

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลไอออนในน้ำเสีย โดยใช้เปลือกส้ม  
และชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>

ADSORPTION EFFICIENCY OF COPPER AND NICKEL IONS IN  
WASTEWATER USING ORANGE PEELS AND BAGASSE MODIFIED  
WITH NaOH AND CaCl<sub>2</sub>



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558  
KMITL-2015-SC-M-016-075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADSORPTION EFFICIENCY OF COPPER AND NICKEL IONS IN  
WASTEWATER USING ORANGE PEELS AND BAGASSE MODIFIED  
WITH NaOH AND CaCl<sub>2</sub>



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

KMITL-2015-SC-M-016-075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลไอออนในน้ำเสีย โดยใช้เปลือกส้มและชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>”  
“ADSORPTION EFFICIENCY OF COPPER AND NICKEL IONS IN WASTEWATER USING ORANGE PEELS AND BAGASSE MODIFIED WITH NaOH AND CaCl<sub>2</sub>”

ชื่อนักศึกษา นางสาวอัญชลี นันต์  
รหัสประจำตัว 55651304  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  | ลายมือชื่อ |
|---|------------|
| ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน<br>ประธานกรรมการ<br>รศ.ดร.นราธิป วิทยากร<br>อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)<br>ดร.เสาวภาค สขตระกุลเวศ<br>ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ<br>ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์<br>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ |            |

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 17 ธันวาคม พ.ศ.2558 เวลา 13.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 305 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณะ ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 23 เดือน ๘ พ.ศ. ๕๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิลไอออนในน้ำเสียโดยใช้เปลือกส้มและชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> |
| ชื่อนักศึกษา                | นางสาวอัญชลี นันตี  |
| รหัสประจำตัว                | 55651304  |
| ปริญญา                      | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม)   |
| ภาควิชา                     | เคมี  |
| พ.ศ.                        | 2558  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์  |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของกากชานอ้อย โดยการแปรผันค่าความเข้มข้นของ NaOH และ CaCl<sub>2</sub> พบว่า การปรับสภาพกากชานอ้อยที่ดีที่สุดคือ NaOH 0.8 M และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเปลือกส้ม และกากชานอ้อย พบว่า หลังจากปรับปรุงคุณภาพแล้วมีปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองการดูดซับโลหะจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักทองแดง และนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. โดยทำการแปรผันค่าการดูดซับที่ pH 2-7 และระยะเวลาที่ 20-120 นาที พบว่าที่ pH 5 และระยะเวลา 60 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นทำการดูดซับโลหะในน้ำเสียปริมาณ 25 มิลลิลิตร โดยใช้สภาวะที่ได้ และวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม พบว่า เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้ 79.44±0.96% และ 76.40±2.17% ตามลำดับ และสามารถดูดซับนิกเกิลได้ 77.26±6.34% และ 77.54±1.30% ตามลำดับ ทำการคายซับโลหะออกจากวัสดุดูดซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก หลังจากทำการคายซับแล้วได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งพบว่าสามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 3 ครั้ง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า 60 % จากนั้นได้ทำการดูดซับโลหะจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่ 71.39±2.97% และ 70.74±3.13% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลมีค่าอยู่ที่ 76.87±3.44% และ 76.12±2.49% ตามลำดับ ไอโซเทอร์มของการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มสามารถเป็นได้ทั้งแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม แต่สำหรับการดูดซับนิกเกิลไม่สามารถอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับได้ ส่วนการดูดซับทองแดง และนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยก็เช่นเดียวกัน ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย พบว่า การบำบัดมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง

**คำสำคัญ :** การดูดซับ กากชานอ้อย ทองแดง นิกเกิล เปลือกส้ม โลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>   | Adsorption Efficiency of Copper and Nickel Ions in Wastewater Using Orange Peels and Bagasse Modified with NaOH and CaCl <sub>2</sub> |
| <b>Student Name</b>   | Miss. Anchalee Nantee   |
| <b>Student ID</b>     | 55651304  |
| <b>Degree</b>         | Master of Science in Environmental Chemistry  |
| <b>Department</b>     | Chemistry   |
| <b>Year</b>           | 2015  |
| <b>Thesis Advisor</b> | Asst.Prof.Dr. Chompoonut Chaiyaraksa  |

### Abstract

This study of this research was firstly on a suitable modifier for bagasse by various concentrations of NaOH and CaCl<sub>2</sub>. It was found that 0.8 M NaOH and 0.8 M CaCl<sub>2</sub> was the best modifier. The Physical characteristic of the modified bagasse and orange peels were analyzed. The pore volume and surface area of modified material were found increased. For metal adsorption experiments, copper and nickel contaminated wastewater were synthesized with 50 mg/L initial concentration. The optimum adsorption condition was observed by varying pH from 2 to 7 and contact time from 20 to 120 minutes. The optimum pH was 5 and the contact time was 60 minutes. When using the optimum condition and 0.1 gram adsorbent to adsorb metals in 25 ml wastewater, copper can be adsorbed 79.44±0.96% and 76.40±2.17% by modified orange peels and bagasse, respectively. Nickel can be adsorbed 77.26±6.34% and 77.54±1.30%, respectively. Hydrochloric was used to desorb metals from adsorbent. After adsorption, the recycle of adsorbent was studied. The material could be recycled for 3 time since the adsorption efficiency was still higher than 60%. The adsorption was also carried on wastewater from electroplating industry. The copper adsorption efficiency of orange peel and bagasse were 71.39±2.97% and 70.74±3.13%, respectively. The nickel adsorption efficiency were 76.87±3.44% and 76.12±2.49%, respectively. Both Langmuir and Freundlich isotherm could be used to explain copper adsorption of orange peels but not for nickel. Neither Langmuir nor Freundlich was good to explain the copper and nickel adsorption of bagasse. From cost analysis, it was found that treatment cost was low.

**Keywords :** adsorption, copper, heavy metal, nickel, orange peel, sugarcane bagasse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆ ท่านด้วยกัน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมทั้งช่วยตรวจสอบ และขัดเกลาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้อง ความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวช อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้อง ความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทุกๆ ท่าน และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ในการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ บริษัท นาย เอ เอส โกลด์ อีเส็คโทรเพิลทิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียเพื่อใช้ในการงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณร้านขายน้ำโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เปลือกส้ม และนางสาวจตุพร พูลทวี ที่ช่วยหาคากากขาน้อยมาใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

และท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าอีกทั้งพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวอัญชลี นันดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

|  |          |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                               | ก        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                            | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ.....                               | ค        |
| สารบัญ.....  | ง        |
| สารบัญตาราง.....                                   | ช        |
| สารบัญรูป.....                                     | ฌ        |
| คำย่อ/สัญลักษณ์.....                               | ฎ        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>                           | <b>1</b> |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....         | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                   | 2        |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....                         | 2        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                 | 3        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b> | <b>4</b> |
| 2.1 อุตสาหกรรมชุบโลหะ.....                         | 4        |
| 2.2 โลหะหนัก.....                                  | 6        |
| 2.2.1 ทองแดง.....                                  | 6        |
| 2.2.2 นิกเกิล.....                                 | 7        |
| 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....                     | 8        |
| 2.4 กระบวนการดูดซับ.....                           | 10       |
| 2.4.1 ประเภทของการดูดซับ.....                      | 11       |
| 2.4.2 กลไกการดูดซับ.....                           | 11       |
| 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....               | 12       |
| 2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....                    | 13       |
| 2.5.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ.....           | 13       |
| 2.5.2 สมภาวะสมดุลของการดูดซับ.....                 | 14       |
| 2.5.3 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ.....    | 15       |
| 2.5.3.1 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม.....                   | 15       |
| 2.5.3.2 ฟรุนลิชไอโซเทอร์ม.....                     | 17       |
| 2.6 วัสดุดูดซับที่นำมาใช้ในการศึกษา.....           | 18       |
| 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ.....         | 18       |
| 2.6.2 เปลือกส้ม.....                               | 21       |
| 2.6.3 กากชานอ้อย.....                              | 22       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.7 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ.....  | 24        |
| 2.8 การคายซึบ.....  | 27        |
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 27        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>   | <b>31</b> |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....  | 31        |
| 3.2 การดำเนินงานวิจัย.....  | 32        |
| 3.2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ.....   | 32        |
| 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....   | 33        |
| 3.2.3 น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม.....  | 34        |
| 3.2.4 การวิเคราะห์ผลของการแปรผันค่าความเข้มข้นของสาร<br>ปรับสภาพกากขี้เถ้า.....                                       | 34        |
| 3.2.5 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ.....  | 34        |
| 3.2.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....   | 35        |
| 3.2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....  | 36        |
| 3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่.....   | 36        |
| 3.2.9 การดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียจริง.....   | 37        |
| 3.2.10 วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF.....   | 38        |
| 3.2.11 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....  | 38        |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>  | <b>39</b> |
| 4.1 การศึกษาการปรับสภาพกากขี้เถ้า.....  | 40        |
| 4.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับก่อน<br>และหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> ..... | 41        |
| 4.2.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR.....  | 41        |
| 4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์<br>อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....                                 | 44        |
| 4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค BET.....   | 45        |
| 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....   | 46        |
| 4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH.....  | 46        |
| 4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการสัมผัส.....  | 47        |
| 4.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....  | 49        |
| 4.5 การศึกษาความเหมาะสมในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่.....   | 54        |
| 4.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์<br>และ น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....                      | 59        |
| 4.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF.....   | 61        |
| 4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....   | 62        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....                                      | 64   |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 65   |
| ภาคผนวก.....  | 72   |
| ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลาย.....  | 73   |
| ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลายมาตรฐาน.....                                       | 76   |
| ภาคผนวก ค การคำนวณผลการทดลอง.....   | 87   |
| ภาคผนวก ง การคำนวณผลไอโซเทอร์ม.....   | 91   |
| ภาคผนวก จ ผลการทดลอง.....   | 94   |
| ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF..... | 114  |
| ภาคผนวก ช การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....                              | 115  |
| ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....                                   | 118  |
| ภาคผนวก ฌ มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.....                       | 124  |
| ภาคผนวก ฎ หลักการและเทคนิคของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....                  | 127  |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 139  |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 การปรับสภาพกากขานอ้อย.....   | 2    |
| 3.1 การปรับสภาพกากขานอ้อย.....   | 33   |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดูดซับก่อน และหลัง<br>ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> ..... | 35   |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ.....  | 45   |
| 4.2 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ.....   | 51   |
| 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ..   | 53   |
| 4.4 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF .....   | 61   |
| 4-5 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการทำวิจัยในการบำบัดน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร .....  | 62   |
| ข-1 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง (Cu <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาการปรับสภาพ.....                                      | 77   |
| ข-2 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาการปรับสภาพ .....                                    | 78   |
| ข-3 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง (Cu <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH .....                                   | 79   |
| ข-4 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH .....                                  | 80   |
| ข-5 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง (Cu <sup>2+</sup> )<br>ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา.....                            | 81   |
| ข-6 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา.....                              | 82   |
| ข-7 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง (Cu <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาการหาไอโซเทอร์ม.....                                  | 83   |
| ข-8 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษาการหาไอโซเทอร์ม .....                                | 84   |
| ข-9 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง (Cu <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษา<br>การหาประสิทธิภาพการดูดซับ .....                   | 85   |
| ข-10 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล (Ni <sup>2+</sup> ) ที่ใช้ศึกษา<br>การหาประสิทธิภาพการดูดซับ.....                  | 86   |
| ค-1 ค่า Q ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 %, 95 % และ 99%.....  | 90   |
| ง-1 ปริมาณวัสดุที่ต้องใช้เพื่อดูดซับน้ำเสียจากโรงงาน .....   | 93   |
| จ-1 การแปรผันค่าปรับสภาพของกากขานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> ดูดซับทองแดง.....                                       | 94   |
| จ-2 การแปรผันค่าปรับสภาพของกากขานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> ดูดซับนิกเกิล.....                                      | 95   |
| จ-3 ผลของ pH ในการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....                        | 96   |
| จ-4 ผลของ pH ในการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....                        | 97   |
| จ-5 ผลของ pH ในการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....                       | 98   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| จ-6 ผลของ pH ในการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....                       | 99   |
| จ-7 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....      | 100  |
| จ-8 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....      | 101  |
| จ-9 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....  | 102  |
| จ-10 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ..... | 103  |
| จ-11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....  | 104  |
| จ-12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....   | 105  |
| จ-13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักทองแดงด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ ...   | 106  |
| จ-14 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักนิกเกิลด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....   | 107  |
| จ-15 ผลของการคายซับเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง .....  | 108  |
| จ-16 ผลของการคายซับเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล.....  | 108  |
| จ-17 ผลของการคายซับกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง.....  | 109  |
| จ-18 ผลของการคายซับกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล .....  | 109  |
| จ-19 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง.....   | 110  |
| จ-20 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล.....  | 110  |
| จ-21 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง .....   | 111  |
| จ-22 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล.....   | 111  |
| จ-23 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์.....  | 112  |
| จ-24 ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ .....  | 112  |
| จ-25 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียจากโรงงาน .....  | 113  |
| จ-26 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักนิกเกิลในน้ำเสียจากโรงงาน.....  | 113  |
| ฉ-1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF.....  | 114  |
| ณ-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม .....   | 124  |
| ญ-1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่พันธะสามัญบางชนิด .....   | 134  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ภาพรวมอุตสาหกรรมชุบโลหะ.....  | 4    |
| 2.2 ภาพรวมของกระบวนการชุบโลหะ.....  | 5    |
| 2.3 การเกิดน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ.....  | 6    |
| 2.4 ภาพจำลองวิภาคศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับ.....   | 11   |
| 2.5 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน .....   | 12   |
| 2.6 ลักษณะเส้นไอโซเทอรั่มของการดูดซับแบบต่างๆ.....  | 14   |
| 2.7 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบพื้นฐาน.....   | 15   |
| 2.8 ลักษณะของแลงเมียร์ไอโซเทอรั่ม .....   | 17   |
| 2.9 ลักษณะของฟรุนดลิชไอโซเทอรั่ม.....   | 18   |
| 2.10 องค์ประกอบในผนังเซลล์พืช .....   | 18   |
| 2.11 โครงสร้างของลิกนิน .....   | 19   |
| 2.12 โครงสร้างของเพคติน.....  | 20   |
| 2.13 โครงสร้างของเซลลูโลส.....  | 20   |
| 2.14 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....  | 21   |
| 2.15 ส่วนประกอบของผลส้ม .....   | 22   |
| 2.16 ส่วนประกอบของกากขานอ้อย.....   | 23   |
| 2.17 การเปลี่ยนแปลงภายในองค์ประกอบของวัสดุดูดซับหลังปรับปรุงคุณภาพ.....   | 25   |
| 4.1 การดูดซับทองแดงด้วยกากขานอ้อย โดยใช้สารปรับปรุงสภาพความเข้มข้นต่างๆ.....  | 40   |
| 4.2 การดูดซับนิกเกิลด้วยกากขานอ้อย โดยใช้สารปรับปรุงสภาพความเข้มข้นต่างๆ.....   | 40   |
| 4.3 การวิเคราะห์ FT-IR ของเปลือกส้ม.....  | 42   |
| 4.4 การวิเคราะห์ FT-IR ของกากขานอ้อย.....   | 43   |
| 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุดูดซับเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....   | 44   |
| 4.6 อิทธิพลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะ โดยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl <sub>2</sub> 0.8 M .....                              | 46   |
| 4.7 อิทธิพลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะ โดยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl <sub>2</sub> 0.8 M .....                             | 47   |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl <sub>2</sub> 0.8 M..... | 48   |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับทองแดงและนิกเกิลโดยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl <sub>2</sub> 0.8 M.... | 49   |
| 4.10 ไอโซเทอรั่มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ.....  | 50   |
| 4.11 ไอโซเทอรั่มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ.....   | 50   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.12 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....  | 51   |
| 4.13 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....   | 51   |
| 4.14 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับทองแดงด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ .....  | 52   |
| 4.15 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับทองแดงด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ .....   | 53   |
| 4.16 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....  | 53   |
| 4.17 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....   | 53   |
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการคายซับทองแดงออกจากเปลือกส้ม<br>และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพกับจำนวนครั้งของการคายซับ .....       | 55   |
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการคายซับนิกเกิลออกจากเปลือกส้ม<br>และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพกับจำนวนครั้งของการคายซับ .....      | 56   |
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับวัสดุดูดซับทองแดงของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด<br>กับจำนวนครั้งที่น่าวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ .....  | 57   |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับวัสดุดูดซับนิกเกิลของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด<br>กับจำนวนครั้งที่น่าวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ..... | 58   |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์กับวัสดุดูดซับ .....  | 59   |
| 4.23 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเมื่อใช้วัสดุดูดซับ<br>ที่คำนวณได้จากแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม .....                     | 60   |
| ข-1 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการแปรผัน<br>ค่าความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากชานอ้อย .....                     | 77   |
| ข-2 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ใช้ศึกษาการแปรผัน<br>ค่าความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากชานอ้อย .....                       | 78   |
| ข-3 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH .....   | 79   |
| ข-4 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH .....  | 80   |
| ข-5 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา.....   | 81   |
| ข-6 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา .....   | 82   |
| ข-7 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....   | 83   |
| ข-8 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ .....   | 84   |
| ข-9 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ .....  | 85   |
| ข-10 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ .....  | 86   |
| ง-1 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ .....   | 91   |
| ง-2 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....   | 93   |
| ช-1 ความแตกต่างระหว่างค่าการปรับสภาพของกากชานอ้อยด้วย NaOH และ $CaCl_2$<br>ที่นำไปดูดซับทองแดง.....                                      | 118  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| ซ-2 ความแตกต่างระหว่างค่าการปรับสภาพของกากชานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl <sub>2</sub> ที่นำไปดูดซับนิกเกิล ..... | 119  |
| ซ-3 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ.....                               | 120  |
| ซ-4 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ .....                             | 121  |
| ซ-5 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับทองแดงด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ.....                              | 122  |
| ซ-6 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ .....                            | 123  |
| ญ-1 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง AAS.....   | 128  |
| ญ-2 กระบวนการ Atomization.....  | 129  |
| ญ-3 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้า และภายในรูพรุนของวัสดุ.....  | 132  |
| ญ-4 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ.....   | 132  |
| ญ-5 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน .....   | 132  |
| ญ-6 ส่วนประกอบของเครื่อง FTIR.....  | 134  |
| ญ-7 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope.....  | 136  |
| ญ-8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....   | 137  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ              | ความหมาย  |
|--------------------|---|
| AAS                | เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)   |
| Å                  | หน่วยที่ใช้ระบุขนาดของสเปกตรัมแสงที่มองเห็น (อังสตรอม)  |
| BET                | The Brunauer, Emmett and Teller (BET) คือ เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน |
| cm <sup>3</sup> /g | หน่วยของปริมาตรรูพรุนบอกถึงความหนาแน่นหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปริมาณวัสดุหน่วยเป็นกรัม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)  |
| C <sub>e</sub>     | ความเข้มข้นของสารละลาย  |
| Cu <sup>2+</sup>   | โลหะทองแดงที่อยู่ในสถานะที่มีประจุบวก 2 ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำได้ โดยมีมาตรฐานในน้ำทั้งหมด คือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Copper II Ion)                           |
| FTIR               | เทคนิคฟูเรียลทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer)   |
| M <sup>2+</sup>    | โลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electrons) เท่ากับ 2  |
| m <sup>2</sup> /g  | หน่วยของขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุหน่วยเป็นตารางเมตรต่อน้ำหนักวัสดุหน่วยเป็นกรัม (ตารางเมตรต่อกรัม)   |
| mol/L              | หน่วยความเข้มข้นที่เป็นอัตราส่วนของจำนวนโมลของตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลายปริมาตร 1 ลิตร (โมลต่อลิตร)   |
| mg/g               | หน่วยของปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อน้ำหนักของตัวดูดซับหน่วยเป็นกรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม)  |
| mg/l               | หน่วยของความเข้มข้นของสารละลายหนึ่งๆ โดยมีปริมาณของตัวถูกละลายหน่วยเป็นมิลลิกรัม ละลายอยู่ในสารละลายหน่วยเป็นลิตร (มิลลิกรัมต่อลิตร)                              |
| nm                 | หน่วยความยาวในระบบเอสไอ มีหน่วยเป็นหนึ่งในพันล้านส่วน (นาโนเมตร)  |
| Ni <sup>2+</sup>   | โลหะนิกเกิลที่อยู่ในสถานะที่มีประจุบวก 2 ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำได้ โดยมีมาตรฐานในน้ำทั้งหมด คือ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Nickel II Ion)                          |
| pH                 | ค่าความเป็นกรด-ด่าง   |
| SEM                | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)  |
| R <sup>2</sup>     | ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared)  |
| XRF                | เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมต่างๆให้ทันสมัย จากประเทศเกษตรกรรมกลายเป็นประเทศกึ่งอุตสาหกรรม หากอุตสาหกรรมด้านต่างๆไม่ได้รับการจัดการของเสียให้ถูกวิธีก็จะทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชุบโลหะขนาดเล็ก มักจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักหลากหลายชนิด เช่น ทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี เป็นต้น ทองแดง และนิกเกิล เป็นโลหะหนักที่นิยมใช้มากในขั้นตอนการผลิต อาจมีการลักลอบปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติทั้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำปริมาณมาก และอาจไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นของทองแดง และนิกเกิลที่ปล่อยออกจากน้ำทิ้งของโรงงานตั้งแต่ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ต้องมีค่าไม่เกิน 2.0 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ดังนั้น ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ จำเป็นต้องหาวิธีการบำบัดหรือวิธีการบำบัดรวมที่สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีการกำจัดโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-Exchange) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (Electro Dialysis) การกรองด้วยเยื่อกรอง และการตกตะกอนด้วยสารเคมี เป็นต้น มีนักวิจัยจำนวนมากที่กล่าวเอาไว้ว่า วิธีดังกล่าวข้างต้นเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ สะดวก แต่ราคาค่อนข้างสูง ต้องอาศัยผู้ที่ชำนาญควบคุมระบบ ผลพลอยได้ในรูปของกากตะกอนที่เกิดขึ้นพืชต้องกำจัดทิ้งอย่างระมัดระวัง และไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีผู้วิจัยจำนวนมากได้หันมาให้ความสนใจ วิธีการดูดซับทางชีวภาพ วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับมีหลากหลายชนิด ได้แก่ ผักตบชวา กากชา เปลือกส้ม เปลือกกล้วย ชี้เลื่อย ฟางข้าว กากขานอ้อย กากมันสำปะหลัง ฯลฯ อรพิน (2554) ได้นำกากชามาทำการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะสังกะสี และทองแดง พบว่าสามารถบำบัดได้ถึงร้อยละ 75.22 และ 79.83 ตามลำดับ วัสดุทางชีวภาพที่ต่างกันจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักแตกต่างกัน วิธีการดูดซับทางชีวภาพเป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ใช้เวลาบำบัดไม่นาน โลหะหนักที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ในระบบได้ใหม่ อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (จันทนา และคณะ, 2555 และอัญชุลี, 2554) การใช้วัสดุดูดซับธรรมชาติทำการดูดซับโลหะหนักสามารถดูดซับได้แต่ไม่ได้ประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร จึงมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดหรือด่าง และการกระตุ้นด้วยความร้อนสูง (ยุพดี, 2557) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะนำเปลือกส้ม และกากขานอ้อยมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก เนื่องจากเปลือกส้ม และกากขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งปริมาณมาก ในแต่ละปีมีการนำมาใช้ประโยชน์ค่อนข้างจำกัด ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีเส้นใยที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยมีองค์ประกอบของกลุ่มลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น จากนั้นทำการปรับสภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับสภาพด้วย NaOH เพื่อที่จะทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสที่มีในวัสดุดูดซับเปลี่ยนไป ส่วนการปรับสภาพด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CaCl<sub>2</sub> เพื่อที่จะให้เกิดการตกตะกอนของกลุ่มเพกติน ทำให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น (Feng และ Guo, 2012) จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุดูดซับ และปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก เพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากที่สุด อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมและเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และคุ้มค่า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล ด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล ในน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยใช้เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>
- 3) เพื่อศึกษาหาความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากชานอ้อยที่เหมาะสมที่สุด
- 4) เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเปลือกส้ม และกากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>
- 5) เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>
- 6) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
- 7) เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการนำวัสดุมาใช้ในการดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารปรับสภาพกากชานอ้อย โดยแปรผันตัวปรับสภาพดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การปรับสภาพกากชานอ้อย

