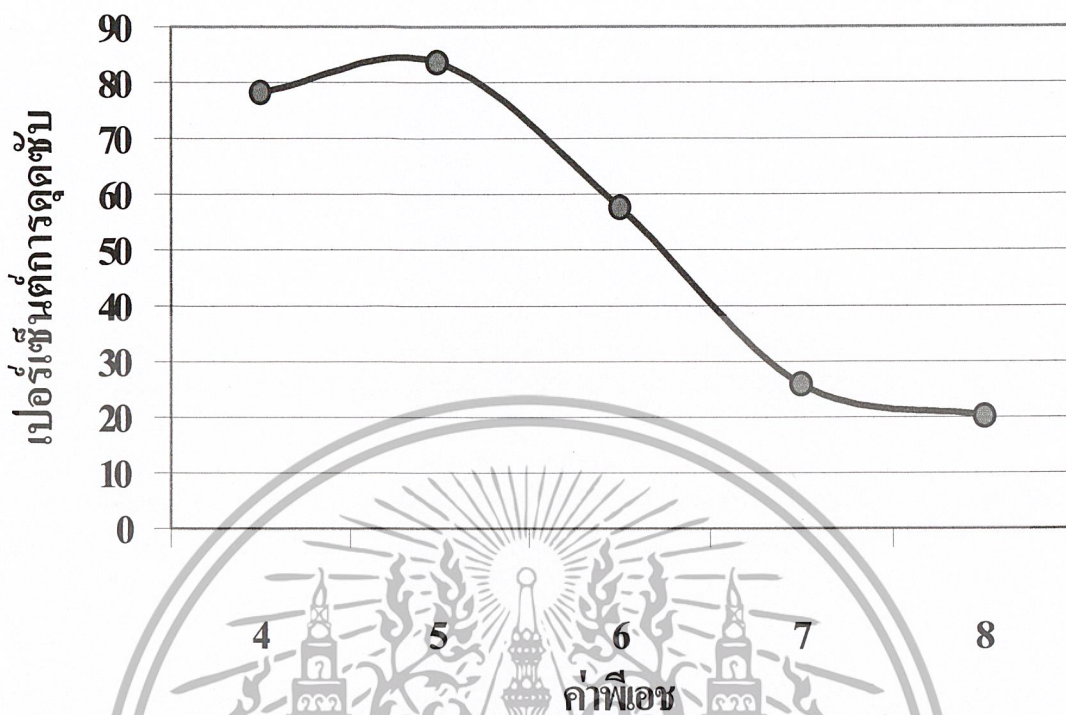
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การงอกกับค่า pH ที่เหมาะสมของบอน

จากกราฟการงอกของบอนจะพบว่า ที่ค่า pH ต่าง ๆ นั้น การงอกจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ค่า pH 5 สามารถงอกได้ 70.87% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.018 (จากตารางภาคผนวก 5-จ) จากนั้นการงอกจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงค่า pH 7 สำหรับการทดลองที่ pH 8 ผลที่ได้เกิดความผิดปกติขณะทำการทดลอง จึงไม่มีข้อมูล อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองเลือกที่ pH 5 เนื่องจากดูแนวโน้มมีเปอร์เซ็นต์การงอกลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH ที่เหมาะสมของโสน

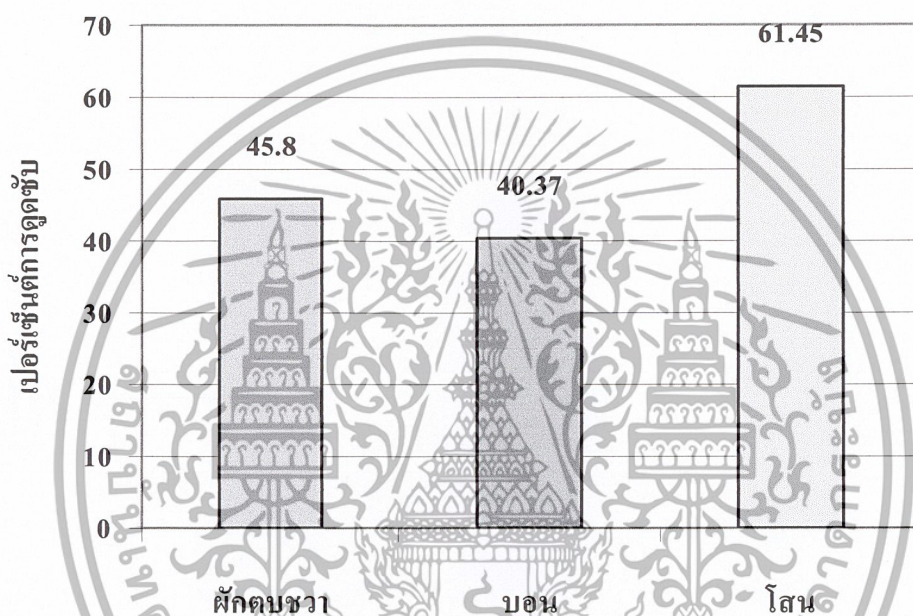
จากกราฟการดูดซับของโสนจะพบว่า ที่ค่า pH ต่าง ๆ นั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ค่า pH 5 สามารถดูดซับได้ 83.62% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คือ 0.074 (จากตารางภาคผนวก 6-จ) จากนั้นการดูดซับจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่า pH 8

จากกราฟของพืชทั้ง 3 ชนิดที่ระดับ pH ต่าง ๆ กันจะพบว่า มวลพืชแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่แตกต่างกัน จากแนวโน้มที่ศึกษาในช่วง pH ต่าง ๆ ของผักตบชวา โสน และบอน พบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีที่ pH 7 (แสดงในรูป 4.8) บอนและโสนจะมีแนวโน้มมีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกัน คือ pH 5 (แสดงในรูป 4.9-4.10) ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากความเป็นกรดจะทำลายโครงสร้างเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลิกนิน และเซลลูโลสบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างผักตบชวา โสน และบอน

จากการทดลองเพื่อกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ผักตบชวา บอน และโสนเป็นตัวดูดซับในปริมาณ 1 กรัม ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อพืชแต่ละชนิด เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของพืชทั้งสามชนิด สามารถนำมาเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.11

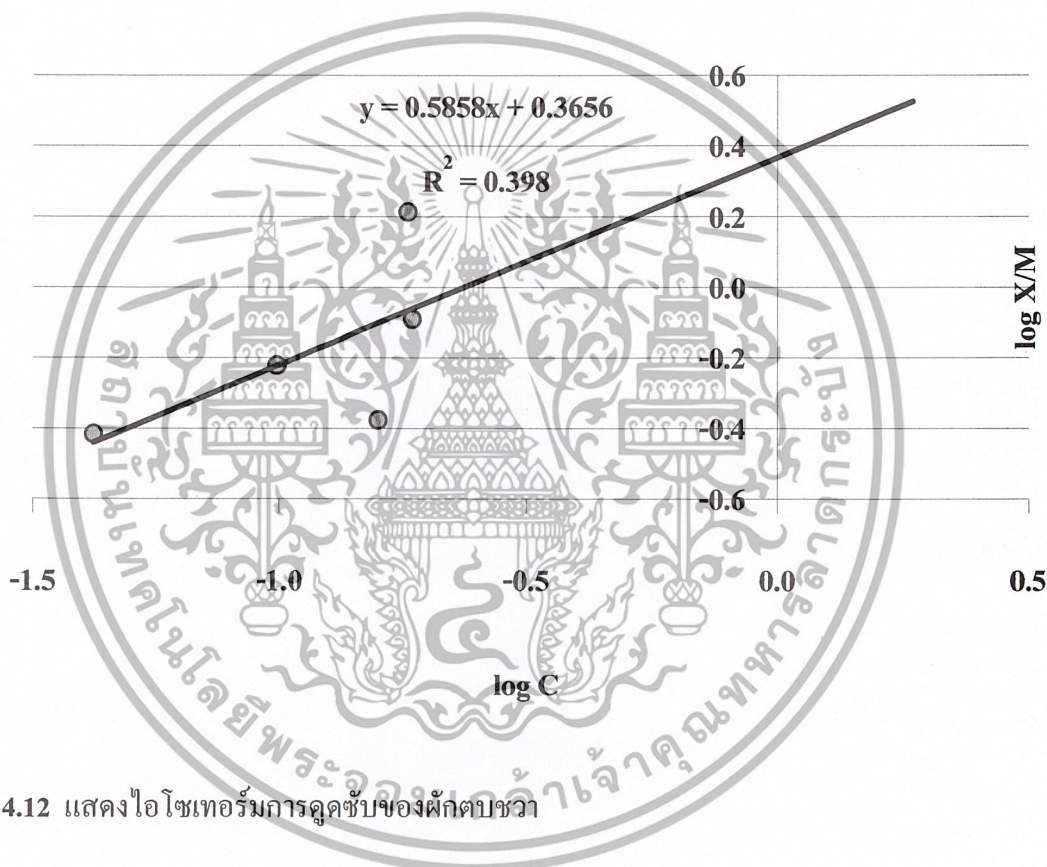


รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับนิกเกิลของพืช 3 ชนิด ณ มวลพืช 1 กรัม