| Ethanol     | NaOH                 |             | CaCl <sub>2</sub>    |             |
|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| ปริมาณ (ml) | ความเข้มข้น (mole/L) | ปริมาณ (ml) | ความเข้มข้น (mole/L) | ปริมาณ (ml) |
| 50          | 0.5                  | 50          | -                    | -           |
| 50          | 0.5                  | 25          | 0.5                  | 25          |
| 50          | 0.8                  | 50          | -                    | -           |
| 50          | 0.8                  | 25          | 0.8                  | 25          |
| 50          | 1.0                  | 50          | -                    | -           |
| 50          | 1.0                  | 25          | 1.0                  | 25          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกส้ม และกากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$

2.1) วิเคราะห์หาโครงสร้างของวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง FT-IR spectrometer

2.2) การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง SEM

2.3) การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับด้วยเทคนิค BET  $\text{N}_2$ -Adsorption

3) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล ในน้ำเสียด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$

3.1) ศึกษาอิทธิพลของ pH โดยแปรค่าที่ pH 2, 3, 4, 5, 6 และ 7

3.2) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา โดยแปรค่าเวลาที่ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

4) ตรวจสอบไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสีย โดยการแปรค่าปริมาณตัวดูดซับดังนี้ คือ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.0 กรัม

5) ทำการคายซับของวัสดุดูดซับเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  หลังจากดูดซับในสถานะที่เหมาะสม โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (0.05 mol/L) เป็นตัวคายซับ และนำไปทดลองดูดซับใหม่อีกครั้งในสถานะที่เหมาะสม

6) ทำการทดลองกับน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยใช้สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด

7) วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับโดยใช้เครื่อง XRF

8) วิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุดูดซับ สารเคมี ไฟฟ้า และน้ำ ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นแนวทางที่จะนำวัสดุดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

2) เป็นการลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

3) เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นต่อไป

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุตสาหกรรมชุบโลหะ

อุตสาหกรรมชุบโลหะ จัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ เป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนของอุตสาหกรรมหลักอื่นๆ จำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ก่อสร้าง อัญมณี เครื่องจักรกลหนัก เครื่องใช้ในบ้าน โทรคมนาคม เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักของอุตสาหกรรมชุบโลหะ คือ เพื่อตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้มีความแวววาว สวยงาม ช่วยป้องกันการผุกร่อนของวัสดุจำพวกเหล็ก ทำให้มีอายุในการใช้งานนานขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557) ดังรูปที่ 2.1



การชุบโลหะมีกระบวนการผลิตแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557) ดังนี้

1) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายเกลือของโลหะ (Metallic Salts) แล้วทำให้ไอออนบวกวิ่งมารับประจุไฟฟ้าลบที่ขั้วงาน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) จึงทำให้เกิดเป็นชั้นผิวบางของโลหะมาเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของขั้วงาน การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถนำโลหะ และอโลหะหลายชนิดมาทำการเคลือบผิว ในขณะที่เดียวกันก็สามารถเลือกโลหะที่จะนำมาเคลือบผิวได้หลากหลายชนิดด้วย

2) การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า คือ กระบวนการจับตัวของโลหะที่ผิวหน้าวัตถุ ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น การชุบทองแดง และนิกเกิล แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards, PCB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การชุบโลหะแบบการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และไฟฟ้า คือ กระบวนการชุบโลหะที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน โดยอาจใช้กระแสไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ เพื่อทำให้เกิดชั้นป้องกันผิว (Protective Coating) และหรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม (Decorative Coating) ตัวอย่างเช่น การชุบโลหะด้วยนิกเกิล การเตรียมพื้นผิวหน้าโดยการรองพื้นด้วยฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะทำก่อนการทาสีหรือพ่นสี การจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายเกลือโลหะหรือสารละลายกรดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน กระบวนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรด เช่น กรดดินประสิว หรือสารละลายของกรดดินประสิวกับเกลือโซเดียมไดโครเมตที่ใช้สำหรับการป้องกันการผุกร่อน และช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

4) การชุบโลหะแบบอื่นๆ คือ กระบวนการชุบโลหะที่ไม่จัดอยู่ใน 3 แบบข้างต้น ได้แก่ กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน กระบวนการทางด้านวัสดุโลหะที่ทำให้ผิวด้านนอกของวัสดุมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อวัสดุที่อยู่ภายใน ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงผิวโลหะให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีความทนทานและสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดี และการชุบโลหะอื่นๆ เช่น การเคลือบด้วยไอระเหย การเคลือบในสุญญากาศ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพรวมของกระบวนการชุบโลหะ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557)

วิธีการทั่วไปในกระบวนการชุบโลหะ คือ การนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวมาแล้วจุ่มลงไปในการชุบที่ต้องการใช้เคลือบ ระยะเวลาที่ใช้ในการจุ่มจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับความหนาที่ต้องการ การเคลือบผิวชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าการชุบโลหะจะไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังใช้ต้นทุนต่ำ ซึ่งข้อดีของการชุบโลหะก็เพื่อช่วยให้ยืดอายุของชิ้นงานมีความคงทน ป้องกันการผุกร่อน และให้ความสวยงามกับชิ้นงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2557) แต่ก็มีข้อเสีย คือ ทำให้เกิดมลพิษจากของเสียอันตรายในกรรมวิธีหรือกระบวนการการชุบโลหะจากขั้นตอนการล้างไขมันด้วยด่าง การล้างด่างด้วยน้ำ การกำจัดสนิมด้วยกรด การล้างกรดด้วยน้ำ การชุบสารละลายโลหะต่างๆเพื่อเคลือบผิวชิ้นงาน และขั้นตอนการล้างสารเคมีด้วยน้ำ ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนที่มีการสูญเสียทรัพยากรจำนวนมาก เช่น การสูญเสียสารเคมีที่ใช้ชุบนิกเกิลหรือโครเมียม การใช้น้ำอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และการใช้ไฟฟ้าสิ้นเปลือง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) แม้ว่าหลังจากสิ้นสุดในขั้นตอนการชุบโลหะ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะผ่านเข้าสู่กระบวนการจัดการก่อนที่จะปล่อยทิ้งก็ตามการคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ของแร่หลายชนิดในธรรมชาติซึ่งแร่ต่างๆ เหล่านี้สลายตัวได้ง่าย การสลายตัว และฟุ้งของแร่จะให้ ประจุบวกของทองแดงออกมาโดยเฉพาะสภาวะที่เป็นกรด ทองแดงจะสลายออกมาได้มาก (สุนีรัตน์, 2549)

ปัจจุบันมีการนำทองแดงมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เนื่องจากโลหะทองแดงมี คุณสมบัติเด่นมากมายโดยเฉพาะการนำไฟฟ้า และการนำความร้อนสูง มีความต้านทานการกัดกร่อน สามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆได้ง่าย และทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี การใช้งานส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับ อุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟ เคเบิล มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไนนาโม พัดลม และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนจึงนำทองแดงมาใช้ในการ ก่อสร้างหลายอย่าง เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำและข้อต่อต่างๆ ระบบให้ความร้อน และระบบ ปรับอากาศ ใช้ทำเครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน เนื่องจากทองแดงขึ้นรูปง่ายหรือแม้แต่การนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องบิน เรือเดินสมุทร หัวจักรรถไฟ อุปกรณ์สวิทช์ และสัญญาณ ต่างๆ ส่วนการใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆของทองแดง เช่น ใช้ผลิตยุททภัณฑ์ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องวัดต่างๆ เครื่องประดับ เครื่องตกแต่ง เพรียมกษาปณ์ บรรจุภัณฑ์ และใช้ผลิตโลหะผสม เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ เป็นต้น (กิตติพันธ์, 2557 และ สุนีรัตน์, 2549)

การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมของทองแดง พบว่า มีเพียงส่วนน้อยที่ทองแดงเกิดจาก การละลายจากแหล่งธรรมชาติ เนื่องจากทองแดงสามารถละลายน้ำ และเกิดเป็นอนุภาคแขวนลอยใน น้ำทันที แต่โดยส่วนใหญ่แล้วเกิดจากการกระทำของมนุษย์ที่มีการนำทองแดงไปใช้ เช่น การนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมถลุงแร่ทำให้ทองแดงฟุ้งกระจายขึ้นไปในอากาศแล้วถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การใช้ ทองแดงในอุตสาหกรรมโลหะผสม เป็นต้น (ทิวาลวิสดิ, 2553) จึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมของทองแดงต้อง มีค่ามาตรฐานไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ความเป็นพิษของทองแดง พบว่า สามารถเข้าสู่ร่างกายได้จากการปนเปื้อนทางอาหาร และการหายใจ เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย โดยจะมีอาการ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดรระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย และอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต (Ravindra et al., 2014) เมื่อได้รับทองแดงเข้าสู่ร่างกายติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ตับท่อน้ำที่บกพร่องไม่สามารถขับ ทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ หากสะสมอยู่ในร่างกายในปริมาณมากจะส่งผลให้เกิด ความผิดปกติของร่างกายหรือกลุ่มอาการวิลสัน โดยมีอาการร่างกายสีน้ำตาลอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อ แข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล และควบคุมการพูดลำบาก (สุนีรัตน์, 2549)

### 2.2.2 นิกเกิล (Ni)

นิกเกิล (Nickel) มีสัญลักษณ์ คือ Ni เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ 8B ในตารางธาตุ มีเลข อะตอมเท่ากับ 28 มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 58.71 และมีเลขออกซิเดชันหลายค่า คือ 0, I, II, III และ IV นิกเกิลที่พบทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูปของนิกเกิลที่ประจุ +2 เป็นส่วนใหญ่ อีออน นิกเกิลประจุ +2 เป็นออกตะฮีดรัล โดยเชื่อมต่อกับกับโมเลกุลของน้ำ 6 โมเลกุล (สมบุญรณ์, 2543) นิกเกิลเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ต้านทานการกัดกร่อนสูง มีความเหนียว มีความอ่อนตัวมากจึงสามารถขึ้นรูป ณ ที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย มีความคล้ายคลึงกับเหล็กทำให้สามารถ ละลายกับโลหะอื่นได้ง่าย และให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว (กิตติพันธ์, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของนิกเกิล เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม-เหล็กกล้าผสม ใช้ในการทำสแตนเลสสตีล ใช้ในการทำซูเปอร์อัลลอยด์ และนอกจากนี้มีการนำนิกเกิลไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น ทำเกราะ เป็นส่วนผสมของโลหะ alnico เพื่อใช้ในการทำแม่เหล็ก ใช้ทำ monel metal ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างทองแดง และนิกเกิลซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการผุกร่อนได้ดีเยี่ยม นำไปใช้ในการผลิตใบพัดเรือ เครื่องจักร และท่อในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ในถ่านชาร์จ ใช้ทำเหรียญกษาปณ์ และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม เป็นต้น (สุนีรัตน์, 2549)

การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมของนิกเกิลส่วนใหญ่เกิดจากการใช้นิกเกิล และสารประกอบนิกเกิลในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ แบตเตอรี่ โลหะผสม และการถลุงนิกเกิลหรือจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การสูบบุหรี่ การนำขยะซึ่งเป็นเครื่องใช้หรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ไม่ใช้แล้วโดยมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบไว้ในดิน เมื่อมีการทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมจึงเกิดการปนเปื้อน และก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ จึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมว่า นิกเกิลต้องมีค่ามาตรฐานไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ความเป็นพิษของนิกเกิล พบว่า เป็นสารที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช จัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ และมนุษย์ แต่เป็นสารที่ไม่รุนแรงมากนักในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้ต่ำ สำหรับมนุษย์นิกเกิลสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางผิวหนัง การหายใจ และการรับประทาน สารประกอบนิกเกิลที่เป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด คือ นิกเกิลคาร์บอนิลหรือนิกเกิลเตตระคาร์บอนิล ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) ซึ่งเป็นของเหลวไม่มีสี กลายเป็นไอง่าย เป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ ใช้ประโยชน์ในการทำปิโตรเลียมให้บริสุทธิ์ (ศุภมาศ, 2539) ผลเรื้อรังจากการสัมผัสนิกเกิล และสารประกอบนิกเกิล ทำให้เกิดการอักเสบของผิวหนัง เช่น การมีแผลไหม้ คัน เป็นผื่นแดง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของความผิดปกติของระบบย่อยอาหาร อาการชัก เกิดภาวะขาดออกซิเจน สาเหตุทำให้เกิดมะเร็งทางเดินหายใจ มีอาการแพ้ของปอดคล้ายกับการเป็นหอบหืด รวมทั้งแน่นหน้าอก คือ การหายใจเอาอากาศที่มีนิกเกิลเจือปนอยู่เข้าไป (สุนีรัตน์, 2549 และ Guatam *et al.*, 2014)