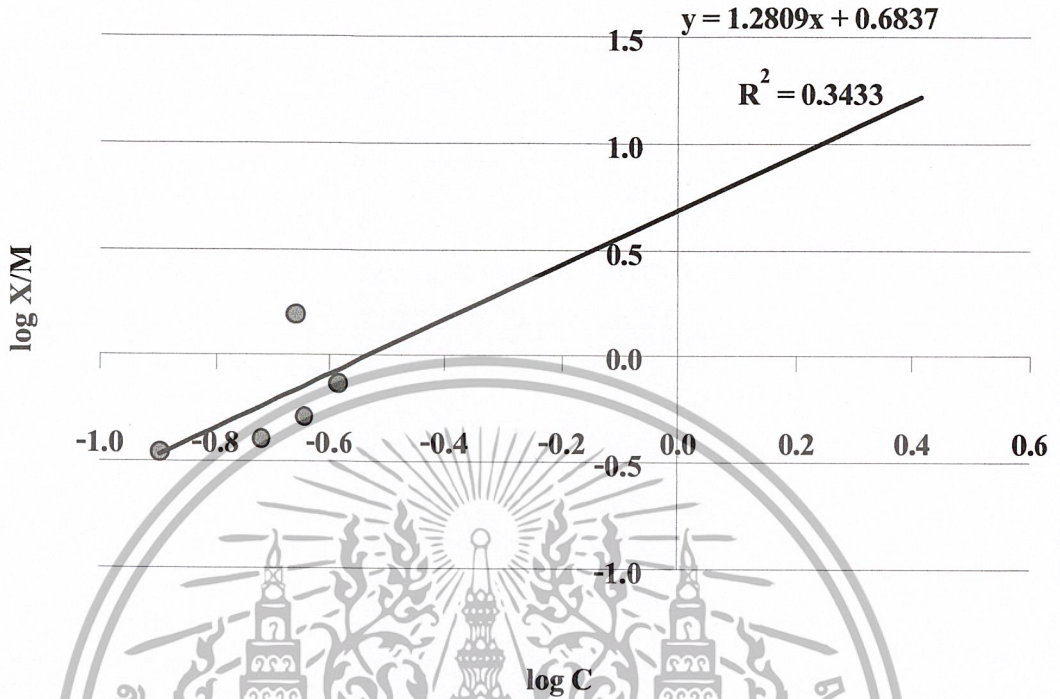
จากรูปจะพบว่า ณ ที่มวลพืช 1 กรัมเท่ากัน พืชทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวา บอน และโสน จะมีเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อใช้พืช 1 กรัมในการทดลองพบว่าโสนสามารถดูดซับนิกเกิลได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ผักตบชวา และบอน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 61.45% , 45.80% และ 40.37% ตามลำดับ ผลการทดลองเป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากโสนมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากกว่าผักตบชวาและบอน เปอร์เซ็นต์การดูดซับจึงสูงกว่าพืชอีก 2 ชนิด

#### 4.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

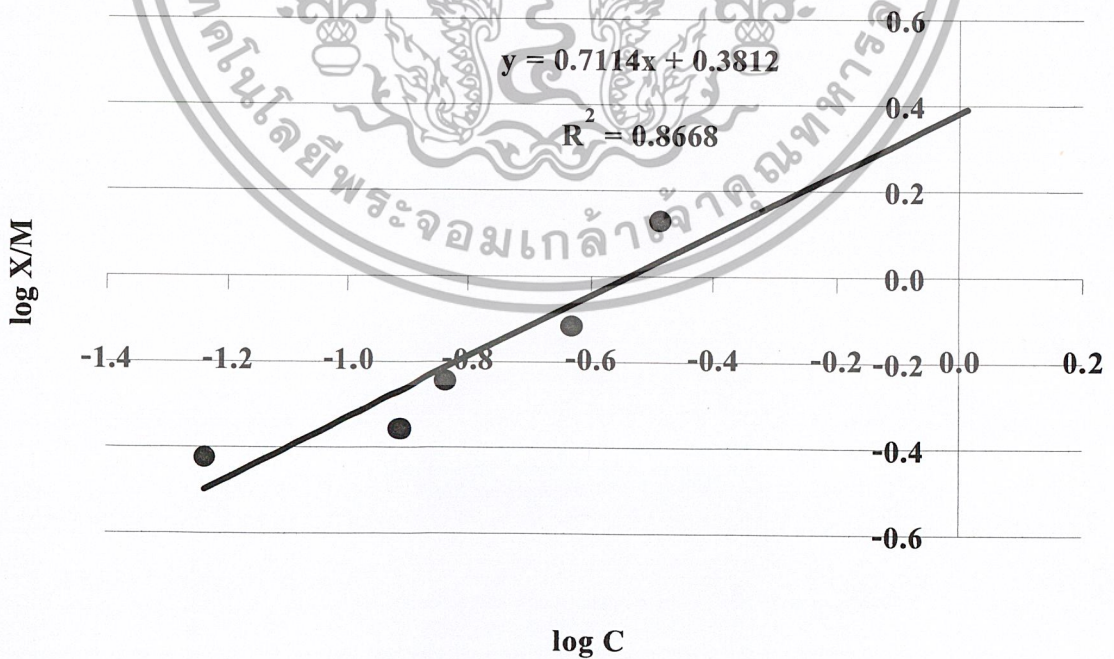
จากการทดลองเพื่อกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ผักตบชวา บอน และโสนเป็นตัวดูดซับในปริมาณต่าง ๆ กัน ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมของพีชแต่ละชนิด เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของพีชทั้งสามชนิด สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลกับไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการดูดซับของผักตบชวา โสน และบอนได้ดังรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของผักตบชวา

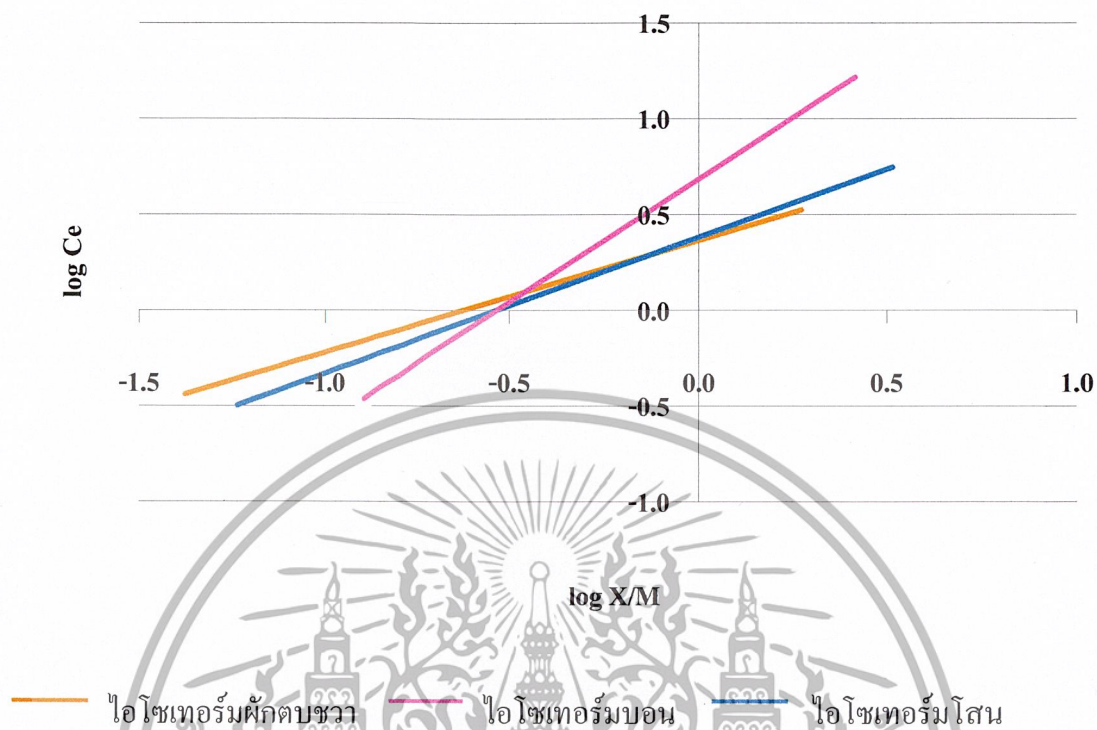


รูปที่ 4.13 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของบอน



รูปที่ 4.14 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของผักตบชวา บอน และโสน

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่า กราฟไอโซเทอร์มของโสนและผักตบชวาจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า การดูดซับของโสนดีที่สุด รองลงมาคือ ผักตบชวา และบอน ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12-4.14 สามารถคำนวณค่าคงที่  $1/n$  และ  $K$  ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่  $1/n$  และ  $K$  จากการคำนวณด้วยสมการการดูดซับแบบ Freundlich

|       | ผักตบชวา | บอน    | โสน    |
|-------|----------|--------|--------|
| $1/n$ | 0.5858   | 1.2809 | 0.7114 |
| $K_f$ | 2.3206   | 4.8273 | 2.4055 |

สมการ Freundlich

$$X/M = KC^{1/n}$$

หรือ

$$\log X/M = \log K + 1/n \log C$$

จากเส้นตรงในสเกล log-log สามารถอ่านค่า  $k$  และ  $1/n$  ได้

โดยที่

$$1/n = \text{ความชันของเส้นตรง}$$

$$K = X/M \text{ (mg/g) เมื่อ } C = 1 \text{ mg/l}$$

ความสามารถในการดูดซับเมื่อความเข้มข้นสารปนเปื้อน  
คือ 1 mg/l

เมื่อ

$$X = \text{ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)}$$

$$M = \text{ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 อธิบายความหมายของค่า  $K$  และ  $1/n$  (สิริชื่น, 2543)

| $1/n$ | $K$ | คำอธิบาย   |
|-------|-----|--|
| ต่ำ   | สูง | ความสามารถในการดูดซับสูงและความสามารถในการดูดซับจะเปลี่ยนความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในอัตราที่ไม่สูงมากนัก |
|       | ต่ำ | ความสามารถในการดูดซับต่ำในทุกช่วงความเข้มข้น   |
| สูง   | สูง | ความสามารถในการดูดซับสูงมากเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ |
|       | ต่ำ | ความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับต่ำเมื่อความเข้มข้นต่ำ               |