### 2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

นนทชัย และคณะ (2553) ได้อธิบายว่า กระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำให้หมดไปหรือให้เหลือสารที่ปนเปื้อนน้อยที่สุด เพื่อให้น้ำมีคุณภาพได้มาตรฐานที่กำหนด และสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ศศิธร (2551) อธิบายความหมายของการบำบัดน้ำเสียว่า การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การแยกหรือทำลายสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้งให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ และในการบำบัดน้ำเสียนั้นจะมีกระบวนการหรือขั้นตอนรวมทั้งระบบที่ใช้ในการบำบัดหลายอยู่ระบบและหลายขั้นตอน ส่วนหุทัย (2547) ได้กล่าวถึงวิธีการเลือกกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียว่า ในการเลือกกระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการทำโรงบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการประสานคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก ไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของคอลลอยด์มีขนาดเล็กเกินไป หลักการของกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ เช่น สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) ลงไปในน้ำเสียทำให้คอลลอยด์หลายๆอนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ฟล็อก จนมีน้ำหนักมาก และสามารถตกตะกอนลงมาได้รวดเร็ว สารโคแอกกูแลนต์จะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวประสานให้อนุภาคมารวมตัวกันเป็นฟล็อก

### 2.3.2 การตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะกระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสภาพของต่างๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลาย โดยวิธีการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง วิธีการนี้จะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับ pH ปริมาณ ชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ วิธีนี้มีข้อเสีย คือ กรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสียต้องตกตะกอนทีละชนิด ใช้เวลานาน และต้องนำกากตะกอนไปฝังกลบ ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่กากตะกอนเหล่านี้จะไปปะปนกับขยะชุมชน ประการสำคัญ คือ การสูญเสียโลหะที่มีค่าและน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยไม่อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้

### 2.3.3 การทำให้เป็นกลางหรือการปรับ pH (Neutralization)

ค่า pH มีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นในการเติมกรดหรือด่างเพื่อปรับค่า pH ของน้ำเสียจึงเป็นสิ่งจำเป็น น้ำเสียที่มีค่า pH ต่ำสามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) โซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) หรือโซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ส่วนน้ำที่มีค่า pH สูงทำให้เป็นกลางได้โดยใช้กรดชนิดต่างๆ เช่น กรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กรดเกลือ ( $\text{HCl}$ ) กรณีที่ต้องการเปลี่ยน pH เพียงเล็กน้อย อาจใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )

### 2.3.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็ง และของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุภาคในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนที่มีประจุลบ และไอออนที่มีประจุบวก เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปไอออนเดิม โดยผ่านสารละลายที่มีไอออนเช่นเดียวกันกับไอออนเริ่มต้น โดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมาจากธรรมชาติ และสังเคราะห์ขึ้น จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามซึ่งอยู่ในสารละลาย เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย และต้องการประสิทธิภาพสูง

### 2.3.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery, ER)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา จึงเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง เช่น น้ำทิ้งจากกระบวนการขัดเงาโลหะ แต่ไม่เป็นที่นิยม เพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากสารละลายที่เจือจางทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น

### 2.3.6 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction, SE)

วิธีนี้ใช้สารเคมีที่มีสมบัติเลือกสกัดไอออนของโลหะหนักบางชนิด โดยการละลายสารสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสม ใช้แยกโลหะหนักจากแร่เศษโลหะ และสารละลายต่างๆ ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และมีโลหะหนักปนอยู่ เวลาใช้นอกจากจะทำให้เจือจางโดยการละลายในตัวทำละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อลดความหนืด และต้องเติมสารต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพในการสกัด เช่น แอลกอฮอล์ชนิดที่มีโมเลกุลยาวๆ การกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้จะประหยัด เมื่อมีการป้องกันการสูญเสียที่เกิดขึ้นของสารที่ใช้ทุกอย่างให้น้อยที่สุด ข้อเสีย คือ สารเหล่านี้ไปเพิ่มค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งชั้นสุดท้าย แม้สารสกัดบางชนิดจะมีปริมาณน้อยในน้ำทิ้งแต่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้

### 2.3.7 การเติมโอโซน (Ozonation)

การเติมโอโซนเป็นเทคนิคที่ใช้กำจัดน้ำเสียได้ทุกชนิด วิธีนี้ใช้กันมากในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา และของโสโครก แก๊สโอโซนสามารถกำจัดโลหะหนักทุกสภาพที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ ถ้าใช้ร่วมกับอัลตราไวโอเล็ต ปฏิกริยาการกำจัดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และประหยัด โลหะหนักในน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์ ซึ่งทำให้มีลักษณะเป็นวุ้นจึงกรองแยกออกได้ง่าย ข้อดีของวิธีนี้ คือ ระบบดูแลง่าย สะดวกสบาย ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสีย คือ ใช้งบประมาณค่อนข้างสูงในการติดตั้ง และบำรุงรักษา มีข้อจำกัดในการใช้ เมื่อเครื่องมีปัญหาไม่สามารถซ่อมเองได้

### 2.3.8 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล จะใช้แยกอินทรีย์สาร สี กลิ่น และรสที่ปนเปื้อน สารดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล เป็นต้น วิธีการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้จนถึงระดับที่ยอมรับได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาการดูดซับ โดยใช้สารดูดซับจากวัสดุธรรมชาติเพื่อกำจัดไอออนของโลหะในน้ำ และในการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยวิธีการดูดซับเป็นวิธีการที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ง่ายไม่จำเป็นต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุมระบบ ไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ใหญ่มาก ใช้เงินลงทุนน้อย เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำวิธีการดูดซับโลหะหนักจากวัสดุธรรมชาติมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

## 2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กจนถึงขั้นโมเลกุลได้ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารที่ปนเปื้อนได้ค่อนข้างสูง เพราะการกำจัดด้วยวิธีการตกตะกอนหรือวิธีการกรองแบบธรรมดาไม่สามารถทำได้ ซึ่งกระบวนการดูดซับนั้นจะอาศัยการดึงโมเลกุลของสารที่ปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของวัสดุดูดซับ (เดชา, 2552) พื้นผิวที่ดูดซับสารปนเปื้อน เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลของสารเคมีที่มาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งปรากฏการณ์ของการดูดซับนี้จะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสองชนิด ได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว (อุสารัตน์, 2547)

### 2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

ศานิต (2547) อธิบายว่า การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับประเภทนี้แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Forces) เป็นต้น โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องมีการอาศัยพลังงานเข้ามาร่วมด้วย ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่

1. ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับด้วยการให้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล และอิทธิพลของการแพร่
2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วยุไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้น แต่การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น
3. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้อัตราการดูดซับทางกายภาพลดลง แต่อัตราการดูดซับทางเคมีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองวิภาคศาสตร์ของการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับ (เดชา, 2552)

#### 2.4.2 กลไกการดูดซับ

ศานิต (2547) และ ปุณณมา (2554) กล่าวว่า กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็นขั้นเป็นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน ดังรูปที่ 2.5

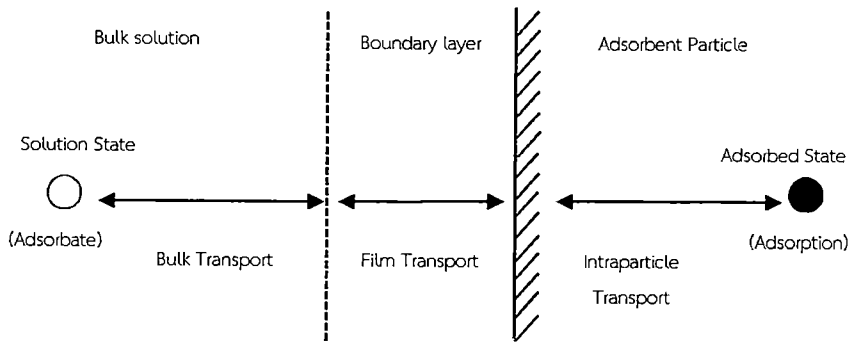
ขั้นตอนที่ 1 Bulk Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass Transfer) จากสารละลาย (Bulk Solution) ไปยังบริเวณผิวฟิล์มหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 Film Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass Transfer) แพร่ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 Intraparticle Transport หรือ Pore Transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass Transfer) แทรกผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณเร่ง (Active Sites) บนผิวตัวดูดซับเกิดเร็วมาก และแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพ และทางเคมีหรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน (กรองกาญจน์, 2530)

ดังนั้น แรงที่ใช้ในกระบวนการดูดซับมี 2 ชนิด ได้แก่ แรงทางกายภาพ (Physical Force) และแรงทางเคมี (Chemical Force) โดยแรงทางกายภาพจะอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับติดกับผิวของสารดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่ค่อนข้างอ่อน เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) โดยจะเกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบและจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ไล้จากออกจากสารดูดซับได้ง่าย ส่วนแรงทางเคมีเป็นผลเนื่องจากแรงกระทำเกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแรงที่ยึดติดกันแน่นมากจึงทำให้ไล้จากออกจากสารดูดซับได้ยาก

#### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (มันลิน, 2542)

##### 2.4.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface Area and Pore Structure) พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น โครงสร้างของรูพรุนจะช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

- ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent Size) ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับก็จะน้อย แต่ขนาดของตัวดูดซับจะมีผลกับความสามารถในการดูดซับก็ต่อเมื่อตัวดูดซับไม่มีรูพรุน เพราะพื้นที่ผิวมีมากขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

##### 2.4.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

- ความสามารถในการละลาย เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นการยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมักเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดีซึ่งอาจจะไม่จริงเสมอไปเพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

- น้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เช่น โมเลกุลของตัวดูดซับเป็นสารอินทรีย์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็มากขึ้นตาม เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลเป็นผลที่ทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

- ความมีขี้ของโมเลกุล การเพิ่มสภาพความมีขี้ทำให้ความสามารถในการละลายดีขึ้น และความสามารถในการดูดซับจะลดลง

- ความเข้มข้นของสารละลายหรือตัวดูดซับ โดยทั่วไปแล้วอัตราเร็วของการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ คือ อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น และอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นลดลง

**2.4.3.3 อัตราเร็วของการกวน** ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับที่ข้ามผ่านชั้นฟิล์มจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์ม นั่นคือ ถ้าฟิล์มมีความหนามากก็จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการดูดซับเกิดช้า หากไม่มีการกวนสารละลายจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างของแข็งและของเหลวมีมากขึ้น ดังนั้น ในระบบที่มีการกวนและไม่มีการกวนสารละลายพบว่า การกวนช่วยทำให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า

**2.4.3.4 เวลาสัมผัส** เป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

**2.4.3.5 ค่าพีเอช (pH)** เป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่า pH จึงมีผลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ

ดังนั้น การใช้กระบวนการดูดซับในงานอุตสาหกรรมสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุดคือ เพื่อที่จะกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำหรือน้ำเสีย เช่น การกำจัดคลอรีน สีที่เกิดจากสารอินทรีย์ โลหะหนักต่างๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ปนเปื้อนบางชนิด การกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่เหลือในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำทิ้งชุมชน น้ำทิ้งขยะ น้ำเสียอุตสาหกรรม และของเสียอันตราย เป็นต้น

## 2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (อุสาร์ตัน, 2547; สุรินทร์, 2549)

### 2.5.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับก็ยังคงดำเนินไปเรื่อยๆ แต่จะไม่ให้ค่าศักยภาพการดูดซับสูงสุด (Maximum Capacity) เพราะมีการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง ตัวถูกละลายจึงเกิดการดูดซับ และคายการดูดซับไปพร้อมๆกัน จนอัตราการดูดซับ (Adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (Desorption) จึงเรียกว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุล เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับคงที่สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) ณ อุณหภูมิคงที่ ดังนั้น การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จะต้องทำที่จุดสมดุลของการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ โดยค่าที่ได้จากการหาจุดสมดุลของการดูดซับจะเป็นค่าปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัววัสดุดูดซับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการศึกษาศักยภาพในการดูดซับที่จุดสมดุลได้ดังสมการ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับที่ก่อนทำการดูดซับ (mg/L)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหลังการดูดซับ (mg/L)  
 $V$  คือ ปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ (L)  
 $M$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบ (g)

### 2.5.2 สภาวะสมดุลของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่างๆ เส้นที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่เหลือยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไป การศึกษาการดูดซับมักจะพบไอโซเทอร์มใน 5 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.6

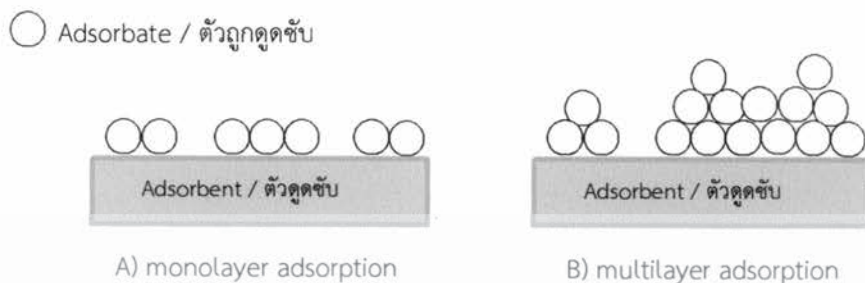


รูปที่ 2.6 ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ (อุสาร์ตัน, 2547)

**Type I Isotherm** เป็นแบบที่พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับปกคลุมบริเวณผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งชั้น จะพบได้ทั้งการดูดซับทางเคมี และทางกายภาพ โดยปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้หนึ่งแต่จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเล็กน้อย ถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงถึงความมีรูพรุนของวัสดุดูดซับที่เป็น micro porous และมีปริมาณที่มาก อีกทั้งโมเลกุลของการจัดเรียงเป็นเพียงชั้นเดียวบนผิวของวัสดุดูดซับจึงเป็น monolayer ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Type II Isotherm** เป็นปรากฏการณ์ดูดซับแบบ multilayer หรือการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับหนาขึ้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่กว้างกว่า Type I ที่จุดเปลี่ยนกราฟ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความดันสัมพัทธ์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน (สนิรัตน์, 2549)  
จากรูปที่ 2.7 (A) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว  
ส่วนรูปที่ (B) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบหลายชั้น

**Type III Isotherm** ลักษณะกราฟจะคล้ายกับ Type II แต่การดูดซับชั้นแรกจะเกิดความร้อน แต่จะมีค่าน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่นหรือรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว จึงทำให้การดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดจากตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดกับผิวของวัสดุดูดซับจึงเป็นการดูดซับแบบ multilayer

**Type IV Isotherm** การดูดซับที่เกิดขึ้นจะคล้ายๆกับ Type II เช่นกันสำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรก และการดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเมื่อรูพรุนภายในวัสดุดูดซับเต็ม ความชื้นที่เพิ่มขึ้นก็เกิดขึ้นจากความสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับหรือสารละลายเข้าไปในรูพรุนปริมาณมาก ปรากฏการณ์ของกราฟที่เปลี่ยนจึงเกิดเช่นเดียวกับ type II ซึ่งเกือบจะเป็น monolayer ที่สมบูรณ์แต่ก็เป็น multilayer

**Type V Isotherm** ลักษณะการดูดซับจะคล้ายกับ Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่การดูดซับก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเข้าสู่ค่าสูงสุดเช่นเดียวกับ Type IV เป็นผลมาจากแรงดึงดูดกับตัววัสดุดูดซับมีจำนวนน้อยจึงเป็นแบบ multilayer

### 2.5.3 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ (ปทุมณา, 2554 และ สรวุฑ, 2550)

สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายชนิดถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งนิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วคำนวณหาค่าต่างๆ สมการที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับมีหลายสมการเพื่อใช้อธิบายสมดุลของการดูดซับ และหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ แต่ที่นิยมใช้ คือ สมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และสมการฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.1 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแนวความคิดที่ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น จำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกจับบนตำแหน่งบริเวณบนตัวดูดซับ (Binding Sites) ก็เพิ่มขึ้น ขีดขวางการจับของโมเลกุลอื่น ดังนั้น อัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่างตำแหน่งที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monomolecular Layer) ซึ่งเออร์วิงแลงเมียร์ เสนอแนวความคิดการเกิดสมดุลดูดซับในลักษณะเลียนแบบการเกิดสมดุลปฏิกิริยาเคมีที่มีสารตั้งต้นสองชนิด โดยมีสมมติฐาน คือ

- (1) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) ไม่เกิดการซ้อนทับซึ่งกันและกัน ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน
- (2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น
- (3) เมื่อดูดซับแล้วตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส

(4) พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จากการศึกษาสมการการดูดซับของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.2)

$$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- $q_e$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
  - $Q_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับเมื่อเกิดการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (mg/g)
  - $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหลังการดูดซับ (mg/L)
  - $K_L$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ (L/mg)

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

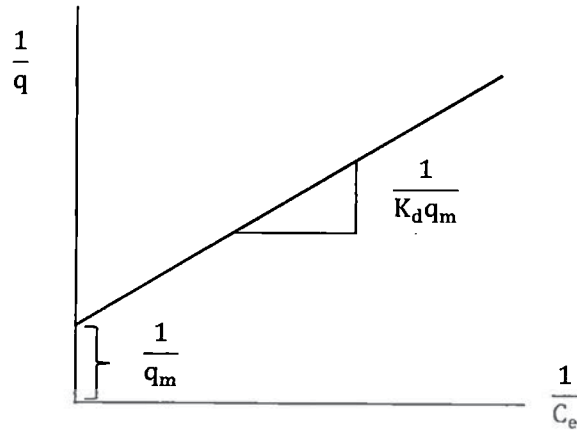
$$\frac{C_e}{q_e} = \left( \frac{C_e}{Q_m} \right) + \left( \frac{1}{K_L Q_m} \right) \quad (2.3)$$

หรือ

$$\frac{1}{q_e} = \left( \frac{1}{K_L Q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \left( \frac{1}{Q_m} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{C_e}$  กับ  $\frac{1}{q_e}$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{K_L Q_m}$  และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{Q_m}$  ดังรูป 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (อุสาร์ตัน, 2547)

2.5.3.2 ฟรอนดลิชไอโซเทอร์ม

ฟรอนดลิชไอโซเทอร์มเป็นไอโซเทอร์มที่ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough Surface) โดยแต่ละพื้นที่ผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นที่ผิวที่มีการให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของฟรอนดลิชไอโซเทอร์ม คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีความดันสูงๆได้ไม่ดี ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิชมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกรณีที่มีการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว โดยมีสมการ (2.5) ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \tag{2.5}$$