จากสมการ ไอโซเทอร์ม พบว่า สมการ Freundlich ของผักตบชวา คือ  $y = 0.5858x + 0.3656$  ที่  $R^2 = 0.398$  สมการของบอน คือ  $y = 1.2809x + 0.6837$  ที่  $R^2 = 0.3433$  สมการของโสน คือ  $y = 0.7114x + 0.3812$  ที่  $R^2 = 0.8668$  และมีค่าคงที่ที่คำนวณได้ของผักตบชวา บอน และ โสน คือ 2.321 , 4.827 และ 2.40 ตามลำดับ

ค่า  $1/n$  และค่า  $K_f$  ของพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ค่า  $1/n$  และค่า  $K_f$  ของบอนจะมีค่าสูงกว่าพืชชนิดอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับของบอนจะสามารถดูดซับได้สูงมากเมื่อตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง และจะสามารถดูดซับได้ลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ แต่ในการทดลองตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ความสามารถในการดูดซับของบอนลดลง ส่วนค่า  $1/n$  และค่า  $K_f$  ของผักตบชวา และ โสนพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก โดยพืชทั้งสองมีค่า  $1/n$  ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับบอน และมีค่า  $K_f$  สูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับของโสนและผักตบชวา จะเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มในอัตราที่ไม่สูงมากนัก จากการทดลองพบว่า ค่า  $1/n$  และค่า  $K_f$  ของโสนสูงกว่าผักตบชวา ทำให้ความสามารถในการดูดซับนิกเกิดดีกว่า

จากผลการทดลอง เส้นกราฟของไอโซเทอมอยู่ในช่วงเป็นลบ เนื่องจากใช้ตัวถูกดูดซับที่มีค่าความเข้มข้นน้อย ซึ่งหากเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับให้เพิ่มขึ้น จะทำให้เส้นกราฟของไอโซเทอร์มอยู่ในช่วงที่เป็นบวก และค่า  $R^2$  ของกราฟไอโซเทอร์มของผักตบชวาและบอนค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองในการหาไอโซเทอร์มได้ทำหลังจากมีการปิดใช้เครื่องเพื่อซ่อมหลังคาภาคเคมีทำให้เครื่อง AAS มีความไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าทั้งผักตบชวา บอน และโสน มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากโครงสร้างที่ต่างกัน ในด้านระยะเวลานั้น โสนสามารถดูดซับได้ในเวลาเพียง 3 วัน ส่วนบอน และผักตบชวาใช้เวลา 4 วัน แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ได้ไม่เท่ากัน โดยมีค่าการดูดซับของโสน 88.59 เปอร์เซ็นต์ ผักตบชวา 87.04 เปอร์เซ็นต์ และบอน 58.80 เปอร์เซ็นต์

ในการศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับของพืชแต่ละชนิดก็แตกต่างกันออกไป เนื่องจากโครงสร้างของมวลพืชนั้นมีความทนต่อพีเอชได้แตกต่างกัน ในบอนและโสนเมื่อเลขช่วงพีเอช 5 ไปแล้ว การดูดจะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจาก โครงสร้างถูกทำลายในสถานะที่ค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้น แต่ในผักตบชวาพีเอชที่มีการดูดซับได้ดีที่สุดอยู่ที่พีเอช 7 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากผักตบชวามีความทนต่อค่าพีเอชที่เพิ่มสูงขึ้น จากที่กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นว่าพีเอชนั้นมีผลต่อการดูดซับต่างกันขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของพืชชนิดนั้นๆ

ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของผักตบชวา บอน และโสน ที่มีมวลพืช 1 กรัมเท่า ๆ กัน พบว่า โสนสามารถดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือผักตบชวา และบอน โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 61.45% , 45.80% และ 40.37% ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจาก โครงสร้างความเป็นรูพรุนของพืชทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่างกัน

ส่วนการศึกษาไอโซเทอร์ม ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับของพืชแต่ละชนิดนั้นพบว่า ผักตบชวา ซึ่งมีค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.5858 ที่ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.398 และมีค่า  $K_f$  เท่ากับ 2.321 บอนพบว่ามีค่า  $1/n$  เท่ากับ 1.2809 ที่ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.3433 และมีค่า  $K_f$  เท่ากับ 4.827 โสนมีค่า  $1/n$  เท่ากับ 0.7114 ที่ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8668 และมีค่า  $K_f$  เท่ากับ 2.40 ซึ่งแสดงว่าขึ้น ความสามารถในการดูดซับของโสนและผักตบชวาจะเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มในอัตราที่ไม่สูงมากนัก ส่วนบอนจะสามารถดูดซับได้สูงมากเมื่อตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง และจะสามารถดูดซับได้ลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ

จากผลการทดลองของพืชทั้งสามชนิดดังที่กล่าวมาแล้วนี้จะเห็นว่าพืชบางตัวเมื่อปรับพีเอชแล้วทำให้สูญเสียความสามารถในการดูดซับลงตัวอย่าง ในกรณีของผักตบชวานั้น ในการที่จะทำการทดลองในขั้นต่อไปหรือการนำไปใช้จริงอาจไม่ต้องทำการปรับพีเอชก็ได้ และจากผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองทั้งหมดที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของโสนนั้นมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ผักตบชวา และบอนตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิเคราะห์หาไอโซเทอมควรทำการหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับคงที่

5.2.2 ควรมีการศึกษาอัตราเร็วในการปั่นกววนเพิ่มเติม

5.2.3 ควรมีการศึกษาถึงแนวทางในการกำจัดพืชทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวา บอน และโสน ที่ใช้ดูดซับนิกเกิลแล้ว เพื่อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

5.2.4 ควรทำการศึกษาถึงผลของการประยุกต์ใช้พืชทั้ง 3 ชนิดในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะชนิดอื่นเจือปน

5.2.5 ควรมีการศึกษานำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่

5.2.6 ควรทำการศึกษาการใช้มวลสดของบอนและโสนในการดูดซับโลหะหนัก

5.2.7 ควรมีการทำการศึกษากับน้ำเสียจริง

### บรรณานุกรม

- เกษสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและ  
ผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 10-39.
- ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล. 2539. การกำจัดตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้ขี้เถ้า. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ( สาธารณสุขศาสตร์ ) สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล. หน้า 1-76.
- ชีวรัตน์ ศิลรัตน์, ปริญญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และ ปวีณา จรัสโชติพิณี. 2544. การดูดซับ  
ตะกั่วโดยพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง.
- ชุตินา เสงฆ์ธรรม. 2543. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยถ่านลอยที่ผ่านการปรับ  
ปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นันทนา อิทธิพลโกวิท. 2538. การกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล  
และโครอสต์ลิงค์-แซนเทลที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า  
33-34.
- แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. ห้าง  
หุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนชม.
- วรพันธ์ แก้วอุดม. 2532. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำดินตะกอนและผักตบชวาในบึง  
มักกะสัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.  
หน้า 11-14.
- สิริขึ้น ตะนุสะ. 2543. การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากกระดองปูและ  
เปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
วิทยาเขตปัตตานี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สังข์ เวสารัชชระกุล. 2540. การลดปริมาณสารตะกั่วในน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล. หน้า 19-23.
- สำนักงานคณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน สถาบันการแพทย์แผนไทย กรมการแพทย์. 2540. ผักพื้นบ้าน: ความหมายและภูมิปัญญาของสามัญชนไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. พิมพ์ที่โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก หน้า 64,70,98,145,162,245.
- ADWA, AWWA and WPCF. 1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19<sup>th</sup> ed.,** .
- Berman , E. 1980 . **Toxic Metals and Their Analysis.** Heyden & Son Ltd . หน้า 170-175.
- Bhargava D.S, Cputa M.S. and Varshhney B.S. 1985. Use of Sawdust for the Adsorption of Heavy Metals. **Asian Environmental.** หน้า 29-37.
- Freitas, H. 2000. Removal of Toxic Metals from Solution by Leaf, Stem and Root Phytomass of *Quercus ilex* L. (holly oak). **Environmental Pollution.** 110 : 277-283.
- Krishnan S.S, Canalla A. and Jervis R.E. 1988. Wastewater Treatment for Heavy Metal Toxins Using Plant and Hairas Absorbents. **The Science of The Total Environment.** 68 : 267-273.
- Okieman F.E., and Onyenkpa V.U. 1989. Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions with Melon Seed Husks. **Biological Wastes.** 29 : 11-16.
- Randall J.M, Hautala E, Waiss AC. Jr, and Tschernitz J.L. 1976. Modified Batk as Scavengers for Heavy Metal Ion. **Forest Prod. J.** 26(8) : 46-50.
- Suzuki, M. 1990 . **Adsorption Engineering.** Tokyo :Elsevier , Inc.
- Tan WT, and Rhan RM. 1988. Removal of Lead, Cadmium, and Zin by Waste Tea Leaves. **Environmental Technology Letter.** 9 :1223-1232.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี