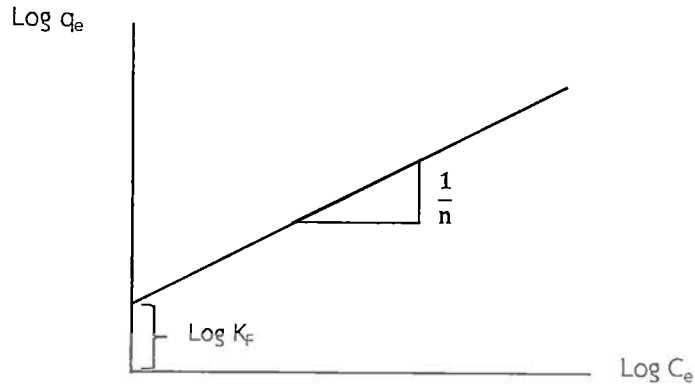
- เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)
- $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหลังการดูดซับ (mg/L)
- $n$  = ค่าคงที่ ที่แสดงถึงความเข้มข้นของการดูดซับ
- $K_F$  = ค่าคงที่ ที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (L/g)

จากสมการที่ (2.5) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง  $K_F$  และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป  $n$  จะมีค่ามากกว่า 1 เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยการใส่ค่าลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ ดังนี้

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \tag{2.6}$$

เขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K$  ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม (อสารัตน์, 2547)

หาก  $1/n = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

$1/n < 1$  บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น  $C_e$  หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณที่จำกัดในการดูดซับ

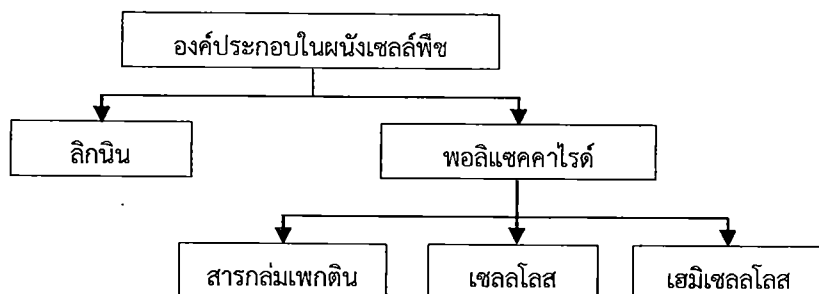
$1/n > 1$  บอกลักษณะความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

บางกรณีที่กราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรง แสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการฟรอนด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของตัวดูดซับ แต่จากสารที่ถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้ตัวดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลงสำหรับความสอดคล้องของไอโซเทอร์มกับข้อมูลจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination :  $R^2$ ) ของทั้งสองแบบจำลอง โดย  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ลักษณะของฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์มจะสังเกตได้ว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ เท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น จึงเป็นข้อเสียของสมการของฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์มที่สำคัญข้อหนึ่งนั่นคือ ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้ (อสารัตน์, 2547)

## 2.6 วัสดุดูดซับที่นำมาใช้ในการศึกษา

### 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ (หฤทัย, 2547)

องค์ประกอบของผนังเซลล์พืชมีแบ่งกลุ่มได้ 3 กลุ่ม ดังรูป

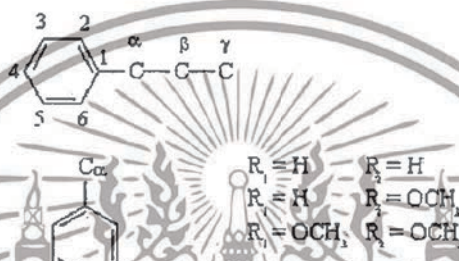


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 2.10 องค์ประกอบในผนังเซลล์พืช (หลุทัย, 2547)

องค์ประกอบของผนังเซลล์พืชมีรายละเอียดดังนี้

1) ลิกนิน (Lignin) พบมากในผนังเซลล์พืช โดยมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้เซลล์ลุสถูกย่อยสลาย อีกทั้งยังเป็นสารพวกอะโรมาติกที่ประกอบไปด้วยหมู่เมทอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล และหน่วยฟีนิล โพรเพนที่อาจเชื่อมกันที่ตำแหน่งแอลฟาหรือเบตากับโซ่ข้างของหน่วยอื่นหรือตำแหน่งอื่นหรือที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ของวงแหวนฟีนิล ได้เป็นรูปร่างเส้นตรง หรือวงกลม หรือมีกิ่งก้านสาขาก็ได้ ปกติไม่สามารถบอกได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถที่จะระบุโครงสร้างที่แน่นอนได้อีกทั้งประกอบไปด้วยหน่วยย่อยๆ หลายกลุ่ม โดยลิกนินจะสร้างจากผนังเซลล์ชั้นแรก และมิติเตลลามลลา จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บที่ส่วนอื่นๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับส่วนนั้น

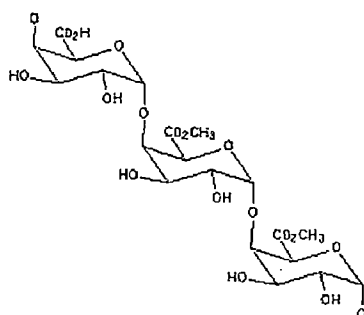


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของลิกนิน (หลุทัย, 2547)

2) สารกลุ่มเพกติน (Pectin) เป็นสารที่มีขี้ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขี้ เช่น น้ำ หรือสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด-ด่าง แต่ไม่ละลายในสารละลายพวกน้ำมันซึ่งไม่มีขี้ เพกตินเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากในผัก และผลไม้ที่กำลั้งเจริญเติบโต โดยเฉพาะกับผนังเซลล์ที่ เรียกว่า ผนังบาง ชั้นกลาง และสะสมเพิ่มขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เพกตินบางส่วนจะเกาะอยู่กับเซลล์ลุส โดยทำหน้าที่เชื่อมเข้าด้วยกัน และควบคุมการซึมผ่านของน้ำ เพกตินเป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถทำให้เจลคงรูปได้ สารประกอบเพกตินจัดเป็นกรดเพกตินิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสารผสมอาหาร เพื่อสร้างให้เกิดเนื้อสัมผัสตามต้องการ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อละลายน้ำจะพองตัวเป็นเจล ทำหน้าที่ได้ทั้งการเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล (Gelling Agent) สารข้น (Thickener) และสารที่ทำให้เกิดความเสถียร (Stabilizer) และเพกตินเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบในช่องว่างระหว่างเซลล์พืช และผนังเซลล์พืชมีหน้าที่ยึดเหนี่ยวพืชเข้าด้วยกัน องค์ประกอบพื้นฐานของสารกลุ่มเพกติน คือ กรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic Acid) ที่เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลกาแลกโทสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา (1-4) สารกลุ่มเพกตินมีหลายชนิด ได้แก่

- โปรเพกติน (Propectin) มีขนาดโมเลกุลใหญ่ที่สุด และพบมากในผลไม้ที่ยังไม่สุก
- กรดเพกตินิกหรือเพกติน (Pectinic Acid หรือ Pectin) คือ โปรเพกตินที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในเนื้อผลไม้ จึงมีโครงสร้างซับซ้อนน้อยกว่า และเป็นลักษณะของเนื้อผลไม้สุก
- กรดเพกติก (Pectic Acid) เป็นอนุพันธ์ของกรดเพกตินิกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเมทานอล และหมู่คาร์บอกซิลของกรดกาแลกทูโรนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

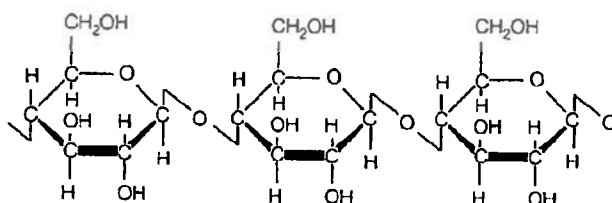


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเพกติน

(<http://www.cybercolloids.net/information/technical-articles/introduction-pectin-structure>, วันที่สืบค้น 20 กรกฎาคม 2557)

3) เซลลูโลส (Cellulose) พบในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง และเป็นสารประกอบที่มีมากที่สุด ในธรรมชาติ เนื่องจากจะพบเซลลูโลสอยู่ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด ในโครงสร้างของเซลลูโลสนั้นประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคสประมาณ 300-2,500 โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1-4) เป็นตัวที่ทำให้กลูโคสที่ต่อกันอยู่ในสายโซ่ของเซลลูโลสเกิดการยึดตัวออกในแนวเส้นตรงได้ และสายของเซลลูโลสหลายๆ สายจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถที่จะแทรกเข้าไปภายในได้ เซลลูโลสจึงไม่เกิดการละลายในน้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายด่างอ่อนได้ แต่เกิดการละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ เพราะโครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะที่เหนียว และแข็งแรง รวมกันเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ สามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะของการละลายในกรดหรือด่างได้ ดังนี้

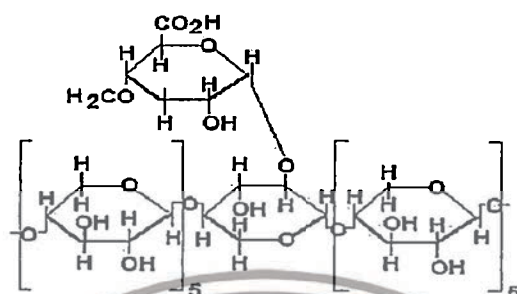
- แอลฟา-เซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5%
- เบตา-เซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5%
- แกมมา-เซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายได้ดีทั้งในโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 17.5% และกรดเจือจาง



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเซลลูโลส (ซีซันท์ และเฉลิม, 2555)

4) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบด้วยเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายโซ่หลัก และโซ่ข้าง ในสายโซ่หลักประกอบไปด้วยน้ำตาลไซโลสที่ต่อกันด้วย  $\beta$  (1-4) และสายโซ่ข้างเป็นสายโซ่ของกลูแคน แมนแนน หรือกาแลกโตส ขนาดความยาวโมเลกุลในเฮมิเซลลูโลสมีประมาณ 30-50 หน่วย แต่จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าเซลลูโลส นอกจากนั้นเฮมิเซลลูโลสจะละลายได้ดีในน้ำ แต่เมื่อมีสายโซ่ข้างในปริมาณมากๆ จะช่วยให้เกิดการละลายได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (ชัชพันธ์ และเฉลิม, 2555)

## 2.6.2 เปลือกส้ม

ส้มเขียวหวานเป็นส้มพันธุ์หนึ่งที่มีการปลูกในทกภาคของประเทศไทย ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้น 239,336 ไร่ โดยเฉพาะภาคเหนือ พื้นที่ที่มีการปลูกส้มเขียวหวานมากที่สุด คือ จังหวัดเชียงใหม่ มีพื้นที่เพาะปลูกทั้งสิ้น 72,352 ไร่ รองลงมาคือ กำแพงเพชร สุโขทัย และเชียงราย (สำนักงานพาณิชย์จังหวัดเชียงใหม่, 2553) ผลการรายงานปริมาณของเศษเหลือทิ้งจากผลไม้ตระกูลส้มคิดเป็นร้อยละ 50 ของผลไม้ทั้งหมด โดยส่วนมากมักถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ย หรืออาหารสัตว์ เนื่องจากส้มมีเส้นใยอาหารสูง แต่การนำไปใช้ประโยชน์ดังกล่าวมีมูลค่าต่ำ เศษเหลือทิ้งของส้มนั้นอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสำคัญ หลายชนิด เช่น กรดแอสคอร์บิก ฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลิก และเพกติน เป็นต้น (กุหลาบ และคณะ, 2555) เปลือกส้มจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ ดังนั้น จึงได้เลือกนำเปลือกส้มบางชนิดหรือส้มรังสิตที่พัฒนาสายพันธุ์มาจากส้มจินมาทดลองในงานวิจัยในครั้งนี้

### 2.6.2.1 ลักษณะโครงสร้างของเปลือกส้ม

ส้มเป็นไม้ผลเศรษฐกิจระดับแนวหน้าในบรรดาผลไม้ด้วยกันอีกหลายชนิด อีกทั้งยังเป็นผลไม้มงคลที่นิยมนำไปใช้ในพิธีการต่างๆ ส้มมีคุณค่าทางอาหารสูงมากเหมาะแก่การนำไปแปรรูป ส้มเขียวหวานมีชื่อสามัญว่า MANDARIN หรือ TANGERINE ชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus reticulata*, Blanco หรือ *C.nobillis* Andrewas (non Lour) อยู่ในวงศ์ Rutaceae ทรงต้นสูงประมาณ 2-8 เมตร ทรงพุ่มมีลักษณะแน่นทึบ จัดเป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก ส้มที่ใช้ในการทดลองจัดอยู่ในกลุ่ม คอมมอน แมนดาริน (Common Mandarin; *C. reticulata*, Blanco) ได้แก่ พวกส้มเขียวหวาน บางชนิดหรือส้มรังสิตที่พัฒนาสายพันธุ์มาจากส้มจิน (*C. 21eticulate*) (อภิชาติ, 2545 และ เปรมปรี, 2544) ผลส้มจัดเป็นพวกเบอร์รี่ มีชื่อเรียกว่า hesperidium เจริญจากรังไข่โดยตรงมีราว 10 พู เชื่อมต่อกันเป็นวงกลมล้อมรอบแกนที่เรียกว่า central axis ผลมีขนาดแตกต่างกันรูปร่างกลมแบน ผิวเปลือกสีเขียวอมเหลืองจนถึงสีแดงอมส้ม ผิวเปลือกเรียบ มีต่อมน้ำมันอยู่ภายใน ส่วนเปลือกบางหนาประมาณ 0.2–0.3 เซนติเมตร มีกลิ่นหอมแรง เปลือกด้านในมีสีเหลืองอ่อน (พาวิณ, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



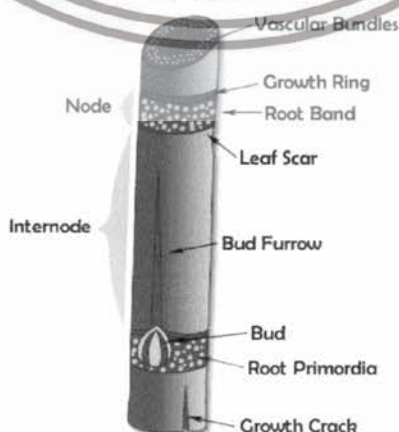
เหลียงหรืออ้อยสิงคโปร์ จะปลูกกันในจังหวัดอ่างทอง พระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี และนครปฐม เป็นต้น หากมีการคั้นหรือหีบเอาน้ำอ้อยออกจากส่วนของลำต้นอ้อยแล้วจะ เรียกว่า ชานอ้อย หรือ แม้แต่ผลพลอยได้ (By-products) ที่เกิดขึ้นหลังจากการผลิตน้ำตาลทราย ได้แก่ ชานอ้อย กากตะกอน (filter mud, filter cake) และกากน้ำตาล (molasses) ซึ่งผลพลอยได้ต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง

ประเทศไทยมีโรงงานผลิตน้ำตาลจำนวน 192 โรงงาน พบว่ามีปริมาณชานอ้อยสูงถึง 20 ล้านตันต่อปี ซึ่งปริมาณชานอ้อยที่เกิดขึ้นในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ขึ้นมากมาย อาทิ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานที่จำเป็นสำหรับผลิตน้ำตาล อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ทำอิฐทนไฟ หรือนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน (น.ม.ส., 2550) ดังนั้น ชานอ้อยจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจ และได้เลือกนำชานอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 เป็นพันธุ์อ้อยที่ผลิตน้ำอ้อยคั้นบรรจุขวดพร้อมดื่มมาจากทางจังหวัดปราจีนบุรี เพื่อมาทดลองในงานวิจัยในครั้งนี้

### 2.6.3.1 ลักษณะโครงสร้างของชานอ้อย

อ้อย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum esculentum* Maench อยู่ในตระกูล Gramineae มีระบบราก เป็นระบบรากฝอย แผ่กระจายออกโดยรอบลำต้น เป็นไม้ล้มลุก สูง 2-5 เมตร มีลักษณะเป็นปล้องสั้นๆ สีของลำต้นมีหลายสีขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม เช่น สีเหลือง สีม่วงแดง หรือสีเขียว เป็นต้น ใบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาบใบ และแผ่นใบทั้งสองส่วนต่อเชื่อมกัน โดยทั่วไปใบจะเกิดสลับคั่นที่ ข้อและหุ้มตาเอาไว้ตรงรอยต่อระหว่างกาบใบกับแผ่นใบยังมีคอลลาจ (Collage) ปกป้องไม่ให้ใบอีกข้างใดขูดข่วน มีเยื่อใบ (Auricle) ที่ห่อหุ้มกาบใบตอนบน และลิ้นใบ (Ligule) อยู่ด้านบนของรอยต่อคอก มีลักษณะเป็นข้อแบบพานเคลหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า แอโรว์หรือทาสเวล (Arrow or tassel) ยาว 1-2 ซม. เมื่อดอกบานจะเห็นเป็นลักษณะคล้ายเส้นไหมสีขาวทั้งข้อมีทั้งดอกตัวผู้ และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ส่วนผล และเมล็ดของอ้อยเป็นชนิดคาร์รีออปซิส (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

ชานอ้อย (Sugar cane Bagasse) หมายถึง ส่วนเส้นใยของลำต้นอ้อยที่ได้หลังจากที่นำไปผ่านกระบวนการบดสกัดน้ำออกแล้วโดยเส้นใยอ้อยจะมีลักษณะคล้ายกับเส้นใยของฝ้าย และขนสัตว์ คือ มีลักษณะโครงสร้างขดเป็นวง มีความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 1.0-4.0 มิลลิเมตร และกว้าง 0.010-0.040 มิลลิเมตร ลักษณะของเส้นใยขึ้นอยู่กับชนิดของชานอ้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของชานอ้อย (Glyn James, 2004)** ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชานอ้อยมีหลายสี แต่โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนๆ จนถึงสีเขียวอ่อน มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีรูปแบบไม่แน่นอน ขึ้นกับการบด ชานอ้อยจะประกอบด้วย 2 ส่วน ที่แยกกันอย่างเห็นได้ชัด คือ ส่วนแรกที่เป็นผนังหนาจะค่อนข้างยาวซึ่งเป็นส่วนของเส้นใยที่จากเปลือกนอก และมัดของท่อลำเลียงที่กระจายอยู่ในลำต้น ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่ได้จากเซลล์ที่มีผนังบางของพวกพาราเนไคมา (Parenchyma) ของลำต้นที่ทำหน้าที่เก็บสะสมน้ำตาลอ้อย ส่วนประกอบทั้งหมดของชานอ้อยในส่วนของเส้นใย และแกนกลาง (นิมิตร และประพนธ์, 2545)

### 2.6.3.2 ประโยชน์ของชานอ้อย

ชานอ้อยก็เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการผลิตน้ำตาล โดยในปีหนึ่งๆ เส้นใยของชานอ้อยจากแหล่งโรงงานใหญ่ๆ จะมีการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์หรือไม้อัด การผลิตพลาสติก ใช้เป็นอาหารสัตว์ ตลอดจนใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเตาในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารเสริมแรง และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งในบางประเทศมีการนำชานอ้อยไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

### 2.6.3.3 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย

ในชานอ้อยมีองค์ประกอบทั่วไป คือ ความชื้น 49 % และส่วนอื่นๆ โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลหรือของแข็งที่ละลายได้ ส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใย (Fiber) หรือของแข็งที่ละลายไม่ได้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย เซลลูโลส 46 % เฮมิเซลลูโลส 24.5 % ลิกนิน 19.95 % เถ้า (Ash) 2.4 % ไขมัน (Fat & Waxes) 3.5 % และ อื่นๆ 1.7 % (Pehlivan *et al.*, 2013) องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยเซลลูโลสในชานอ้อยเป็นโพลีเมอร์ประเภท D-กลูโคสพอลิเมอร์ ส่วนเฮมิเซลลูโลสเป็น D-ไซเลน และลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ จะเห็นได้ว่าชานอ้อยเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส จึงมีองค์ประกอบของกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนจำนวนมาก เมื่อนำไปดูดซับสารในรูปของสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับสารละลายทำให้คุณสมบัติในการดูดซับดี รวมทั้งโครงสร้างของเซลล์พืชที่มีลักษณะเป็นรูพรุนที่เกิดจากท่อลำเลียงต่างๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น

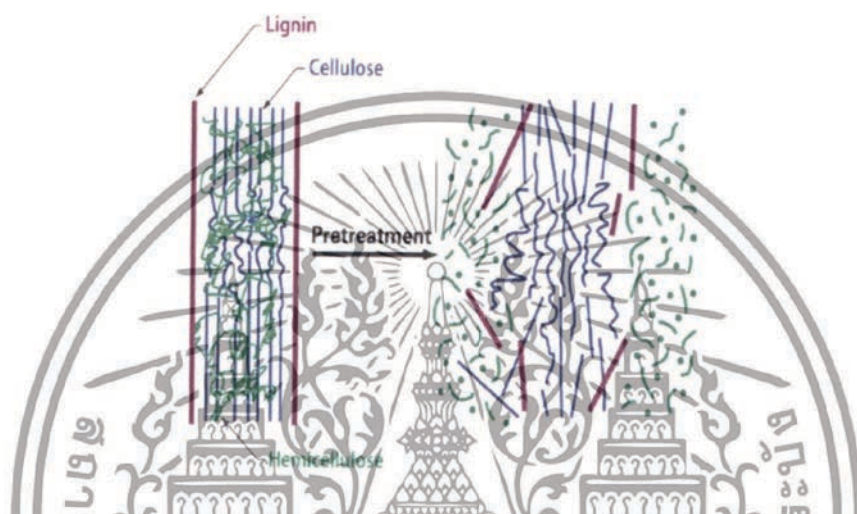
## 2.7 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ (Treating Process)

วัชร และเจนจิรา (2556) อธิบายถึงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ว่าเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีมาช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ หรือการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ออกไป เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ และได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ส่วน สุรินทร์ (2549) ได้อธิบายถึงการปรับปรุงคุณภาพว่า การปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับ เป็นการกระตุ้นหรือเป็นขั้นตอนที่ทำให้วัสดุมีความพรุน และมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น และประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ รวมทั้งวิธีการอื่นๆ ก่อนทำการปรับปรุงคุณภาพ

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า การปรับปรุงคุณภาพวัสดุเพื่อใช้ในการดูดซับนั้น เป็นการทำให้วัสดุดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว เกิดความไวขึ้นในการเกิดปฏิกิริยากับสารที่ต้องการดูดซับ คือ เมื่อทำการปรับปรุงด้วยสารเคมี สารเคมีจะไปกำจัดโมเลกุลบางกลุ่ม หรือกำจัดอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่มีในวัสดุดูดซับให้หลุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไป และเข้าไปเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ หรืออาจจะเข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุให้มีความไวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งในวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับนั้นแต่ละชนิดมีคุณลักษณะที่ต่างกันไป เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว ผักตบชวา ชังข้าวโพด เปลือกส้ม จะประกอบไปด้วยพอลิแซคคาไรด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างโมเลกุล โดยสามารถนำวัสดุต่างๆ ดังที่กล่าวมาทำการปรับปรุงคุณภาพในช่วงที่ปรับปรุงคุณภาพจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีต่างๆ ขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน และปฏิกิริยารอสลิงก์ เป็นต้น หลังจากที่วัสดุได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีต่างๆ แล้วจะทำให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการดูดซับประจุโลหะ หรือเกิดการแลกเปลี่ยนประจุขึ้น



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงภายในองค์ประกอบของวัสดุดูดซับหลังปรับปรุงคุณภาพ (Zhang and Shahbazi, 2011)

การปรับปรุงคุณภาพมี 2 วิธี คือ การปรับปรุงด้วยวิธีทางกายภาพ และการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมี (สุนิรัตน์, 2549) มีรายละเอียดดังนี้

1. การปรับปรุงด้วยวิธีทางกายภาพ วิธีนี้จะใช้ก๊าซเป็นตัวออกซิไดส์ เช่น ไอน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะนำไปทำวัชออกซิไดส์วัสดุ โดยก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดส์จะทำปฏิกิริยากับสารในวัสดุ จึงทำให้วัสดุมีรูพรุนกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ข้อดีของการปรับปรุงด้วยวิธีทางกายภาพ คือ หลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุแล้วสามารถที่จะนำไปใช้ได้ทันที แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องใช้ต้นทุนที่สูงกว่าการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมี และขนาดรูพรุนของวัสดุที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีนี้ คือ จะมีรูพรุนที่ขนาดเล็กกว่าการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมี โดยรูพรุนที่ได้เป็นแบบไมโครพอร์ ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการดูดกลืน ไอ หรือก๊าซพิษ

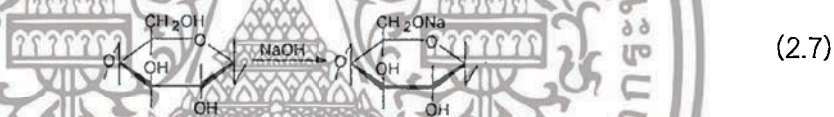
2. การปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมี วิธีนี้จะนำวัสดุที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพมาผสมกับสารเคมีที่เรียกว่า สารกระตุ้น (Activating Agent) ซึ่งสารกระตุ้นส่วนใหญ่จะเป็นเกลืออนินทรีย์ ยกตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

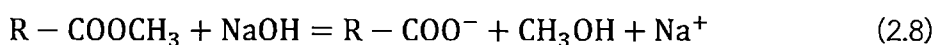
|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| กรดบอริก ( $H_3BO_3$ )                | โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)     |
| กรดไนตริก ( $HNO_3$ )                 | โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) |
| กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )            | เฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ )   |
| แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ )          | โพแทสเซียมซัลไฟต์ ( $K_2S$ ) |
| โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)                 | โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)   |
| โพแทสเซียมไฮโอซายาเนต ( $K_2S_2O_3$ ) | ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ )    |

การปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีมีข้อดี คือ ใช้อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสีย คือ สารเคมีบางชนิดราคาแพง และจะต้องล้างสารเคมีออกจากวัสดุที่ทำการปรับปรุงไม่ให้เหลือตกค้างเพื่อความปลอดภัยก่อนนำไปใช้งาน จึงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และการปรับปรุงคุณภาพวัสดุเพื่อใช้ในการดูดซับแต่ละชนิดนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการปรับสภาพ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ และสภาวะในการดูดซับโลหะ เช่น ชนิดของโลหะ ความเข้มข้นของโลหะ ระยะเวลา ค่า pH และอุณหภูมิ ในการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประโยชน์ และมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง

ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพเปลือกส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีโครงสร้างดังแสดงในสมการ (2.7)

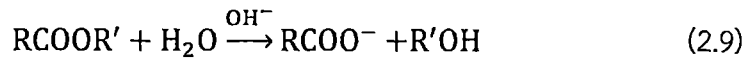


ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้วัสดุมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการเข้าไปกำจัดโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งในวัสดุดูดซับจะมีกลุ่มคาร์บอกซิล ( $-COOH$ ) ที่จะเป็นตัวช่วยจับกับไอออนของโลหะให้มีปริมาณน้อยลง นั้นหมายความว่า เมื่อจำนวนลิแกนด์ของคาร์บอกซิเลทในวัสดุมีมากความสามารถที่จะเข้าไปยึดจับโลหะก็จะมีมากขึ้น เนื่องจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกติน และลิกนิน เหล่านี้เป็นองค์ประกอบในวัสดุดูดซับที่ประกอบไปด้วยเมทิวเอสเทอร์ จับกับไอออนโลหะสำคัญๆไม่ได้ ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจับโลหะของวัสดุดูดซับ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเมทิวเอสเทอร์ดังแสดงในสมการ (2.8)

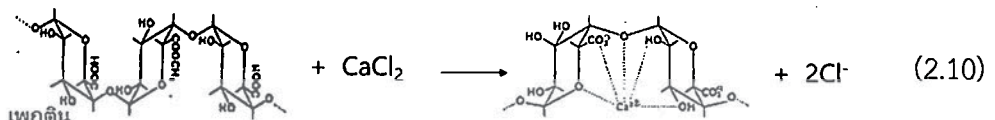


และการปรับปรุงคุณภาพกากขานอ้อยด้วยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ) โดยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำให้เฮมิเซลลูโลสเกิดการขยายตัว จึงทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และเข้าไปช่วยลดปริมาณผลึกสารโพลิเมอร์ที่อยู่ภายใน จะทำให้โครงสร้างภายในเชื่อมประสานกันระหว่างลิกนิน คาร์โบไฮเดรต และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นริเอเจนที่ดีสำหรับเปลี่ยนแปลงกลุ่มเอสเทอร์ของคาร์บอกซิเลท และแอลกอฮอล์ (Wan Ngah *et,al*, 2008) มีโครงสร้างดังแสดงในสมการ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ส่วนการปรับปรุงคุณภาพเปลือกส้มด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) มีโครงสร้างดังแสดงในสมการ (2.10)



แคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวช่วยให้พอลิแซคคาไรด์เกิดการตกตะกอน จะประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซิล เช่น เพกติน หรือ แอลจีเนต สามารถกำจัดได้จากสารละลาย และในรูปแบบ “Egg-box Model” การเติมแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ลงไปจะช่วยให้กรดเพกตินในวัสดุดูดซับตกตะกอน และทำให้ความสามารถในการละลายเพกตินในสารละลายลดลง

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคลอไรด์ จะช่วยให้ลิแกนด์ของคาร์บอกซิเลตเพิ่มจำนวนขึ้นทำให้วัสดุดูดซับมีความสามารถในการยึดจับมากขึ้น

## 2.8 กระบวนการคายซับ (Desorption) (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

กระบวนการคายซับ (Desorption) เป็นการหลุดออกของตัวดูดซับ (Adsorbate) จากผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ถือเป็น การฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับ (Regeneration) ที่เริ่มหมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แทนที่จะนำสารดูดซับไปทิ้งโดยไม่ใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับอาจมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี วิธีความร้อน และวิธีเฝ้า เป็นต้น

การทำให้ตัวดูดซับชีวภาพที่ใช้แล้วคืนกลับมาใช้ใหม่เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดค่าใช้จ่ายของกระบวนการดูดซับโลหะหนักได้มีวิธีการ คือ ต้องปลดปล่อยโลหะหนักที่ดูดซับออกจากตัวดูดซับ และนำตัวดูดซับชีวภาพนั้นไปใช้ในกระบวนการดูดซับโลหะหนักต่อไป การสกัดโลหะหนักออกจากสารละลายในรูปที่เข้มข้น ตัวดูดซับชีวภาพที่นำกลับมาใช้ใหม่จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักใกล้เคียงกับตัวดูดซับชีวภาพเดิม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือทำลายมวลชีวภาพของตัวดูดซับ สารเคมีที่ใช้ในการนำโลหะหนักกลับคืนที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ซึ่งถูกใช้ในการดึงโลหะหนักออกจากสารดูดซับชีวภาพ หรือใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดมะนาว (Citric Acid) กรดน้ำส้ม (Acetic Acid) กรดแลคติก และใช้สารเชิงซ้อน เช่น EDTA Thiosulfate เป็นต้น

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Feng และ Guo (2012) ทำการศึกษาลักษณะวัสดุดูดซับพร้อมกับความสามารถในการดูดซับ และกลไกการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ทองแดง และสังกะสีที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยเปลือกส้มที่ทำการปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) พบว่าทองแดงดูดซับได้ดีที่ pH 5 ส่วนตะกั่ว และสังกะสีดูดซับได้ดีที่ pH 6 อย่างไรก็ตามผลของการปรับปรุงเปลือกส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของเปลือกส้มที่ใช้ในการดอง ยิ่งใช้เปลือกส้มมากขึ้นยิ่งได้ผลดี อย่างไรก็ตามการดองเปลือกส้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์นั้นต้องระวังเรื่องความเป็นพิษของเปลือกส้มที่ดองไว้ก่อนนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ระยะเวลา 120 นาที จากนั้นทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของวัสดุดูดซับของวัสดุที่ทำ การปรับปรุง และไม่ได้ปรับปรุงด้วยด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  ด้วยเครื่อง SEM, FT-IR, BET  $\text{N}_2$ -adsorption, XRD และ XRFs การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแดง ตะกั่ว และสังกะสี เป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม เนื่องจากเปลือกส้มที่ทำการปรับปรุงสามารถดูดซับของแดง ตะกั่ว และสังกะสี ได้อยู่ที่ 70.73, 209.8 และ 56.18 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการทดสอบ การดูดซับแบบคอลัมน์สามารถแยกตะกั่ว และสังกะสีออกได้ อาจจะเนื่องมาจากวัสดุมีความจำเพาะ สูง และกลไกการดูดซับเป็นไปตามหลักการการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในสารละลายของ โลหะทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และแคลเซียม หรืออาจมีการเชื่อมโยงไปยังกลุ่มคาร์บอกซิลิก ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของเพกติน

**อรทัย และคณะ (2556)** ทำการศึกษาการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ชานอ้อย และชานอ้อยที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำการศึกษาในรูปการทดลองแบบกะ ปัจจัยการดูดซับที่ทำการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อย และชานอ้อยที่ปรับสภาพ คือ pH 6 ระยะเวลาในสัมผัส 120 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะดังกล่าวประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน ของชานอ้อย และชานอ้อยที่ปรับสภาพอยู่ที่ ร้อยละ 72.03 และร้อยละ 79.55 ตามลำดับ สมการ ไอโซเทอร์มที่อธิบายกลไกการดูดซับของน้ำมันเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม เป็นกลไกการดูดซับ แบบชั้นเดียวมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ ชานอ้อย และชานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 2.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อศึกษาการคายซับ พบว่า ประสิทธิภาพการคายซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.80 และร้อยละ 99.90 ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวได้ว่า ชานอ้อย และชานอ้อยที่ปรับสภาพเป็นตัวดูดซับที่มี ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน

**อรพิน (2554)** ศึกษาวิจัยเรื่องการบำบัดสังกะสี และทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะ โดยใช้กากขา ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสี และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสี และทองแดง มีค่า pH เท่ากับ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยมีค่า การบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 61.42 และร้อยละ 57.09 ตามลำดับ ระยะเวลาการบั่นทอนที่ระบบจะเข้าสู่ สภาวะสมดุลอยู่ที่ 120 นาที มีค่าการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 62.86 และร้อยละ 63.76 ตามลำดับ ระยะเวลาในการสัมผัสอยู่ที่ 120 และ 60 นาที มีค่าการบำบัดอยู่ที่ร้อยละ 67.73 และร้อยละ 64.06 ตามลำดับ ปริมาณกากขาที่ใช้คือ 6 กรัม มีค่าร้อยละการบำบัดอยู่ที่ 90.27 และ 94.89 ตามลำดับ สรุปได้ว่าปริมาณกากขาเพิ่มมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และหากความเข้มข้นสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เมื่อนำผลการทดลองไปคำนวณสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า สอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช เมื่อนำกากขาไปทดลองใช้ในการบำบัดโลหะหนัก ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า กากขาสามารถบำบัดไอออนของสังกะสี และทองแดง ออกจากน้ำทิ้งดังกล่าวได้ และยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้งให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำ ทิ้งผิวดินด้วย

**Feng et al. (2009)** ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยา และเทอร์โมไดนามิกส์ ของการดูดซับของแดง โดยใช้เปลือกส้มที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียม คลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเข้มข้น เริ่มต้น และ pH ผลการทดลองการดูดซับของแดงโดยใช้เปลือกส้มที่ปรับปรุงแล้วพบว่ามี การคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนภายใต้สภาวะที่ได้ศึกษา ความสัมพันธ์ของสมการเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม เปลือกส้มสามารถทำการดูดซับทองแดงได้สูงสุดที่ 72.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการแลกเปลี่ยนปฏิกิริยา สอดคล้องกับ pseudo - second order ที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับทองแดงเริ่มลดลง ตัวดูดซับที่ใช้แล้วมีการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง โดยล้างกับกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นนำมาทดสอบดูดซับอีกสามารถดูดซับได้อีกถึง 5 ครั้ง และพบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับเริ่มลดลง

Leandro และ Laurent (2009) ได้ทำการศึกษาดูดซับน้ำเสียทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ด้วยเซลลูโลส และชานอ้อยที่ทำการปรับปรุงด้วย EDTA dianhydride การวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของวัสดุดูดซับก่อนและหลังปรับปรุง ศึกษา pH ระยะเวลาในการดูดซับโลหะที่เหมาะสม วัสดุดูดซับปรับปรุงด้วย EDTA dianhydride ก่อนทำการปรับปรุงได้นำชานอ้อยไปแช่ด้วย NaOH เพื่อให้สารลิกนินที่มีอยู่ในชานอ้อยย่อยสลายไป และนำไปวิเคราะห์ดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับชานอ้อย และพบว่าไฮดรอกซิลเข้าไปเกาะมากขึ้น หลังทำการปรับปรุงด้วย EDTA dianhydride ได้นำเซลลูโลส และชานอ้อยไปทดสอบการดูดซับน้ำเสียทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 20 นาที วัสดุเซลลูโลส และชานอ้อยที่ปรับปรุงมีค่าการดูดซับโลหะหนักทองแดงอยู่ 123.5 และ 153.9 มิลลิกรัมต่อกรัม แคดเมียม 164.0 และ 153.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตะกั่ว 294.1 และ 500.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับในช่วง pH 5 pH 8 และ pH 5 ตามลำดับ จากค่าความสัมพันธ์ของสมการเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม สรุปได้ว่าวัสดุชานอ้อยที่ทำการแช่ NaOH แต่ปรับปรุงด้วย EDTA dianhydride มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียทองแดง แคดเมียม และตะกั่วดีที่สุด มีค่าอยู่ที่ 92.6 149.0 333.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีจะต้องมีค่า pH เป็นกรดมากที่สุด