#### (Atomic Absorption Spectroscopy)

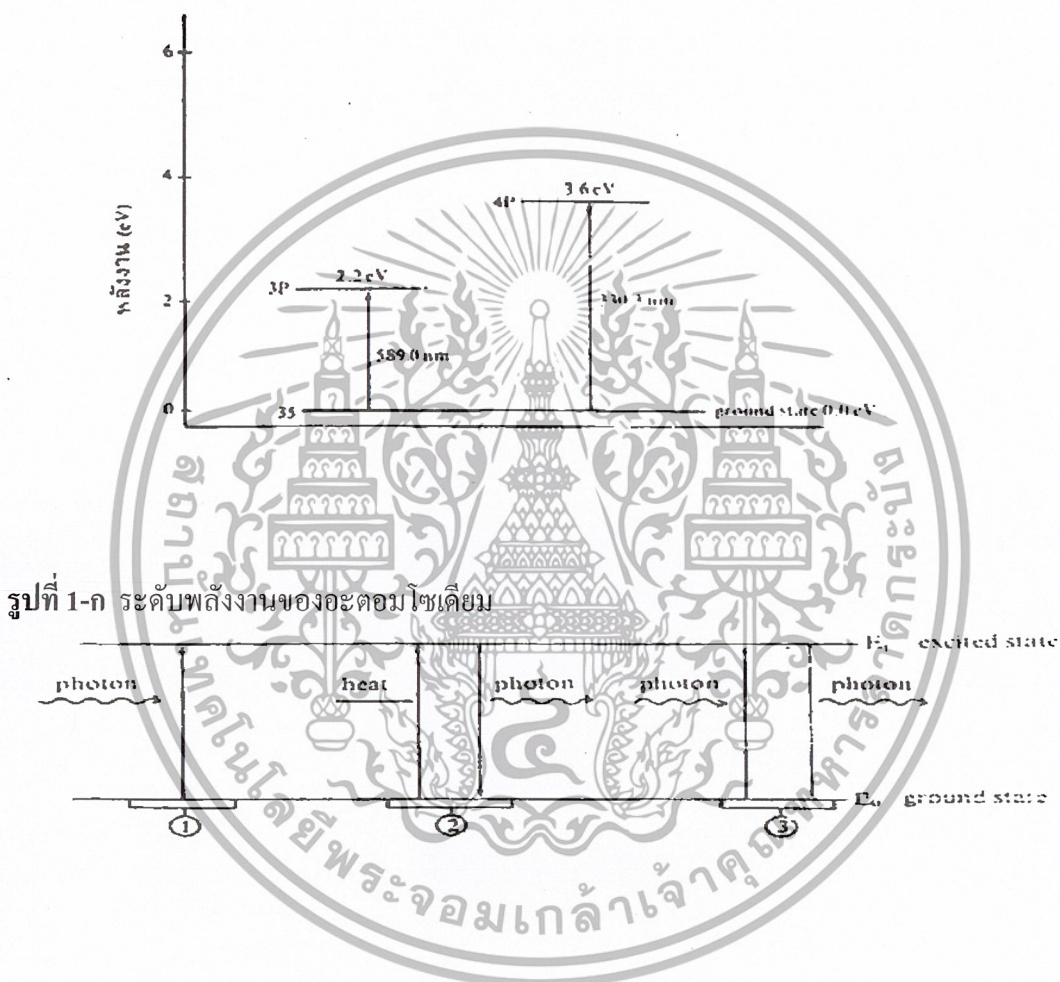
เทคนิคทาง อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี เป็น (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพความไวสูง และเป็นเทคนิคเฉพาะที่ตีความ ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ก็ไม่สูงนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ที่ทันสมัย โดยทั่วไปจะมีเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อยู่ด้วยเสมอ ความสามารถของเทคนิคนี้สูงมาก เพราะสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ซึ่งนับว่ามากพอสมควรสำหรับเครื่องมือเพียงอย่างเดียวทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ปี ค.ศ. 1953 Walsh ได้สร้างความสนใจและแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และข้อดีต่าง ๆ ของการใช้อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีเพื่อการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งในขณะนั้นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทางสเปกโตรสโกปี ได้แก่ เทคนิคคัลลอร์ิเมตรี (Colorimetry) และเทคนิคทางอะตอมมิกอิมิสชันสเปกโตรสโกปี (Atomic emission spectroscopy) และในปี ค.ศ. 1955 Walsh ได้พัฒนาเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้อย่างกว้างขวาง ช่วยทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น และได้เปรียบกว่าการใช้วิธีทางอะตอมมิกอิมิสชัน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้อย่างมาก (แม้น และ อมร, 2534)

#### 1. หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Principles of Atomic Absorption)

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน เช่นอะตอมของโซเดียมจะดูดกลืนได้ดีที่ความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร เพราะแสงที่มีความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะกระตุ้น ดังรูปที่ 1-ก ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นเหล่านี้จะเป็น Spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า เป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนเป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (atomization) หรืออาจทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้



1. อะตอมมิกแอบซอร์พชั่น
2. อะตอมมิกอิมิสชั่น
3. อะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดอะตอมมิกแอบซอร์พชัน อิมิสชัน และมิกฟลูออเรสเซนซ์ นั้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2-ก ซึ่งเป็นการเกิดทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก (first excited state) มีด้วยกัน 3 แบบ คือ

แบบที่ 1 เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก โดยการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนเป็นอะตอมมิกแอบซอร์พชัน

แบบที่ 2 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากความร้อน ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก แล้วปล่อยพลังงานออกมา เมื่อกลับสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมา เรียกว่า อะตอมมิกอิมิสชัน

แบบที่ 3 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากโฟตอนที่มาจากสเปกตรัมทำให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้น เมื่อกลับมาสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมา เรียกว่า อะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์

กระบวนการที่สารประกอบแตกตัวเป็นอะตอมแล้วกลายเป็นไอ หรือเกิดการกระตุ้น หรือแม้แต่เกิดแตกตัวเป็นไอออนด้วยพลังงานความร้อนเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของ Thermal equilibrium จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ( $N_j$ ) ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับจำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นต่อหน่วยปริมาตร ( $N_0$ ) ดังนั้น  $N_0$  ก็เกิดปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย Boltzmann ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ  $N_j$  กับ  $N_0$  ดังแสดงในสมการที่ 1-ก

$$N_j/N_0 = \frac{g_j/g_0}{e^{\Delta E/kT}} \quad (1-ก)$$

เมื่อ  $N_j$  และ  $N_0$  = จำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น  
 $g_j$  และ  $g_0$  = statistical weight ของสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น ซึ่งบอกถึงจำนวนสถานะของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเท่ากันของแต่ละระดับควอนตัม  
 $\Delta E = h\nu = E_j - E_0$  = ระดับพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น  
 $k$  = Boltzmann constant =  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/deg.  
 $T$  = อุณหภูมิในหน่วยของศาสมัวร์ (K)

ดังนั้น จะเห็นว่า  $N_j/N_0$  จะมีค่ามากเมื่อ  $T$  สูงขึ้น และ  $\Delta E$  น้อย

$N_j/N_0$  จะมีค่าน้อยเมื่อ  $T$  ต่ำ และ  $\Delta E$  มาก

ความสัมพันธ์ของ  $N_j/N_0$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 1-ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1-ก แสดงความสัมพันธ์ของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิ 2000 K และ 3000 K

| ธาตุ | Resonance line<br>(nm) | Gi/Gu | $\Delta E$<br>(ev) | Ni/No                  |                        |
|------|------------------------|-------|--------------------|------------------------|------------------------|
|      |                        |       |                    | 2000 K                 | 3000 K                 |
| Na   | 589.0                  | 2     | 2.10               | $9.86 \times 10^{-4}$  | $5.88 \times 10^{-4}$  |
| Ca   | 422.7                  | 3     | 2.93               | $1.21 \times 10^{-7}$  | $3.69 \times 10^{-5}$  |
| Cu   | 324.8                  | 2     | 3.82               | $4.82 \times 10^{-10}$ | $6.65 \times 10^{-7}$  |
| Mg   | 285.2                  | 3     | 4.35               | $3.35 \times 10^{-11}$ | $1.50 \times 10^{-7}$  |
| Zn   | 213.9                  | 3     | 5.80               | $7.45 \times 10^{-15}$ | $5.50 \times 10^{-10}$ |

จากตารางข้างบนนี้จะเห็นได้ว่า จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งเป็นแหล่งที่จะให้อิมีสชันออกมาในการศึกษาทางอิมีสชันสเปกโตรสโคปีนั้น มีน้อยกว่าจำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นมาก ๆ นี่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโคปีได้รับความนิยม และมีข้อได้เปรียบกว่าเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโคปีทั้งในเชิง sensitivity และ detection limit เพราะการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของธาตุที่มีมาก ๆ ย่อมจะง่ายกว่าการตรวจและวัดธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ นั่นคือ วัดปริมาณ  $N_0$  ย่อมง่ายกว่าวัด  $N_j$  นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าคุณค่า  $\Delta E$  ของธาตุต่าง ๆ ยังแตกต่างกันด้วย ซึ่งค่า  $\Delta E$  นี้บอกให้ทราบว่าธาตุบางธาตุถูกกระตุ้นง่าย Cu และ Zn อุณหภูมิที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญในการจะทำให้เกิดอะตอมเสรี แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของเปลวไฟ 3000 K จะเปลี่ยนอะตอมเสรีให้เป็นอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 2000 K

สำหรับค่า  $g_j$  และ  $g_0$  เป็น statistical weight ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับพลังงานที่กำหนดให้ และสามารถหาได้จากกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) ในสมการ 1-ก สามารถคำนวณหาค่าของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิใด ๆ ที่กำหนดให้ได้ เมื่อทราบความถี่หรือความยาวคลื่นที่ธาตุจะเกิดทรานซิชัน ดังแสดงในตารางที่ 1- ก

statistical weight หาได้จากสมการ 2-ก

$$g = 2J + 1 \quad \text{-----} \quad (2-ก)$$

- เมื่อ  $J =$  Ressel-Saunders coupling  
 $J = L + S$  หรือ  $L - S$   
 $L =$  total orbital angular momentum number  
 $= 0, 1, 2, 3$   
 $S =$  spin quantum number  $= \pm \frac{1}{2}$

โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูป  $N^M Lg$

- $N =$  principal quantum number  
 $M =$  multiplicity

เช่น การเกิดแตรอนชั้นของ Cs 852.1 nm เป็นการเกิดจาก

$$2_{P3/2} \longrightarrow 1_{S1/2} \quad \text{และ} \quad g_j/g_0 = [2^{(3/2)} + \frac{1}{2}^{(1/2)} + 1] = 4/2 = 2$$

อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ( $N_j$ ) เมื่อกลับมาอยู่ในสถานะพื้น ( $N_0$ ) จะให้โฟตอนออกมา โดยมีความเข้มของ emission lines ( $I_v$ ) หาได้จากสมการ 3-ก

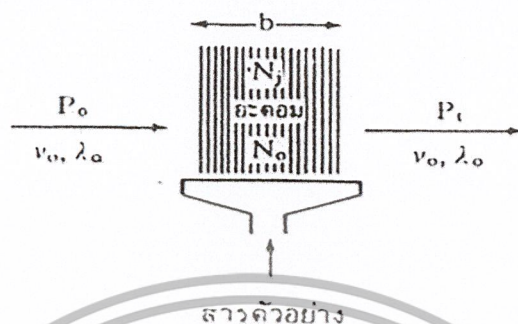
$$I_v = V \cdot A_{oj} \cdot h\nu N_0 (g_j/g_0) e^{-\Delta E/kT} \quad \text{-----} \quad (3-ก)$$

- เมื่อ  $V =$  ปริมาตรของเปลวไฟที่เห็น โดยดีเทคเตอร์  
 $A_{oj} =$  Einstein probability coefficient ในการเกิดแตรอนชั้นจาก  $E_j \rightarrow E_0$  ต่อหน่วยเวลาโดยมีการให้โฟตอนออกมา

จากสมการ 3-ก นี้ จะเห็นได้ว่าความเข้มของเส้นสเปกตรัมที่เปล่งออกมาเป็นฟังก์ชันกับ  $\Delta E$  และ  $T$  ในทำนองเดียวกันอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นก็จะเกิดแตรอนชั้นจาก  $E_0 \rightarrow E_j$  โดยดูดกลืนพลังงานที่ความถี่เท่ากับ resonance frequency และ hollow cathode lamp ที่ผ่านเข้าไปในเปลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟ ซึ่งมีอะตอมของธาตุที่ต้องการหาอยู่ (รูป 3-ก) ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นไปตาม absorption law ดังสมการ 4-ก



รูปที่ 4-ก การกลายเป็นอะตอมของสารตัวอย่าง

$$P_t = P_0 e^{-k} \quad (4-ก)$$

$P_0$  = radiant power เริ่มต้น

$P_t$  = radiant power ที่ผ่าน

$K$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนซึ่งขึ้นกับ  $\lambda$  หรือ  $\nu$

$B$  = ความกว้างของเปลวไฟ หรือ absorbing medium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

## 1. หลักการเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

การพัฒนากล้องจุลทรรศน์เพื่อให้เกิดการมองเห็น โครงสร้างไมโครด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนนั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ 1. ความสามารถในการแจกแจง (resolving power) 2. กำลังขยาย (magnification) 3. ความคมชัดและความชัดเจนของภาพ (focus and contrast) องค์ประกอบทั้ง 3 ประการที่กล่าวถึงนี้ ขึ้นกับ โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์ ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของสื่อกลางที่ช่วงให้เกิดการมองเห็น ระบบเลนส์ที่ทำให้เกิดกำลังขยาย และอุปกรณ์ประกอบที่ช่วยลดความผิดเพี้ยนของภาพรวมทั้งความคมชัด ไม่ว่าจะ เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบแสง หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนก็ตาม จะมีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายกัน ดังแสดงในภาพ โครงสร้างเปรียบเทียบรูปที่ 1-ข



รูปที่ 1-ข แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับแบบอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1-ข แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จัดระบบเลนส์แบบลำแสงและลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน จะเห็นว่ามืองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการมองเห็นภาพคล้ายคลึงกัน สามารถเทียบหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ แต่ในเรื่องของกลไกการทำงานแล้ว กล้องจุลทรรศน์ทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากแหล่งกำเนิดของสื่อกลางในการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้หลอดไฟฟ้า ซึ่งให้ลำแสงผ่านระบบเลนส์แก้วในคอลัมน์ที่มีอากาศได้ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและการปรับความคมชัดอาศัยระบบคนในการควบคุมทั้งหมด ส่วนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในคอลัมน์สุญญากาศ โดยจะถูกบังคับด้วยสนามไฟฟ้าศักดาสูง เร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง กำลังขยายของภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเกิดจากการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเลนส์ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของระบบเลนส์อิเล็กตรอน เป็นการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก การใส่ชิ้นตัวอย่างเพื่อศึกษาจะต้องใส่ในห้องสุญญากาศ รวมทั้งระบบการมองเห็นภาพต้องอาศัยตัวกลางในการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาในโครงสร้างโมเลกุลของชิ้นตัวอย่างให้ปรากฏเป็นภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ด้วยเหตุนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง ระบบควบคุมอิเล็กตรอนิกส์ ระบบเลนส์อิเล็กตรอน เป็นต้น จึงทำให้มีขนาดใหญ่กว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง และมีการใช้งานยุ่งยากซับซ้อนกว่า แต่นักวิทยาศาสตร์สาขาชีวภาพและกายภาพก็มีความจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพราะมีขีดความสามารถเหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสงหลายเท่าดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 1-ข นอกจากนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนยังได้รับการพัฒนาให้มีอุปกรณ์ประกอบเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ธาตุพร้อม ๆ กับการศึกษาโมเลกุลกราฟ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสงทำไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1-ข เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับแบบอิเล็กตรอน

|                                | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน<br>(EM)   | กล้องจุลทรรศน์แบบแสง<br>(OM)  |
|--------------------------------|--|---|
| แหล่งกำเนิดลำแสง               | ลำอิเล็กตรอน   | ลำแสงสว่าง  |
| ความยาวคลื่น                   | 0.0859 °A ( 20 kV )<br>-0.0251 °A ( 200 kV )                                       | 7,500 °A ( Visible )<br>-2,000 °A ( Ultraviolet )                                       |
| ตัวกลาง                        | สุญญากาศ   | บรรยากาศปกติ  |
| เลนส์                          | เลนส์อิเล็กตรอน  | เลนส์แก้ว   |
| มุมอพอเจอร์                    | ~ 35°  | ~ 70 °A   |
| ความสามารถในการแจกแจงกำลังขยาย | point to point : 3.5 °A<br>Lattice : 1.4 °A<br>100X ~ 450,000X<br>ปรับได้ต่อเนื่อง | Visible : 2,000 °A<br>Ultraviolet : 1,000 °A<br>10X ~ 2,000X<br>( เปลี่ยนเลนส์ทีละชุด ) |
| โฟกัสคอนทราสต์                 | ปรับระบบไฟฟ้า<br>การกระเจิง , การเลี้ยวเบน<br>และเฟสของคลื่นอิเล็กตรอน             | ปรับระบบกล<br>การดูคลื่นแสง<br>และการสะท้อนแสง  |

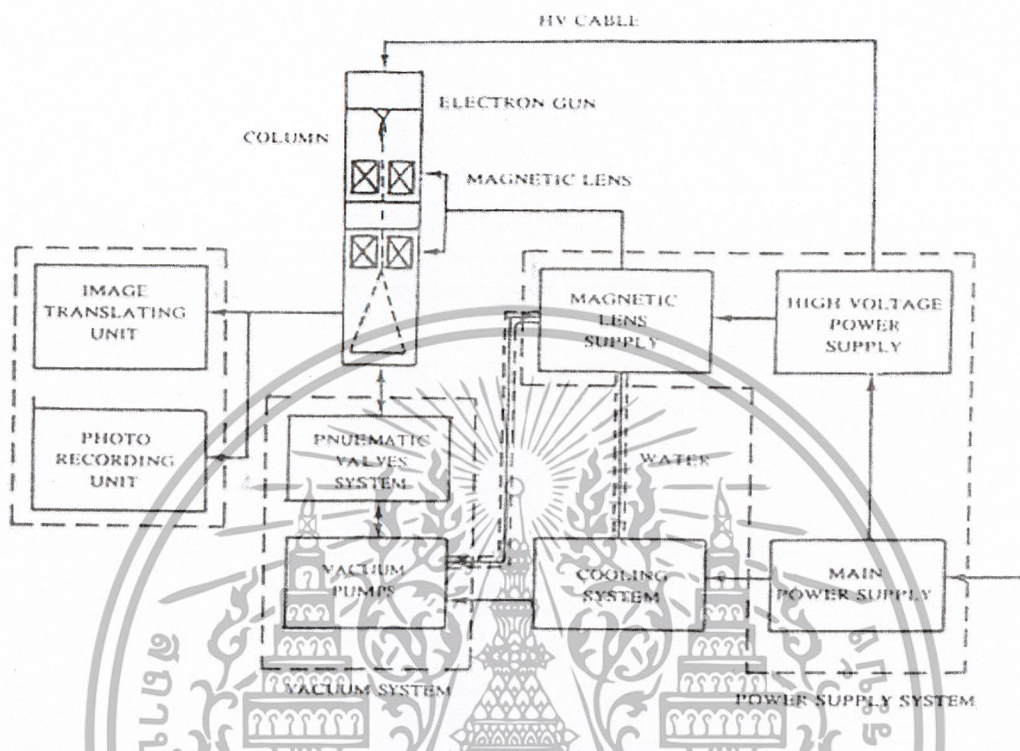
## 2. โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้ง 2 แบบจะมีโครงสร้างภายนอกคล้ายกัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ระบบอิเล็กตรอนออปติก (electron optics system)
2. ระบบสุญญากาศ (vacuum system)
4. ระบบระบายความร้อน (cooling system)
5. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply system)
6. ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ (image translating and photo recording)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