Li et al. (2009) ทำการศึกษาดูดซับโลหะแคดเมียม สังกะสี นิกเกิล และโคบอลต์ ด้วยเซลลูโลสเปลือกส้ม โดยทำการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH,  $\text{NH}_4\text{OH}$  และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จากนั้นปรับสภาพด้วย  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , และ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  เมื่อทำการดูดซับโดยใช้ปริมาณการดูดซับที่ 0.025 กรัม ใช้เวลา 3 ชั่วโมง ทำการปรับพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วงพีเอช 6 พบว่า สามารถดูดซับโลหะแคดเมียม สังกะสี นิกเกิล และโคบอลต์ ได้ 130%, 60%, 95% และ 178% ตามลำดับ เมื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่า การดูดซับเป็นทั้งแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิช ไอโซเทอร์ม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีค่ามากกว่า 0.95 เมื่อนำไปทำการคายซับด้วยกรดไฮโดรคลอริก (0.05 mol/L) สามารถทำการคายซับโลหะแคดเมียม สังกะสี นิกเกิล และโคบอลต์ ได้ถึง 93.72%, 87.23%, 80.11% และ 81.06% ตามลำดับ

วิลาสินี (2548) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การใช้ประโยชน์จากชานอ้อยและเถ้าชานอ้อย เพื่อใช้เป็นวัสดุตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ขนาดของชานอ้อยที่เลือกใช้ คือ ขนาด 180-250 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 9.76 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนอยู่ที่ 0.04 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 17.17 นาโนเมตร และขนาดของเถ้าที่เลือกใช้ คือ ขนาด 180-250 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 3.35 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนอยู่ที่ 0.04 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 47.34 นาโนเมตร จากนั้นได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก (โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว) โดยทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียสังเคราะห์แบบแยกชนิดและแบบรวม ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ เวลาสัมผัส (5 - 90 นาที) ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (5, 7.5 และ 10 กรัมต่อลิตร) พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์แบบแยกชนิดดูดซับชานอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ใช้เวลาสัมผัส 60 นาทีเท่ากันหมด ปริมาณขานอ้อยที่ใช้ 10, 10 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ น้ำเสียสังเคราะห์แบบแยกชนิดดูดซับแก่ขานอ้อย โครเมียม แคดเมียม และ ตะกั่ว ใช้เวลาสัมผัส 75, 60 และ 20 นาที ตามลำดับ ปริมาณขานอ้อยที่ใช้ 10, 10 และ 5 กรัมต่อ ลิตร ตามลำดับ น้ำเสียสังเคราะห์แบบรวมดูดซับแก่ขานอ้อย โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ใช้เวลา สัมผัส 75 นาทีเท่ากันหมด ปริมาณขานอ้อยที่ใช้ 7.5 กรัมต่อลิตร น้ำเสียสังเคราะห์แบบรวมดูดซับ ขานอ้อย ใช้เวลาสัมผัส 60 นาที ปริมาณขานอ้อยที่ใช้ 10 กรัมต่อลิตร ขานอ้อยสามารถกำจัดโลหะ หนักในน้ำเสียสังเคราะห์แบบแยกชนิดได้ ดังนี้ 29.14 %, 88.62 % และ 95.18 % สำหรับโครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ และแบบรวมสามารถกำจัดโครเมียม แคดเมียม และตะกั่วได้เท่ากับ 11.98 %, 78.55 % และ 94.77 % ตามลำดับ ส่วนแก่ขานอ้อยสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สังเคราะห์แบบแยกชนิดได้ ดังนี้ 9.63 %, 97.21 % และ 99.30 % สำหรับโครเมียม แคดเมียม และ ตะกั่ว ตามลำดับ และแบบรวมสามารถกำจัดโครเมียม แคดเมียม และตะกั่วได้ 9.04 %, 98.20 % และ 81.10 % ตามลำดับ

ธิติมา และมนตรี (2544) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การดูดซับโครเมียมในน้ำเสียด้วยขานอ้อยที่ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาถึงการนำขานอ้อยมาเผาให้เป็นถ่านกัมมันต์ แล้วนำมาใช้ ดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรก ศึกษาถึงอุณหภูมิและเวลาในการเผาขานอ้อย พบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที มี ค่าคาร์บอนคงตัวที่ร้อยละ 36.83 ซึ่งสูงกว่าค่าอื่นๆ ขั้นตอนที่ 2 ได้นำขานอ้อยที่เผาแล้วมากระตุ้น ด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่ปริมาณ 30 กรัม อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และนำไป วิเคราะห์ได้ค่าการดูดซับอยู่ที่ 933.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนที่ 3 ได้นำขานอ้อยที่ทำการกระตุ้น แล้วมาดูดซับโครเมียมที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าที่ pH 2 มีปริมาณ โครเมียมเหลือในน้ำที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 11.49 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น ร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 71.28

รัตนา (2542) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการศึกษาวัสดุธรรมชาติเพื่อดูดซับโลหะหนักที่มีพิษในน้ำ เสีย ซึ่งโลหะหนักที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) โดยนำไปทดลองดูดซับด้วยวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ เผา ถ่าน ถ่านกัมมันต์ ชี้ถั่ว คาโอลิน เบนโทไนต์ กาบมะพร้าว รั้งไหม เยื่อไม้ไผ่ และใยข้าวโพด ด้วย วิธีการต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง ซึ่งวิธีการแบบต่อเนื่องจะปล่อยให้น้ำเสียโลหะหนักไหลผ่านวัสดุดูดซับ ในอัตรา 0.1-1 มิลลิตรต่อนาที แล้วเก็บสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ ส่วนวิธีการแบบไม่ต่อเนื่องจะ เติมน้ำเสียโลหะหนักลงในในวัสดุดูดซับจนให้ซ้กันและตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 8 วัน จากนั้นนำ สารละลายที่ได้ไปกรอง จากการทำการศึกษพบว่าโลหะตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับได้มาก ที่สุด คิดเป็นช่วงร้อยละ (กรัมต่อกรัม) 30-70 ส่วนทองแดง แคดเมียม สังกะสี อยู่ในช่วงร้อยละ 2-10 และนิกเกิล โครเมียม แมงกานีส อยู่ในช่วงร้อยละ 1 เมื่อนำวัสดุธรรมชาติทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ การดูดซับโลหะหนัก โดยเรียงลำดับการดูดซับจากน้อยไปมาก ดังนี้ ชี้ถั่ว ถ่านกัมมันต์ เบนโทไนต์ ถ่าน แกลบเผา เยื่อไม้ไผ่ กาบมะพร้าว ใยข้าวโพด และรั้งไหม เมื่อศึกษาวิธีการกำจัดโลหะหนัก ทั้งหมดนำมาผสมกัน พบว่าวิธีการแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าวิธีการ แบบไม่ต่อเนื่อง แต่เมื่อนำวิธีการทั้งสองมาทำร่วมกันพบว่าชี้ถั่วเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดในการ ดูดซับโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200 ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-4700 FE-SEM ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องวัดพื้นที่ผิว และขนาดของรูพรุน ด้วยวิธีบีอีที (BET) N<sub>2</sub>-Adsorption ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1 ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FT-IR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRAffinity-1 ประเทศญี่ปุ่น
5. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry : XRF) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น SRS3400 ประเทศเยอรมนี
6. เครื่องวัด pH ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827 ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องชั่งสารแบบละเอียด ยี่ห้อ Sartorius รุ่น E02245 ประเทศเยอรมนี
8. ชุดเครื่องกรองสูญญากาศ ยี่ห้อ Eylea รุ่น Aspirator A-3s ประเทศญี่ปุ่น
9. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น Isotemp 637G Oven ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Gallenkamp รุ่น Orbital shaker ประเทศอังกฤษ
11. เครื่องเหวี่ยงแยกหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ยี่ห้อ Centurion รุ่น 1000 Series ประเทศอังกฤษ
12. ชุดกรองบูชเนอร์
13. เครื่องแก้วต่างๆ
14. ครก และสากหิน
15. ตะแกรงร่อน ขนาด 35 และ 50 เมช มาตรฐาน ASTM11
16. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และกระดาษกรองใยแก้ว ขนาด 0.45 ไมครอน
17. ขวดพลาสติกพร้อมฝา ขนาด 60 CC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สารเคมี

1. คอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
2. นิกเกิล (II) ซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) Laboratory Reagents & Fine Chemicals บริษัท Loba Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย
4. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
5. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
6. เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
7. กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) Analytical Reagent Grade บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
8. น้ำกลั่น

### 3.1.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ได้แก่ น้ำเสียทองแดง และน้ำเสียนิกเกิล เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร
2. เปลือกส้มเขียวหวานพันธุ์บางมด ได้มาจากร้านขายน้ำโรงอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
3. กากขานอ้อยพันธุ์สุพรรณบุรี 50 ได้มาจากรถขายน้ำอ้อยคันสด

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

#### 3.2.1.1 การเตรียมเปลือกส้ม ปรับปรุงจากงานวิจัยของ Feng และ Guo

1. นำเปลือกส้มมาล้างเพื่อขจัดคราบสกปรก จากนั้นตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำเปลือกส้มที่อบแล้วมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.29 mm. จากนั้นเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์
3. ชั่งเปลือกส้มที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้วมา 10 กรัม นำมาแช่ในสารละลายเอทานอล 50 มิลลิลิตร โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$  0.8 โมลต่อลิตร) 25 มิลลิลิตร และแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$  0.8 โมลต่อลิตร) 25 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำเปลือกส้มที่แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่น
5. นำเปลือกส้มไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.2 การเตรียมกากขานอ้อย และการปรับปรุงด้วยสารเคมี

1. นำกากขานอ้อยมาล้าง ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากแห้งเป็นเวลา 1-2 วัน
2. จากนั้นนำกากขานอ้อยไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น
3. นำกากขานอ้อยมาบดเป็นผง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.29 mm. และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์
4. ชั่งกากขานอ้อยที่ผ่านการคัดแยกขนาดแล้วมา 10 กรัม นำมาแช่ในสารละลายเอทานอล 50 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.5 โมลต่อลิตร) 50 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำกากขานอ้อยที่แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้งจนกระทั่งค่า pH ของน้ำล้างสุดท้ายใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำกลั่น
6. นำกากขานอ้อยไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 - 6 โดยแช่กากขานอ้อยในสารปรับสภาพ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3-1 การปรับสภาพกากขานอ้อย

| Ethanol     | NaOH                | CaCl <sub>2</sub> |                     |             |
|-------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| ปริมาณ (ml) | ความเข้มข้น (mol/L) | ปริมาณ (ml)       | ความเข้มข้น (mol/L) | ปริมาณ (ml) |
| 50          | 0.5                 | 50                | -                   | -           |
| 50          | 0.5                 | 25                | 0.5                 | 25          |
| 50          | 0.8                 | 50                | -                   | -           |
| 50          | 0.8                 | 25                | 0.8                 | 25          |
| 50          | 1.0                 | 50                | -                   | -           |
| 50          | 1.0                 | 25                | 1.0                 | 25          |

### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลจะทำการเตรียมน้ำเสียเริ่มต้นให้มีค่า pH 2 ซึ่งเป็น pH ที่ใกล้เคียงกับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

#### 3.2.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

1. ชั่งคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O) มา 3.9291 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น รักษาสภาพตัวอย่างด้วยการเติมกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) จน pH < 2 และปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะทองแดงความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดงความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

1. ชั่งนิกเกิล (II) ซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) มา 4.4753 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น รักษาสภาพตัวอย่างด้วยการเติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) จน  $\text{pH} < 2$  และปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะนิกเกิลความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีนิกเกิลความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส

### 3.2.3 น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม

ได้ความอนุเคราะห์น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อแยกล้างโลหะทองแดง และบ่อล้างโลหะนิกเกิล ด้วยวิธี Grab Samples ทำการวัดค่า pH ของน้ำ ( $\text{pH} 2$ ) ทำการรักษาสภาพตัวอย่างด้วยการเติมกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) จน  $\text{pH} < 2$  และแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำเสียทองแดง และนิกเกิล ด้วยเครื่อง AAS ก่อนนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.4 การวิเคราะห์ผลของการแปรผันค่าความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากขานอ้อย

1. นำกากขานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยสารเคมีแล้วจากข้อ 3.2.1.2 ปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร (น้ำเสียเดิมมีค่า  $\text{pH} 2$ ) ก่อนเติมน้ำเสียลงไปให้ทำการปรับค่า  $\text{pH}$  ของน้ำเสียจนมีค่าที่  $\text{pH} 6$  ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH} 0.1$  โมลต่อลิตร)
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
4. กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองแดงด้วยเครื่อง AAS
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
6. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-5 โดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงให้เป็นนิกเกิล
7. เปรียบเทียบผลของการแปรผันค่าปรับสภาพของกากขานอ้อย โดยเลือกค่าการปรับสภาพกากขานอ้อยที่ดีที่สุดไปใช้ในการทดลองลำดับต่อไป

### 3.2.5 การศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ โดยใช้เครื่องมือต่างๆ วิเคราะห์วัสดุดูดซับ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย  $\text{NaOH}$  และ  $\text{CaCl}_2$  โดยใช้ความเข้มข้นของสารปรับสภาพที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดูดซับก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>

| พารามิเตอร์                            | เครื่องมือในการวิเคราะห์                        |
|--|---|
| สัณฐานวิทยา                            | Scanning Electron Microscope (SEM)              |
| พิสจันโมเลกุล หรือหมู่ฟังก์ชัน         | Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) |
| พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน | BET N <sub>2</sub> -Adsorption                  |

### 3.2.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

#### 3.2.6.1 ศึกษาอิทธิพลของ pH

1. ชั่งเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ลงไป 25 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl 0.1 โมลต่อลิตร) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 โมลต่อลิตร)
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
4. กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองแดง ด้วยเครื่อง AAS
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
6. ทำ Control เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ
7. ทำ Blank เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนวัสดุเป็นกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ
9. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-8 โดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นนิกเกิล
10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกค่า pH ที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

#### 3.2.6.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

1. ชั่งเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ควบคุมค่า pH ในสภาวะที่เหมาะสม (จากผลการทดลองข้อ 3.2.6.1) ลงไป 25 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที
3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย
4. กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองแดง ด้วยเครื่อง AAS
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
6. ทำ Control เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ขาดหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำ Blank เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนวัสดุเป็นกากขานอ้อยปรับปรุง

คุณภาพ

9. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-8 โดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นนิกเกิล
10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

1. ชั่งเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  มา 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร โดยควบคุมค่า pH ในสภาวะที่เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.2.6.1)

2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ในระยะเวลาที่เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.2.6.2)

3. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

4. กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณทองแดงด้วยเครื่อง AAS

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

6. ทำ Control เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

7. ทำ Blank เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนวัสดุเป็นกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

9. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-8 โดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นนิกเกิล

10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ เปลือกส้มและกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$

### 3.2.8 การศึกษาความเหมาะสมในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Feng et al., 2009)

1. นำเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  ที่ดูดซับโลหะทองแดงแล้วอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชั่งเปลือกส้มมา 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร

3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

4. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างสุดท้ายมี pH ใกล้เคียงกับน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. ชั่งเปลือกส้มที่แห้งแล้วจากข้อ 4. มา 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดงที่มีความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิลิตร โดยปรับ pH ให้เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.2.6.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.2.6.2)

7. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะทองแดงด้วยเครื่อง AAS

8. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-7 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

9. ทำ Control เช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

10. ทำ Blank เช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย

11. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-10 โดยเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเป็นนิกเกิล

12. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-11 โดยเปลี่ยนวัสดุเป็นกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

13. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการดูดซับรอบแรก และการดูดซับรอบหลังจากการคายซับของวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$

### 3.2.9 การดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียจริง

1. นำน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดง และนิกเกิลเริ่มต้น

2. ชั่งเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  ปริมาณตามที่ได้คำนวณได้จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยนำน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะมาปรับ pH ในสภาวะที่เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลอง 3.2.6.1) เติมน้ำไป 25 มิลลิลิตร

3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสม (ข้อมูลจากการทดลองที่ 3.2.6.2)

4. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย กรองสารละลายส่วนใสที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทองแดง และนิกเกิลด้วยเครื่อง AAS

5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 ซ้ำอีก 2 ครั้ง

6. ทำ Control เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

7. ทำ Blank เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียจากโรงงาน

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่เปลี่ยนวัสดุเป็นกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่เปลี่ยนปริมาณของเปลือกส้ม และกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่คำนวณได้จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (ดูตารางการคำนวณจากภาคผนวก ง)

10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับในวัสดุดูดซับแต่ละชนิด ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$

### 3.2.10 วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF

วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> โดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ก่อนและหลังดูดซับน้ำเสียโลหะทองแดง และนิกเกิล

### 3.2.11 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ทำการศึกษาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยทำการวิเคราะห์ในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองและปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร (ภาคผนวก ข) ดังนี้

- ปริมาณ และราคาวัสดุดูดซับ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อย
- ค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ NaOH, CaCl<sub>2</sub>, Ethanol และ HCl
- ค่าใช้จ่ายในส่วนของไฟฟ้า และน้ำประปา

- หมายเหตุ :**
1. ราคาสารเคมี จาก Thai Pure Science Company, ณ วันที่ 12 ตุลาคม 2558
  2. อัตราค่าไฟฟ้า ข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง
  3. อัตราค่าน้ำ ข้อมูลจากการประปานครหลวง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