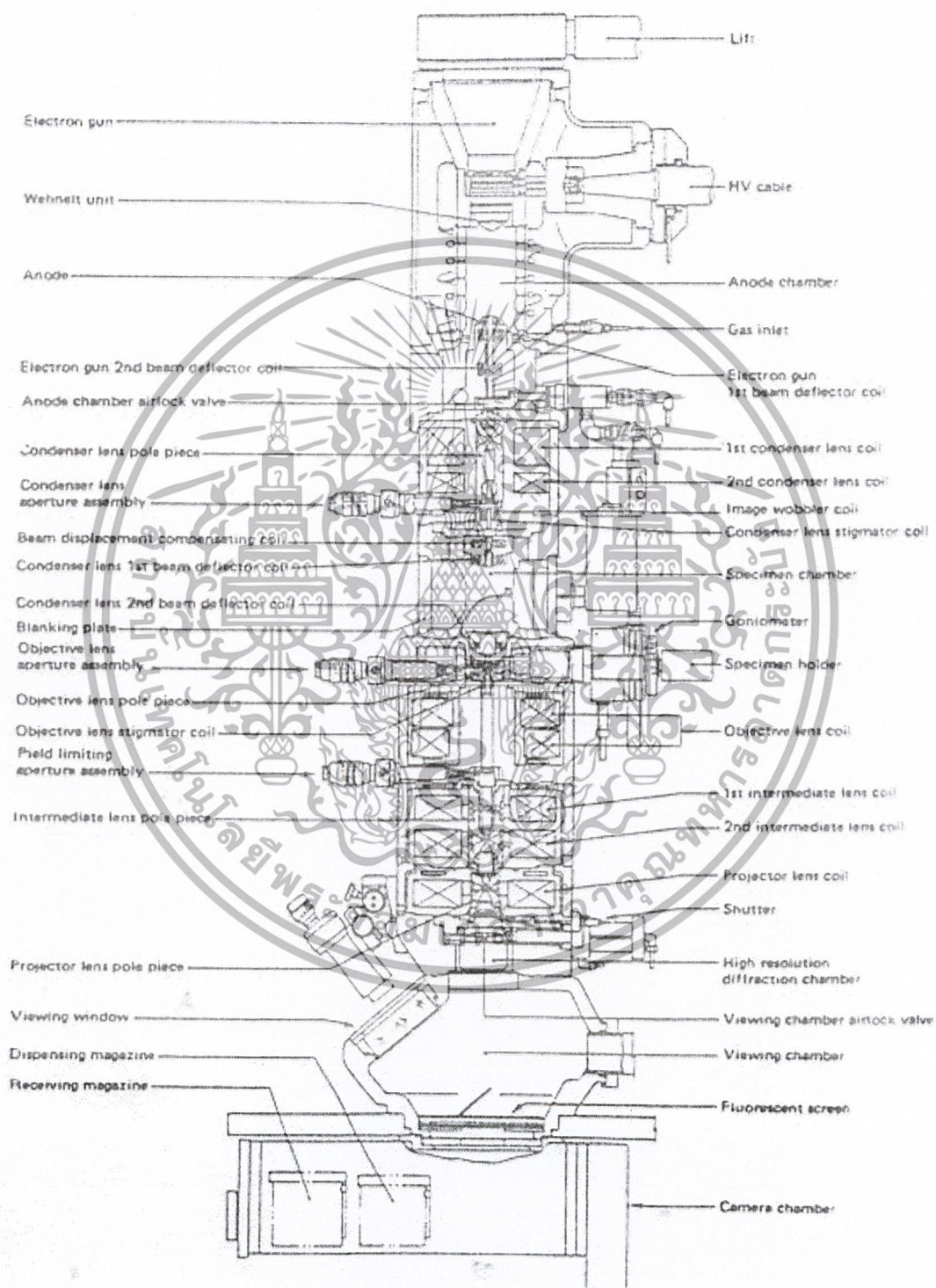


รูปที่ 2-ข แผนภาพเบื้องต้นของระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รูปที่ 2-ข แสดงแผนภาพเบื้องต้นของระบบต่าง ๆ ภายนอกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งทำงานเชื่อมโยงกันตามลำดับขั้นที่ถูกออกแบบไว้ กล่าวคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะทำงานได้นั้น ระบบสุญญากาศจะต้องสร้างสภาพสุญญากาศภายในคอลัมน์นิวอิงบรรจกระบบอิเล็กตรอนออปติกก่อน จากนั้นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลนส์แม่เหล็กจึงจะทำงานได้ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงจะทำหน้าที่สร้างสนามเร่งให้กับระบบอิเล็กตรอนออปติก เพื่อสร้างลำอิเล็กตรอนความเร็วสูง และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบอิเล็กตรอนเพื่อสร้างกำลังขยายภาพขึ้นในระบบอิเล็กตรอนออปติกทั้งระบบสุญญากาศและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอิเล็กตรอนจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกิดความร้อนสูง ได้แก่ เครื่องสูบลมแบบดีฟิวชัน ทรานซิสเตอร์กำลังสำหรับขับกระแสในขดลวดแม่เหล็ก เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิของการทำงานให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษาโครงสร้างจะต้องใส่ในห้องสุญญากาศภายในคอลัมน์ที่จัดไว้ตามสภาพโครงสร้างของระบบเลนส์ ภาพสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ออกพิกต้ออค์ระบบการสร้างภาพเพื่อให้สามารถมองเห็นภาพขยายนั้นด้วยตาเปล่า และสามารถบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มได้



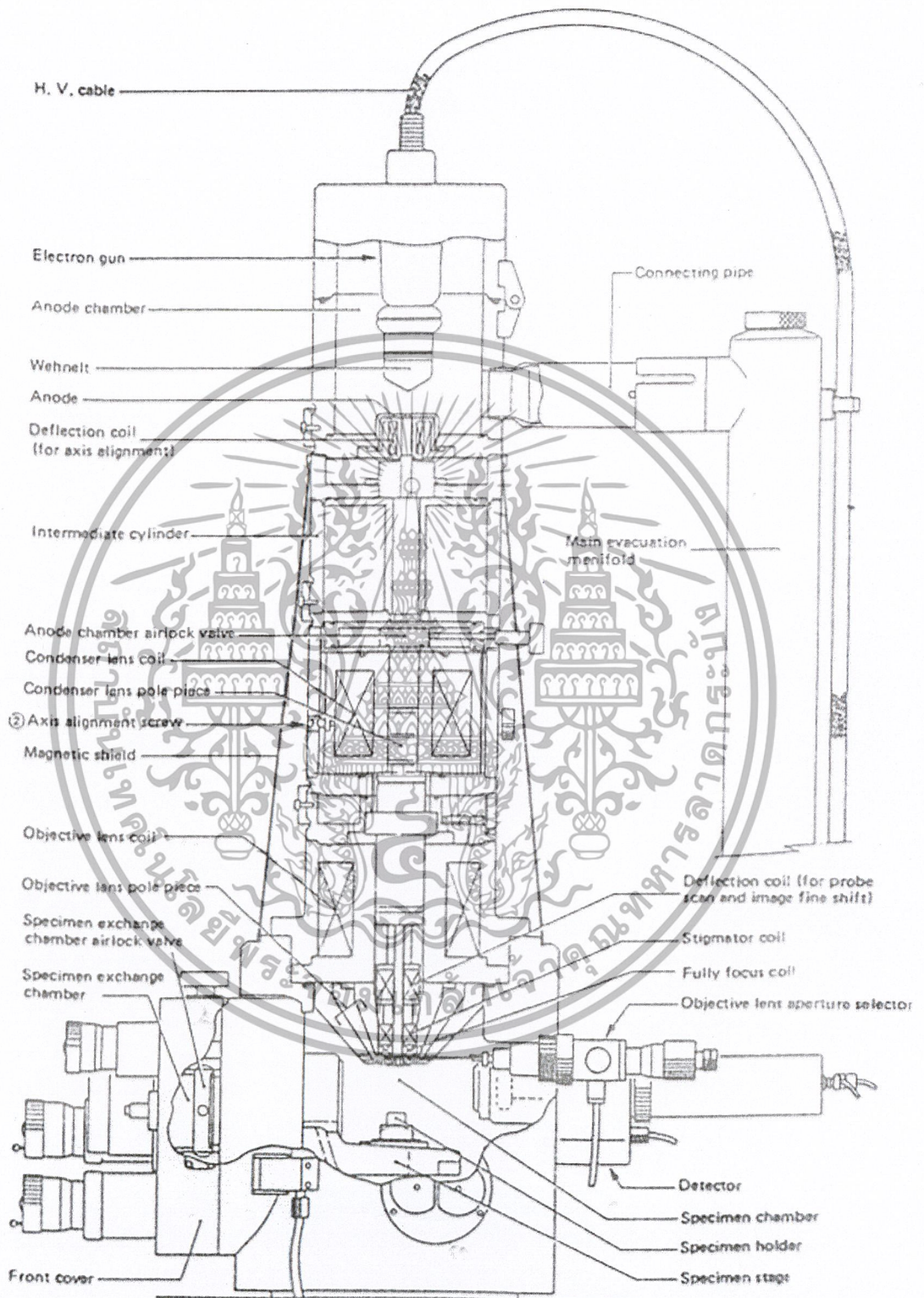
รูปที่ 3-ข ภาพตัดขวางของคอลัมน์กล้องจุลทรรศน์แบบ TEM รุ่น 200CX ของบริษัท JEOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าโครงสร้างภายนอกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนส่งผ่านและแบบลำอิเล็กตรอนแบบสแกนจะเหมือนกันก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาด้านการจัดระบบเลนส์อิเล็กตรอนแล้ว โครงสร้างอิเล็กตรอนออปติกภายในคอลัมน์สูญญากาศจะแตกต่างกันมากทีเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3-ข ของ TEM และรูปที่ 4-ข ของ SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ TEM นั้น ชิ้นส่วนตัวอย่างจะอยู่ที่เลนส์คอนเดนเซอร์ กำลังขยายของภาพจะเกิดโดยระบบเลนส์ออฟเฟกตีฟ เลนส์อินเตอร์มีเดียท์ และฉายภาพขยายลงบนฉากเรืองแสงด้วยเลนส์โปรเจกเตอร์ การบันทึกภาพสามารถบันทึกโดยตรงบนแผ่นฟิล์มซึ่งบรรจุไว้ได้แผ่นเรืองแสง ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ SEM นั้น ชิ้นส่วนตัวอย่างจะอยู่ที่เลนส์ออฟเฟกตีฟ และถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามบริเวณที่ต้องการศึกษา โครงสร้างด้วยระบบสแกน และสร้างสัญญาณภาพขยายอิเล็กตรอนบนจอภาพ การบันทึกภาพจะบันทึกจากจอภาพแคโทดเรย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-ข ภาพตัดขวางของคอลัมน์กล้องจุลทรรศน์แบบ SEM รุ่น 35CF ของบริษัท JEOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตาราง 1ค. แสดงค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ชีวรัตน์, 2544)

| ตัวแปร                                 | ค่ามาตรฐาน   |
|--|--|
| ความเป็นกรดและด่าง (pH)                | 5.5 – 9.0  |
| ทีดีเอส ( Total Dissolve Solid )       | ไม่เกิน 3000 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ต้องไม่เกิน 5000 mg/L น้ำทิ้งที่ระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็มเกิน 2000 mg/L หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือทะเลได้อีกไม่เกิน 5000 mg/L |
| สารแขวนลอย ( Suspended Solids )        | ไม่เกิน 50 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ต้องไม่เกิน 150 mg/L  |
| อุณหภูมิ ( Temperature )               | ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส  |
| สีและกลิ่น ( Color and Odor )          | เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะแล้วไม่เป็นที่พึงรังเกียจ  |
| ซัลไฟด์ ( Sulfide )                    | ไม่เกิน 1 mg/L   |
| น้ำมันและไขมัน ( Fat, Oil and Grease ) | ไม่เกิน 5 mg/L อาจแตกต่างกันแล้วแต่แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ต้องไม่เกิน 15 mg/L  |
| ฟอรั้มัลดีไฮด์ ( Formaldehyde )        | ไม่เกิน 1 mg/L   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1ค. แสดงค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน  
อุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ( ต่อ )

| ตัวแปร  | ค่ามาตรฐาน  |
|---|---|
| สารประกอบฟีนอล ( Phenols )                                  | ไม่เกิน 1 mg/L  |
| คลอรีนอิสระ ( Free Chlorine )                               | ไม่เกิน 1 mg/L  |
| สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์<br>( Pesticide ) | ต้องตรวจไม่พบตามวิธีที่กำหนด  |
| บีโอดี ( Biochemical Oxygen Demand ; BOD )                  | ไม่เกิน 20 mg/L หรืออาจแตกต่างกัน<br>แต่แหล่งรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรง<br>งานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการ<br>ควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ต้องไม่<br>เกิน 60 mg/L         |
| ทีเคเอ็น ( Total Kjeldahl Nitrogen ; TKN )                  | ไม่เกิน 100 mg/L หรืออาจแตกต่างกัน<br>แต่แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของ<br>โรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะ<br>กรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร<br>แต่ต้องไม่เกิน 200 mg/L     |
| ซีโอดี ( Chemical Oxygen Demand ; COD )                     | ไม่เกิน 120 mg/L หรืออาจแตกต่างกัน<br>แล้วแต่แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภท<br>ของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะ<br>กรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร<br>แต่ต้องไม่เกิน 400 mg/L |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1ค. แสดงค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน  
อุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ( ต่อ )

| ตัวแปร                 | ค่ามาตรฐาน         |
|------------------------|--------------------|
| โลหะหนัก Heavy Metal ) |                    |
| สังกะสี ( Zn )         | ไม่เกิน 50 mg/L    |
| โครเมียม ( Cr )        |                    |
| -Hexavalent            | ไม่เกิน 0.25 mg/L  |
| -Trivalent             | ไม่เกิน 0.75 mg/L  |
| อาร์เซนิก ( As )       | ไม่เกิน 0.25 mg/L  |
| ทองแดง ( Cu )          | ไม่เกิน 2.0 mg/L   |
| ปรอท ( Hg )            | ไม่เกิน 0.005 mg/L |
| แคดเมียม ( Cd )        | ไม่เกิน 0.03 mg/L  |
| แบเรียม ( Ba )         | ไม่เกิน 1.0 mg/L   |
| เซเลเนียม ( Se )       | ไม่เกิน 0.02 mg/L  |
| ตะกั่ว ( Pb )          | ไม่เกิน 0.2 mg/L   |
| นิกเกิล ( Ni )         | ไม่เกิน 1.0 mg/L   |
| แมงกานีส ( Mn )        | ไม่เกิน 5.0 mg/L   |

หมายเหตุ :

1. มาตรฐานนี้ได้ประกาศเป็นประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539
2. mg/L หมายถึงมิลลิกรัมต่อลิตร
3. โรงงานอุตสาหกรรม หมายความว่า โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน
4. นิคมอุตสาหกรรม หมายความว่า นิคมอุตสาหกรรมตามกฎหมายว่าด้วยนิคมอุตสาหกรรมหรือโครงการที่จัดไว้สำหรับการประกอบการอุตสาหกรรมที่มีการจัดการระบายน้ำลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกัน
5. น้ำเสีย หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปน หรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. น้ำทิ้ง หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้ความหมายรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศ
7. โรงงานอุตสาหกรรมจำพวกที่ 2 และ 3 ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 และนิคมอุตสาหกรรม ได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2537 ให้กำหนดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่ถูกควบคุมตามมาตรา 69 ของพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2535



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## การ สร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานนิกเกิล

(ADWA, AWWA and WPCF, 1995)

เปิดสารละลายสต็อกของนิกเกิล 100 mg/l มา 0.1 , 0.2 , 0.4 , 0.7 และ 0.9 มิลลิลิตร

ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร

ได้สารละลายนิกเกิลมีความเข้มข้น 0.2 , 0.4 , 0.8 , 1.4 และ 1.8 mg/l

นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ**  
**ตารางแสดงการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน**

**ตารางที่ 1-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผักตบชวา**

| วันที่เหมาะสม | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของผักตบชวา |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|---------------|--|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|               | ครั้งที่ 1                                       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 1             | 0.617  | 0.703      | 0.755      | 1.184     | 0.692     | 0.070 |
| 2             | 0.531  | 0.631      | 0.752      | 1.147     | 0.638     | 0.111 |
| 3             | 0.317  | 0.371      | 0.383      | 1.084     | 0.357     | 0.035 |
| 4             | 0.147  | 0.144      | 0.146      | 1.097     | 0.146     | 0.002 |
| 5             | 0.524  | 0.470      | 0.541      | 1.122     | 0.512     | 0.037 |

**ตารางที่ 2-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบอน**

| วันที่เหมาะสม | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของบอน |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|---------------|---|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|               | ครั้งที่ 1                                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 1             | 0.666                                       | 0.873      | -          | 1.538     | 0.770     | 0.146 |
| 2             | 0.872                                       | 0.821      | 0.813      | 1.519     | 0.835     | 0.032 |
| 3             | 0.772                                       | 0.801      | 0.735      | 1.595     | 0.769     | 0.033 |
| 4             | 0.636                                       | 0.605      | 0.688      | 1.566     | 0.643     | 0.042 |
| 5             | 0.780                                       | 0.772      | 0.721      | 1.585     | 0.758     | 0.032 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3-จ** แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโสน

| วันที่เหมาะสม | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของโสน |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|---------------|---|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|               | ครั้งที่ 1                                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 1             | 0.118                                       | 0.162      | 0.123      | 0.606     | 0.134     | 0.024 |
| 2             | 0.149                                       | 0.071      | 0.068      | 0.551     | 0.096     | 0.046 |
| 3             | 0.056                                       | 0.054      | 0.071      | 0.490     | 0.060     | 0.009 |
| 4             | 0.066                                       | 0.052      | 0.074      | 0.543     | 0.064     | 0.011 |
| 5             | 0.042                                       | 0.051      | 0.051      | 0.452     | 0.048     | 0.005 |

**หมายเหตุ** การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับจะคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับจากค่าเฉลี่ยของทุกชุดควบคุม

**ตารางที่ 4-จ** แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผักตบชวา

| ค่าพีเอช | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของผักตบชวา |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|----------|--|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|          | ครั้งที่ 1                                       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 4        | 0.204  | 0.221      | 0.300      | 0.491     | 0.242     | 0.051 |
| 5        | 0.291  | 0.241      | 0.229      | 0.595     | 0.254     | 0.033 |
| 6        | 0.254  | 0.224      | 0.109      | 0.387     | 0.196     | 0.077 |
| 7        | 0.155  | 0.183      | 0.168      | 0.736     | 0.169     | 0.014 |
| 8        | 0.223  | 0.270      | 0.178      | 0.462     | 0.224     | 0.046 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ  
ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบอน

| ค่าพีเอช | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของบอน |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|----------|---|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|          | ครั้งที่ 1                                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 4        | 0.293                                       | 0.239      | 0.341      | 0.837     | 0.291     | 0.051 |
| 5        | 0.156                                       | 0.165      | 0.130      | 0.515     | 0.150     | 0.018 |
| 6        | 0.269                                       | 0.282      | 0.235      | 0.521     | 0.262     | 0.024 |
| 7        | 0.246                                       | 0.291      | 0.327      | 0.455     | 0.288     | 0.041 |
| 8        | -   | -          | -          | -         | -         | -     |

ตารางที่ 6-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับนิกเกิลกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการ  
ดูดซับ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโสน

| ค่าพีเอช | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ<br>จากการดูดซับของโสน |            |            | ชุดควบคุม | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|----------|---|------------|------------|-----------|-----------|-------|
|          | ครั้งที่ 1                                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |           |       |
| 4        | 0.197                                       | 0.175      | 0.254      | 0.962     | 0.209     | 0.041 |
| 5        | 0.193                                       | 0.160      | 0.051      | 0.824     | 0.135     | 0.074 |
| 6        | 0.103                                       | 0.147      | 0.220      | 0.724     | 0.157     | 0.059 |
| 7        | 0.589                                       | 0.560      | 0.487      | 0.735     | 0.545     | 0.053 |
| 8        | 0.676                                       | 0.667      | 0.611      | 0.813     | 0.651     | 0.035 |

หมายเหตุ การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับจากชุดควบคุมของแต่ละการ  
ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับไอโซเทอม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโสน

| ไอโซเทอม  | เปอร์เซ็นต์การดูดซับโสน |            |            | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|-----------|-------------------------|------------|------------|-----------|-------|
|           | ครั้งที่ 1              | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |       |
| 0.5       | 0.306                   | 0.274      | 0.398      | 0.326     | 0.064 |
| 1         | 0.263                   | 0.232      | 0.207      | 0.234     | 0.028 |
| 1.5       | 0.178                   | 0.119      | 0.141      | 0.146     | 0.030 |
| 2         | 0.144                   | 0.139      | 0.083      | 0.122     | 0.034 |
| 2.5       | 0.051                   | 0.096      | 0.028      | 0.058     | 0.035 |
| ชุดควบคุม | 0.987                   | 0.937      | 1.082      | 1.002     | 0.074 |

ตารางที่ 8-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับไอโซเทอม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผักตบชวา

| ไอโซเทอม | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับของผักตบชวา |            |            | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|----------|--|------------|------------|-----------|-------|
|          | ครั้งที่ 1                                   | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |       |
| 0.5      | 0.171  | 0.169      | 0.208      | 0.183     | 0.022 |
| 1        | 0.221  | 0.198      | 0.142      | 0.187     | 0.041 |
| 1.5      | 0.099  | 0.102      | 0.098      | 0.100     | 0.002 |
| 2        | 0.040  | 0.067      | 0.053      | 0.053     | 0.014 |
| 2.5      | 0.062  | 0.040      | 0.023      | 0.042     | 0.020 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9-จ แสดงการหาปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับกับไอโซเทอม ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบอน

| ไอโซเทอม | ปริมาณนิกเกิลที่เหลือจากการดูดซับ<br>ของบอน |            |            | ค่าเฉลี่ย | SD    |
|----------|---|------------|------------|-----------|-------|
|          | ครั้งที่ 1                                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |       |
| 0.5      | 0.274                                       | 0.177      | 0.204      | 0.218     | 0.050 |
| 1        | 0.237                                       | 0.258      | 0.285      | 0.260     | 0.024 |
| 1.5      | 0.178                                       | 0.214      | 0.287      | 0.226     | 0.056 |
| 2        | 0.224                                       | 0.191      | 0.158      | 0.191     | 0.033 |
| 2.5      | 0.123                                       | 0.157      | 0.100      | 0.127     | 0.029 |

หมายเหตุ เนื่องจากในขั้นตอนการวิเคราะห์ที่สกัดบรอนและบอนมีความผิดพลาดจึงขออ้างอิงชุดควบคุมจากการทดลองจากไอโซเทอร์มของโสน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ฉ**  
**ตารางแสดงการหาค่าไอโซเทอร์ม**

**ตารางที่ 1-ฉ** แสดงการหาค่าไอโซเทอร์มของผักตบชวา

| m      | C <sub>0</sub> | C     | X     | X/m    | log X/M | log Ce  |
|--------|----------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 0.4996 | 1              | 0.183 | 0.817 | 1.6353 | 0.2136  | -0.7375 |
| 1.0007 | 1              | 0.187 | 0.813 | 0.8124 | -0.0902 | -0.7282 |
| 1.5003 | 1              | 0.099 | 0.901 | 0.6005 | -0.2215 | -1.0044 |
| 2.0004 | 1              | 0.160 | 0.84  | 0.4199 | -0.3768 | -0.7959 |
| 2.5001 | 1              | 0.042 | 0.958 | 0.3832 | -0.4166 | -1.3768 |

**ตารางที่ 2-ฉ** แสดงการหาค่าไอโซเทอร์มของบอน

| m      | C <sub>0</sub> | C     | X     | X/m    | log X/M | log Ce  |
|--------|----------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 0.5003 | 1              | 0.218 | 0.782 | 1.5631 | 0.1940  | -0.6615 |
| 1.0002 | 1              | 0.260 | 0.740 | 0.7399 | -0.1309 | -0.5850 |
| 1.5007 | 1              | 0.226 | 0.774 | 0.5158 | -0.2876 | -0.6459 |
| 2.0006 | 1              | 0.191 | 0.809 | 0.4044 | -0.3932 | -0.7190 |
| 2.5002 | 1              | 0.127 | 0.873 | 0.3492 | -0.4570 | -0.8962 |

**ตารางที่ 3-ฉ** แสดงการหาค่าไอโซเทอร์มของโสน

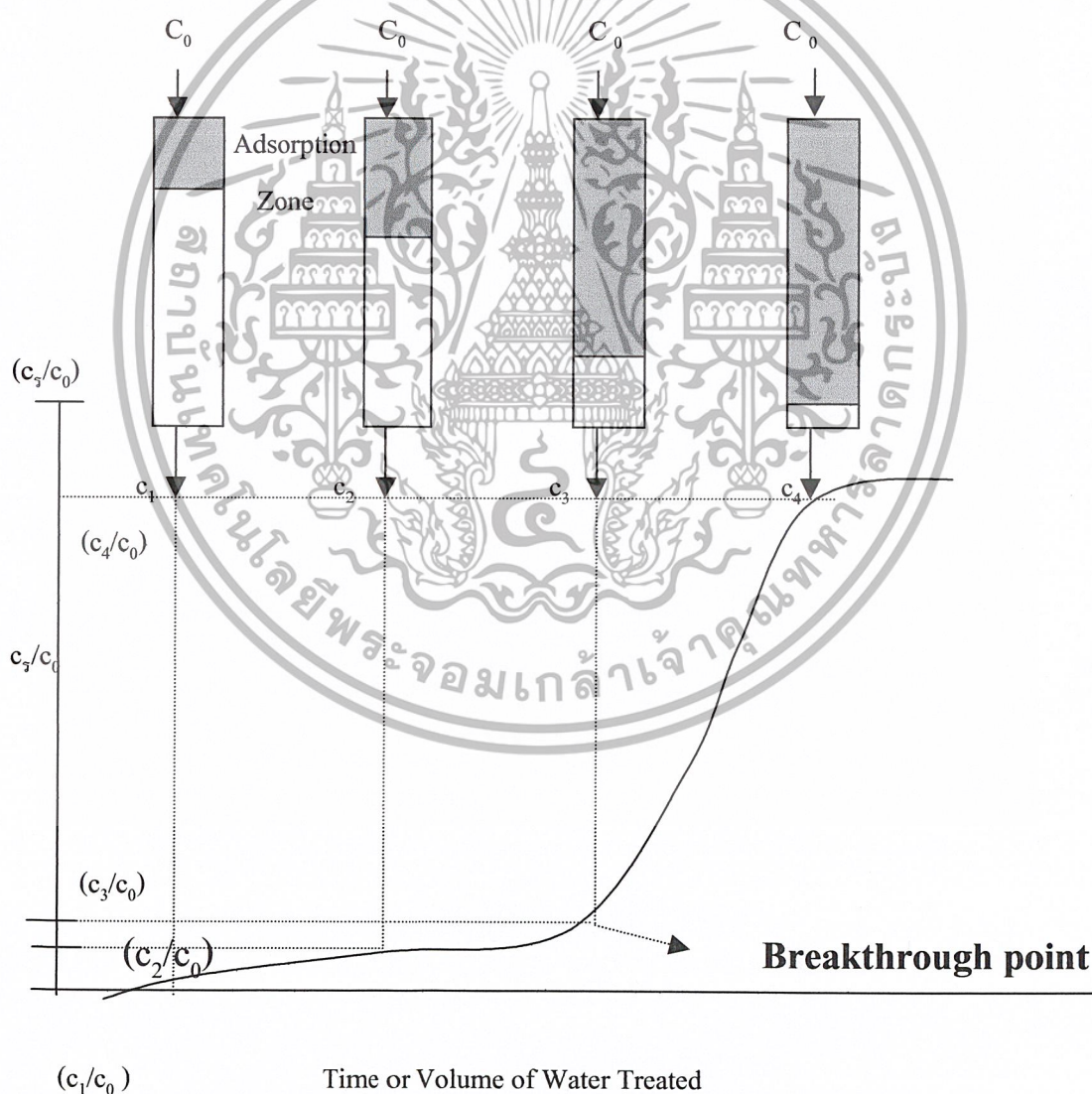
| m      | C <sub>0</sub> | C     | X     | X/m    | log X/M | log Ce  |
|--------|----------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 0.5008 | 1              | 0.326 | 0.674 | 1.3458 | 0.1290  | -0.4868 |
| 1.0000 | 1              | 0.234 | 0.766 | 0.7660 | -0.1158 | -0.6308 |
| 1.5002 | 1              | 0.146 | 0.854 | 0.5693 | -0.2447 | -0.8356 |
| 2.0004 | 1              | 0.122 | 0.878 | 0.4389 | -0.3576 | -0.9136 |
| 2.5004 | 1              | 0.058 | 0.942 | 0.3767 | -0.4240 | -1.2366 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับและการศึกษาค่าคงที่

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยการผ่านน้ำที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อย ๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ค่อย ๆ ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 2.7 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาณที่ใช้เรียกว่า Breakthrough Curve



รูปที่ 1-ก แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์ (Mccalf and Eddy, 1972)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้