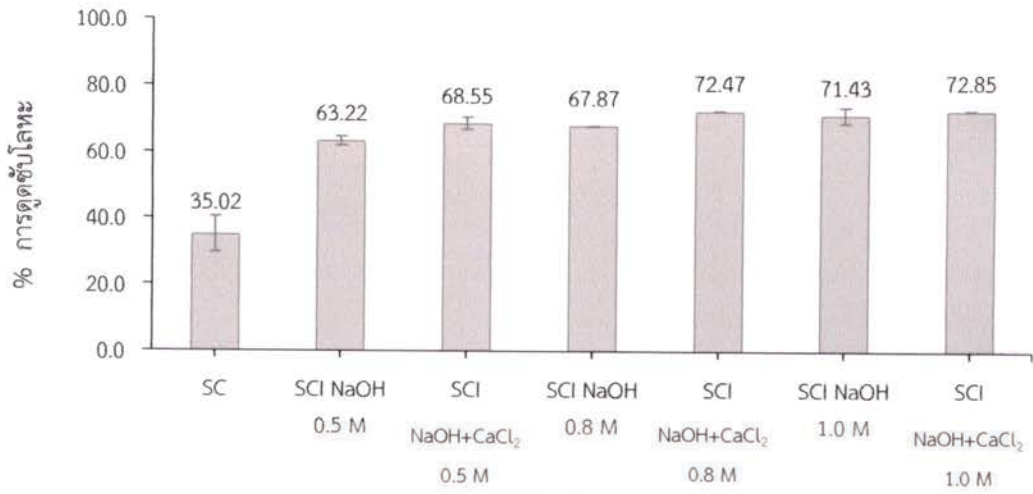
งานวิจัย เรื่อง ประสิทธิภาพและกลไกของการดูดซับทองแดงและนิกเกิลไอออน โดยใช้เปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  ได้แบ่งการศึกษาเป็นส่วนๆ ได้แก่ ศึกษาการปรับสภาพของกากชานอ้อย ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับของเปลือกส้ม และกากชานอ้อย ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ pH ระยะเวลาในการดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทองแดง นิกเกิล ของวัสดุดูดซับก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  ศึกษาประสิทธิภาพของการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  และวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยประเมินค่าใช้จ่ายของวัสดุดูดซับ สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับ และค่าน้ำ-ค่าไฟ ได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาการปรับสภาพกากชานอ้อย

การศึกษาการปรับสภาพกากชานอ้อย ในแต่ละค่าการปรับสภาพ เพื่อหาความเข้มข้นของสารปรับสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้วัสดุดูดซับโลหะได้ดีที่สุด ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนโลหะทองแดง และนิกเกิล ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำการแปรผันความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ในการปรับสภาพกากชานอ้อย คือ 0.5, 0.8 และ 1.0 M และแปรผันความเข้มข้นของ NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  ชนิดละ 0.5, 0.8 และ 1.0 M ผลของประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลของวัสดุดูดซับที่ปรับสภาพแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 4.1- 4.2 (จากตารางภาคผนวก จ.1)

ผลการศึกษาการแปรผันค่าสารปรับสภาพกากชานอ้อย ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NaOH และ NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  มีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะของกากชานอ้อยเพิ่มสูงขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อทำการปรับสภาพกากชานอ้อยด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  ที่ความเข้มข้นชนิดละ 0.8 - 1.0 M จากรูปที่ 4.1 พบว่ากากชานอ้อยที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพมีค่าการดูดซับทองแดงต่ำสุดอยู่ที่  $35.02 \pm 5.36$  % เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.5 M, NaOH 0.5 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.5 M และ NaOH 0.8 M มีค่าการดูดซับทองแดงอยู่ที่  $63.22 \pm 1.42$ %,  $68.55 \pm 1.85$  % และ  $67.87 \pm 0.08$  % ตามลำดับ ขณะที่การปรับปรุงคุณภาพกากชานอ้อยด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M, NaOH 1.0 M และ NaOH 1.0 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  1.0 M สามารถดูดซับทองแดงได้  $72.47 \pm 0.14$  %,  $71.43 \pm 2.40$  % และ  $72.85 \pm 0.15$  % ตามลำดับ เมื่อคำนวณทางสถิติระหว่างผลของการดูดซับกากชานอ้อยปรับสภาพจะพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดจากภาคผนวก จ.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การดูดซับทองแดงด้วยกากชานอ้อย โดยใช้สารปรับสภาพความเข้มข้นต่างๆ

หมายเหตุ : SC คือ กากชานอ้อยไม่ได้รับปรุงคุณภาพ  
 SCI คือ กากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4.2 การดูดซับนิกเกิลด้วยกากชานอ้อย โดยใช้สารปรับสภาพความเข้มข้นต่างๆ

หมายเหตุ : SC คือ กากชานอ้อยไม่ได้รับปรุงคุณภาพ  
 SCI คือ กากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า กากชานอ้อยที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพมีค่าการดูดซับนิกเกิลต่ำสุด อยู่ที่ 40.65±1.16 % เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.5 M และ NaOH 0.5 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.5 M มีค่าการดูดซับนิกเกิลอยู่ที่ 65.36±0.45 % และ 66.84±1.56 % ตามลำดับ ขณะที่การปรับปรุงคุณภาพกากชานอ้อยด้วย NaOH 0.8 M, NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M, NaOH 1.0 M เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M และ NaOH 1.0 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  1.0 M สามารถดูดซับนิกเกิลได้  $72.23 \pm 1.35$  %,  $74.32 \pm 1.20$  %,  $73.13 \pm 1.00$  % และ  $74.60 \pm 0.51$  % ตามลำดับ เมื่อคำนวณทางสถิติระหว่างผลของการดูดซับกากขานอ้อยปรับสภาพจะพบว่ามีความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ดูรายละเอียดจากภาคผนวก จ.1) และในการแปรผันค่าปรับสภาพกากขานอ้อยในแต่ละสภาวะความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่ากากขานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M เป็นต้นไป สามารถที่จะนำมาทำการดูดซับโลหะทองแดง และนิกเกิลได้ แต่จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการปรับสภาพกากขานอ้อยด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  กลับมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่า NaOH เพียงอย่างเดียว มีงานวิจัยของวิลาลินี (2548) ได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพกากขานอ้อยด้วย NaOH 2.0 M พบว่าดูดซับได้ดีที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ NaOH เพียง 0.8 M ก็มีประสิทธิภาพดีพอ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองของการใช้กากขานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M กับ NaOH 1.0 M มีค่าการดูดซับใกล้เคียงกัน อุดมศรี (2554) ได้กล่าวว่า ในการปรับสภาพกากขานอ้อยด้วย NaOH นั้น สารละลาย NaOH ได้เข้าไปกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสให้ออกไป จึงเหลือเพียงเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของกากขานอ้อยหลังจากที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้น จากผลการทดลองการแปรผันค่าสารปรับสภาพ ผู้วิจัยจึงเลือกกากขานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M นำไปใช้ในการทดลองลำดับต่อไป

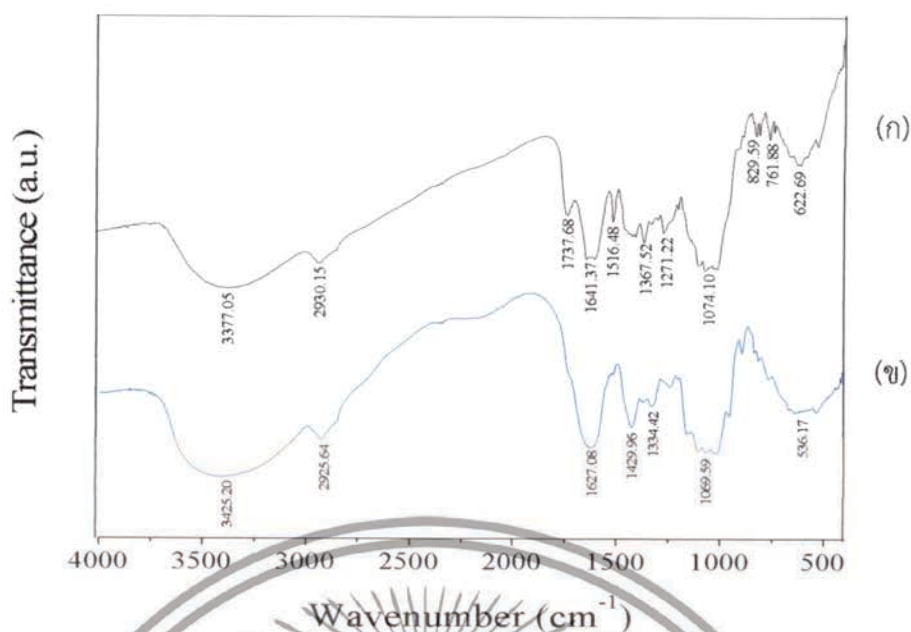
#### 4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ $\text{CaCl}_2$

ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับจากการบดวัสดุดูดซับให้มีขนาดเล็ก และนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช และปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M เพื่อที่จะศึกษาความสามารถในการดูดซับ และความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ใหม่ จึงต้องทำการศึกษาคูณโครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับก่อนทำการดูดซับ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET- $\text{N}_2$ -Adsorption ผลการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยนำวัสดุดูดซับที่ต้องการมาผสมกับโพแทสเซียมโบรมาไนด์ (KBr) ในโถรงบดสาร ทำการบดผสมกัน จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ใส่ลงในพิมพ์แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออกจะได้ตัวอย่างซึ่งจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบในวัสดุดูดซับ โดยทำการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น  $400\text{-}4,000\text{ cm}^{-1}$  ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.3 และ 4.4

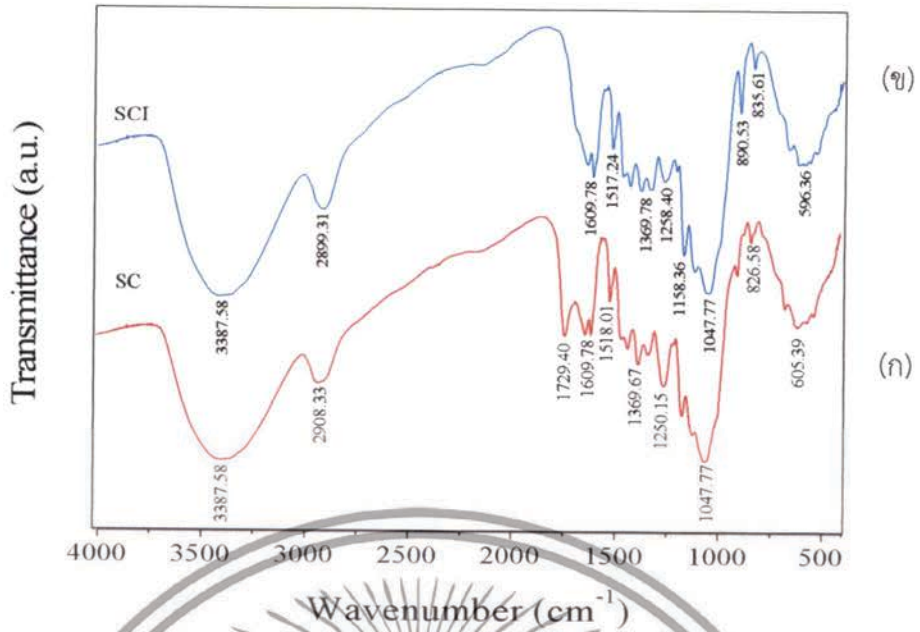
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ FT-IR ของเปลือกส้ม (ก) เปลือกส้มก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M และ (ข) เปลือกส้มหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ในเปลือกส้มก่อน และหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) พบว่า เปลือกส้มมีหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏเด่นชัด คือ ที่เลขคลื่นประมาณ 3,300-3,430 cm<sup>-1</sup> ปรากฏแถบการยืดพันธะระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ที่เลขคลื่นประมาณ 2,925-2,930 cm<sup>-1</sup> ปรากฏแถบการยืดที่เกิดจากกลุ่มของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกติน ที่เลขคลื่นประมาณ 1,737 cm<sup>-1</sup> และ 1,641 cm<sup>-1</sup> ปรากฏแถบการยืดของหมู่ ester carbonyl (C=O) และพันธะของ คาร์บอกซิเลท (COO<sup>-</sup>) ที่มีในวัสดุดูดซับ และปรากฏแถบการยืดพันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) เกิดจากกลุ่ม methyl, methylene และ methoxy การยืดของกลุ่มอะโรมาติก และกลุ่มอะลิฟาติก (C-H) ที่เลขคลื่นประมาณ 1,420-1,430 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเกิดจากการสั่นของกลุ่ม methyl, methylene และ methoxy และที่เลขคลื่นประมาณ 1,000-1,070 cm<sup>-1</sup> ปรากฏแถบการยืดของกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ แต่หลังจากปรับปรุงคุณภาพเปลือกส้มด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ดังในรูปที่ 4.3 (ข) เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น พบว่า ที่เลขคลื่นประมาณ 1,737 cm<sup>-1</sup> มีการหายไปของหมู่ ester carbonyl (C=O) แต่พบแถบการยืดเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่นประมาณ 1,627 และ 1,430 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นของหมู่คาร์บอกซิเลท (COO<sup>-</sup>) แสดงให้เห็นว่า CaCl<sub>2</sub> เข้าไปช่วยทำให้เพกตินที่มีอยู่ในเปลือกส้มเกิดการตกตะกอน โดย Ca<sup>2+</sup> จะเป็นตัวที่เข้าไปทำปฏิกิริยาตำแหน่ง ester carbonyl (C=O) เพกตินทำให้มีกลุ่มคาร์บอกซิเลทในการจับกับโลหะเพิ่มขึ้น ดังนั้น การปรับปรุงด้วย CaCl<sub>2</sub> จะช่วยในการกำจัดเพกตินในกากใย ทำให้จำนวนลิแกนด์ของคาร์บอกซิเลท เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น เมื่อนำผลของการวิเคราะห์ SEM และ BET N<sub>2</sub>-Adsorption มาเปรียบเทียบทำให้พบว่าการปรับปรุงวัสดุดูดซับทำให้ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสถูกละลายออกมา ทำให้เกิดการพองตัวซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ FT-IR ของกากชานอ้อย (ก) กากชานอ้อยก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M และ (ข) กากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ในกากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า กากชานอ้อยก่อน (ก) และกากชานอ้อยหลัง (ข) ที่ทำการปรับปรุง มีการดูดกลืนบริเวณช่วงเลขคลื่น 3,400-3,402 cm<sup>-1</sup> เนื่องจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนกับไฮโดรเจน (O-H) ที่ช่วงเลขคลื่น 2,900-2,930 cm<sup>-1</sup> เกิดจากหมู่คาร์บอนกับไฮโดรเจน (C-H) การดูดกลืนที่ช่วงเลขคลื่น 1,609 cm<sup>-1</sup> และ 1,047 cm<sup>-1</sup> เกิดจากการสั่นของหมู่เอเทอร์ (C-O-C) ของหน่วยกลูโคซิติกหรือพันธะ β (1-4) กลูโคซิติก แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของเซลลูโลส และเอมิเซลลูโลสในกากชานอ้อย ที่เลขคลื่นประมาณ 1,729 cm<sup>-1</sup> ปรากฏแถบการยืดของหมู่ ester carbonyl (C=O) และพบว่า หลังจากที่ทำกรปรับปรุงวัสดุด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีการหายไปของบริเวณตำแหน่งเลขคลื่น 1,240-1,260 cm<sup>-1</sup> เป็นตำแหน่งของโครงสร้างของลิกนินหรือเป็นหน่วยอะโรมาติก เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ได้เข้าไปกำจัดลิกนิน และเอมิเซลลูโลสออกไป จึงเหลือเพียงเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของกากชานอ้อยหลังจากที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ (อุดมศรี, 2554) ดังนั้น สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถละลายหรือทำลายเอมิเซลลูโลส และลิกนินที่ติดอยู่กับเส้นใยเซลลูโลส จึงเกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังสามารถทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสขยายตัว ซึ่งทำให้พันธะไฮโดรเจน (ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยา) ที่มีอยู่แตกออกเป็นเหตุทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาและความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ FT-IR ของวัสดุดูดซับเปลือกส้ม และกากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M นั้น สรุปได้ว่า NaOH เป็นตัวที่ทำให้โครงสร้างกลุ่มของลิกโนเซลลูโลสที่มีในวัสดุดูดซับเปลี่ยนไป เนื่องจาก NaOH เข้าไปทำปฏิกิริยากับ methyl ester ให้กลายเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลตจึงมีความสามารถในการดักโลหะประจุบวกได้มากขึ้นดังสมการ อีกทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญา ดึงพิมพ์ใช้ซ้ำโดยไม่มีการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมสารเอทานอลลงไปพร้อมกับการปรับสภาพ เอทานอลน่าจะเข้ามาช่วยในการไฮโดรไลซิส ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพในการจับกับโลหะได้



#### 4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้ม และกากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุดูดซับเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของ (ก) เปลือกส้มก่อนปรับปรุง (ข) เปลือกส้มหลังปรับปรุง (ค) กากชานอ้อยก่อนปรับปรุง (ง) กากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M

ซึ่งอธิบายได้ว่า ลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับก่อนปรับปรุงแตกต่างจากหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M โดยเปลือกส้มก่อนปรับปรุงพื้นผิวมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ เส้นใยเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ (รูปที่ 4.5 (ก)) ส่วนเปลือกส้มหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> พื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระมาก เป็นร่องลึกตื้นปนกัน (รูปที่ 4.5 (ข)) อาจเกิดจากการบวมหรือพองตัว ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้เพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng และ Guo (2012) รูปที่ 4.5 (ค) เป็นรูปแสดงภาพถ่ายของกากชานอ้อยก่อนปรับปรุงด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M จะเห็นได้ว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ เส้นใยเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ปรากฏรูพรุนบ้างบางจุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรูปที่ 4.5 (ง) แสดงกากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M จะเห็นพื้นผิวมีลักษณะขรุขระมากขึ้น แต่ก็ไม่มีความแตกต่างจากกากอ้อยก่อนทำการปรับปรุงคุณภาพมากนัก ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M น่าจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับได้มากขึ้น

#### 4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเทคนิค BET

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเปลือกส้ม กากชานอ้อยก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิค BET N<sub>2</sub>-Adsorption (BET) โดยอาศัยการวัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่พื้นผิวจะดูดซับเอาไว้ แสดงดังตารางที่ 4.1 (จากภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับ

| วัสดุดูดซับ  | พื้นที่ผิวจำเพาะ<br>(m <sup>2</sup> /g) | ปริมาตรของรูพรุน<br>(cm <sup>3</sup> /g) | ขนาดรูพรุน<br>(nm) |
|--|---|--|--------------------|
| - เปลือกส้ม  | 14.12                                   | 1.85×10 <sup>-2</sup>                    | 5.24               |
| - เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย<br>NaOH 0.8 M + CaCl <sub>2</sub> 0.8 M  | 24.47                                   | 2.44×10 <sup>-2</sup>                    | 3.98               |
| - กากชานอ้อย   | 41.09                                   | 2.66×10 <sup>-2</sup>                    | 2.59               |
| - กากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย<br>NaOH 0.8 M + CaCl <sub>2</sub> 0.8 M | 22.46                                   | 5.25×10 <sup>-2</sup>                    | 9.35               |

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เปลือกส้มก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 14.12 m<sup>2</sup>/g และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 1.85×10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ ส่วนเปลือกส้มหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 24.47 m<sup>2</sup>/g และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 2.44×10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ พบว่าเปลือกส้มหลังปรับปรุงคุณภาพแล้วมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเปลือกส้มก่อนปรับปรุงคุณภาพ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ SEM ที่พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นกว่าเดิมหลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพ

กากชานอ้อยก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 41.09 m<sup>2</sup>/g แต่หลังจากที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M แล้วพบว่า พื้นที่ผิวลดลงเหลือเพียง 22.46 m<sup>2</sup>/g ตามหลักความเป็นจริง การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อวัสดุมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่วนปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของกากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า โดยมีค่าปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 5.25×10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>/g ซึ่งกากชานอ้อยก่อนปรับปรุงนั้นมีค่าอยู่ที่ 2.66×10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>/g นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดรูพรุนของกากชานอ้อยหลังปรับปรุงคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าของขนาดรูพรุน โดยมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 9.35 nm จากเดิมนั้นกากชานอ้อยก่อนปรับปรุงมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 2.59 nm แสดงให้เห็นว่าการดูดซับน่าจะเกิดขึ้นได้มากที่บริเวณรูพรุนของวัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลในตารางจะเห็นว่า NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  สามารถที่จะทำให้วัสดุดูดซับทั้งเปลือกส้มมีพื้นที่ผิว และมีขนาดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น จึงน่าจะส่งผลให้วัสดุดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วนั้น สามารถดูดซับโลหะได้ดีกว่าวัสดุดูดซับที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ส่วนกากชานอ้อยแม้ว่าพื้นที่ผิวลดลง แต่ยังมีปริมาตรรูพรุนอยู่จำนวนมากโอกาสที่จะเกิดการดูดซับในปริมาณที่มากขึ้นย่อมเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน

### 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

#### 4.3.1. การศึกษาอิทธิพลของ pH

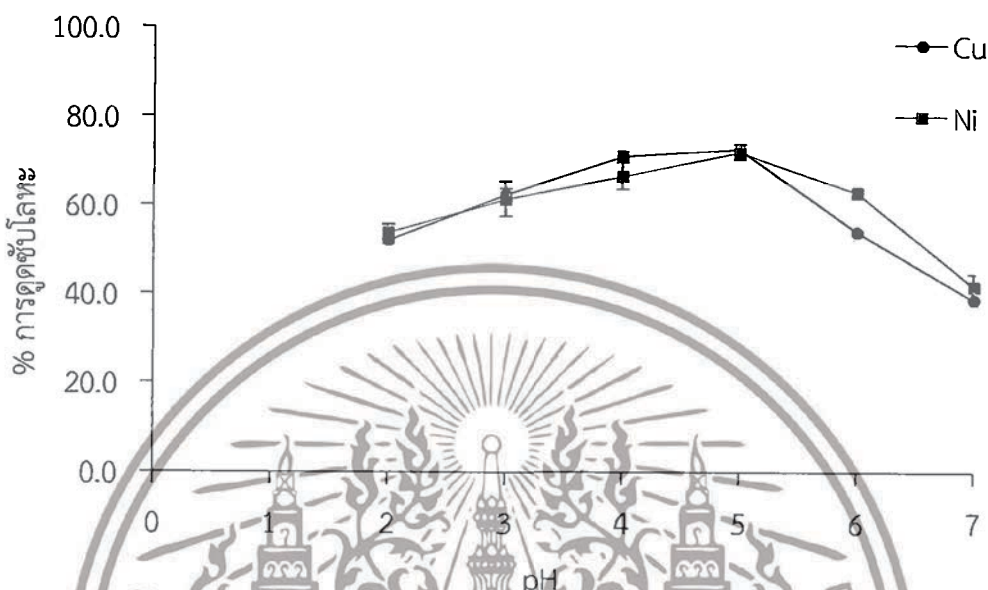
การศึกษอิทธิพลของ pH ในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล ทำโดยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิดความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร แปรผันค่า pH ในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนี้ คือ pH 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ใช้อัตราส่วนวัสดุดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 0.1 กรัม ต่อ 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะที่คงเหลือด้วยเครื่อง AAS นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะ (%) กับค่า pH ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 (จากตารางภาคผนวก จ.2)



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะ โดยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่ pH ต่างกัน เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแตกต่างกัน กราฟแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ เมื่อ pH อยู่ในช่วง 2 - 5 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจาก pH 5 จะมีค่าลดลง โดยที่ pH 5 จะให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดทองแดงดีที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ  $75.90 \pm 1.59$  % และการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ที่ pH 5 ดีที่สุดเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ  $74.56 \pm 1.67$  % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng และ Guo (2012) ที่กล่าวว่า ในช่วง pH 2-4 มีค่าการดูดซับน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะในน้ำเสียที่ pH ต่ำจะมีหมู่ไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการขัดขวาง การดูดซับโลหะจากวัสดุเปลือกส้มปรับปรุ้ง เมื่อเข้าใกล้ pH 6 ความสามารถในการดูดซับ โลหะทองแดง และนิกเกิลจะเริ่มลดลง เพราะมีโลหะบางส่วนตกตะกอน จึงมีโอกาสไปดูดซับอยู่กับ วัสดุดูดซับได้น้อย



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะ โดยกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M

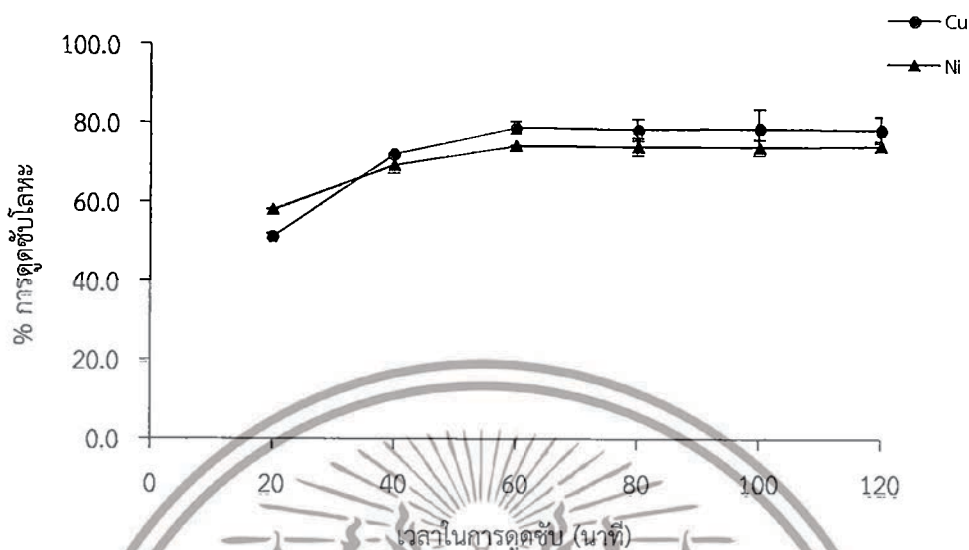
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า เมื่อใช้กากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M ดูดซับโลหะที่ pH ต่างๆ เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง pH 2-5 เช่นเดียวกับการใช้เปลือกส้มดูดซับ และสามารถกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลได้ดีที่สุดที่ pH 5 เมื่อเข้าสู่ช่วง pH 6-7 กราฟเริ่มลดลงเรื่อยๆ จะเห็นได้ว่ากากชานอ้อยสามารถดูดซับโลหะทองแดง และนิกเกิลได้สูงสุดที่ pH 5 มีค่าอยู่ที่  $73.09 \pm 1.05$  % และ  $72.40 \pm 1.69$  % ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากโลหะเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นสารละลายประจุบวก หากอยู่ในสถานะที่เป็นกรดจะมีปริมาณ  $\text{H}^+$  มาก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างไอออน การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ยาก แต่ในทางกลับกันเมื่ออยู่ในสถานะต่างปริมาณ  $\text{OH}^-$  ที่อยู่ในสารละลายจะรวมตัวกับประจุบวกของโลหะหนัก ทำให้เกิดการตกตะกอนมากยิ่งขึ้น (อรทัย และคณะ, 2554)

#### 4.3.2. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ในการดูดซับ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และนิกเกิล ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที และวิเคราะห์ปริมาณทองแดง และนิกเกิลที่เหลืออยู่ที่เวลา 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

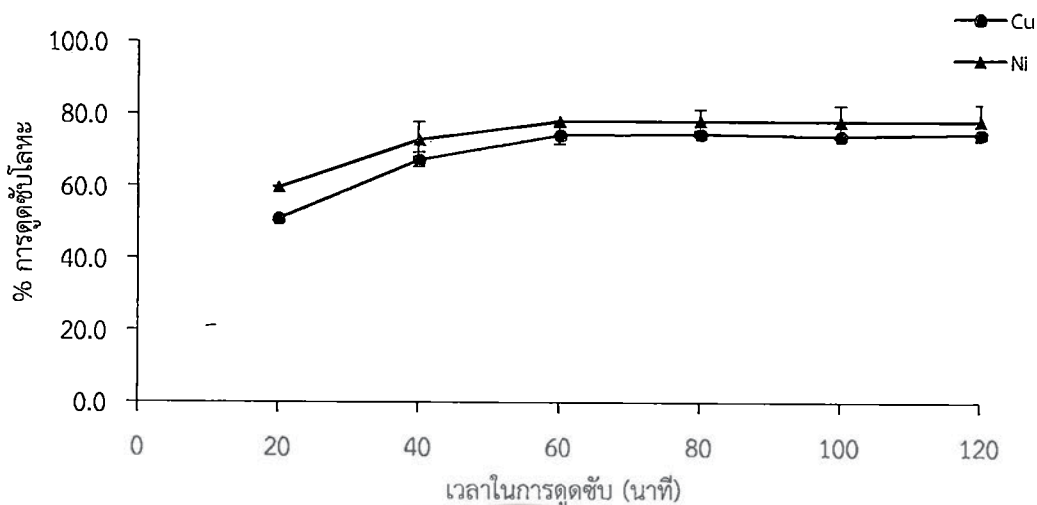
เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 (จากตารางภาคผนวก จ.3)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล โดยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M

ผลการทดลอง จากรูปที่ 4.8 พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดง และนิกเกิล โดยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ CaCl<sub>2</sub> 0.8 M เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ระยะเวลา 20 นาที เนื่องจากพื้นที่ผิวของเปลือกส้มมีมาก ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะยังคงเพิ่มขึ้นแต่ในอัตราต่ำกว่าจนเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 60 นาที และเมื่อเพิ่มช่วงเวลาในการดูดซับเป็น 80-120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง และนิกเกิลไม่เพิ่มขึ้นอีก เมื่อคำนวณทางสถิติในช่วงเวลา 40-60 นาที มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และช่วงเวลา 60-120 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ระยะเวลาที่ 60 นาที จึงเหมาะสมที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดง และนิกเกิลอยู่ที่  $78.95 \pm 2.66$  % และ  $74.41 \pm 2.23$  % ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng และ Guo (2012) ที่กล่าวว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ โลหะได้เข้าไปยึดเกาะบนพื้นที่ผิวของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพจนทำให้การดูดซับที่จะเกิดขึ้นใหม่เป็นไปได้ยาก และเกิดแรงผลักระหว่างโลหะที่เข้าไปยึดเกาะใหม่ จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ ดังนั้น จึงเลือกระยะเวลาในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ คือ 60 นาที ไปใช้ในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล โดยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระยะเวลา 60 นาที การดูดซับทองแดงเริ่มคงที่ และกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่เวลา 120 นาที เมื่อคำนวณทางสถิติในช่วงเวลา 60-120 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง คือ 60 นาที โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับอยู่ที่  $74.93 \pm 0.83$  % ส่วนการดูดซับนิกเกิลที่ระยะเวลาตั้งแต่ 0-60 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างไม่เห็นได้ชัด หลังจากระยะเวลา 60 นาที การดูดซับนิกเกิลเริ่มคงที่ และกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่เวลา 120 นาที เช่นเดียวกับการดูดซับทองแดง เมื่อคำนวณทางสถิติในช่วงเวลา 60-120 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นเดียวกัน ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิล คือ 60 นาที โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับอยู่ที่  $78.22 \pm 0.89$  % สอดคล้องกับงานวิจัยของอรทัย (2554) ที่กล่าวว่า ในช่วงระยะแรกพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปโลหะได้เกาะบนพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมากขึ้น โอกาสที่การดูดซับจะเกิดขึ้นใหม่จึงเป็นไปได้ยาก และเกิดแรงผลักระหว่างโลหะที่จะเข้าไปเกาะโลหะเดิมที่ถูกดูดซับ ในช่วงนี้จะเกิดการคายซับขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเริ่มคงที่

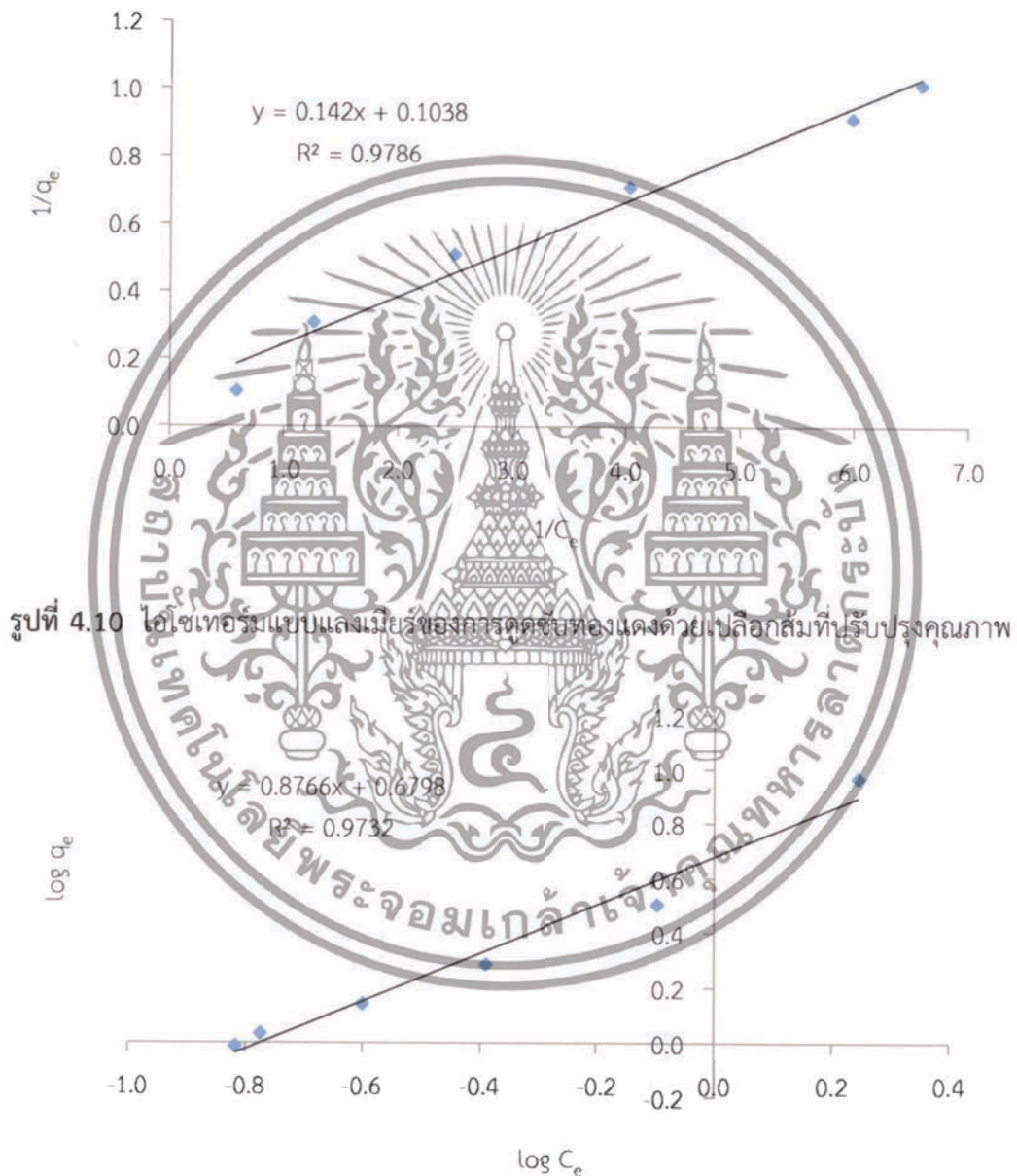
ดังนั้น ในการทดลองนี้ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้ม คือ ที่ระยะเวลา 60 นาที และสำหรับกากชานอ้อย คือ ที่ระยะเวลา 60 นาที จึงเลือกที่ 60 นาทีของระยะเวลาของวัสดุดูดซับเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ใช้ดูดซับให้เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการทดลอง

#### 4.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิลด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ และผลการทดลองนี้เป็นการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักทองแดง และนิกเกิล โดยทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม จากการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

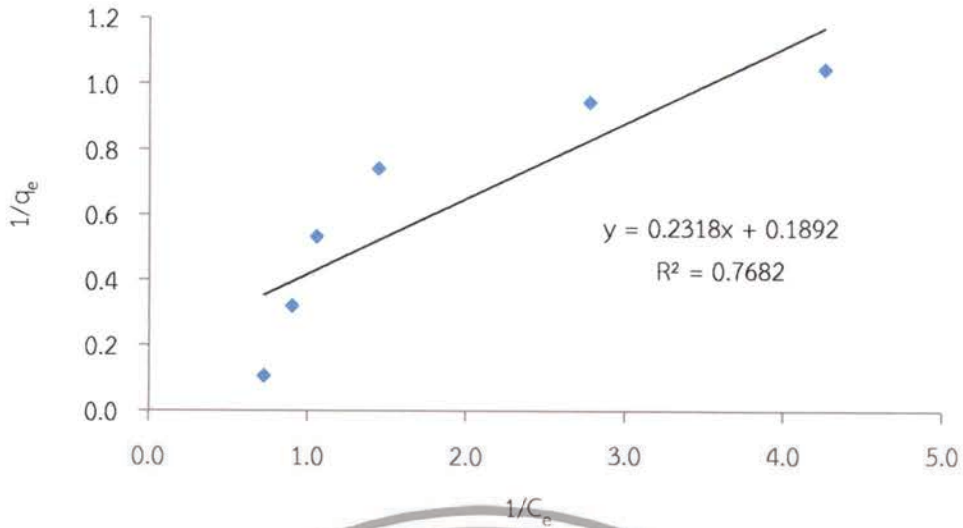
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นแปะใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ที่ pH 5 จากนั้นเติมวัสดุดูดซับลงไปในน้ำเสียโลหะแต่ละชนิด ด้วยการแปรผันปริมาณที่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1.0 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงแล้วกรองเอาสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS นำข้อมูลผลการทดลองที่ได้มาทำการพลอตกราฟระหว่าง  $1/C_e$  และ  $1/q_e$  สำหรับกราฟของ แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และ  $\log C_e$  และ  $\log q_e$  สำหรับกราฟของฟรอนดลิชไอโซเทอร์ม ผลการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.17 (จากตารางผลภาคผนวก จ.4)



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิชของการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิชของการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพ

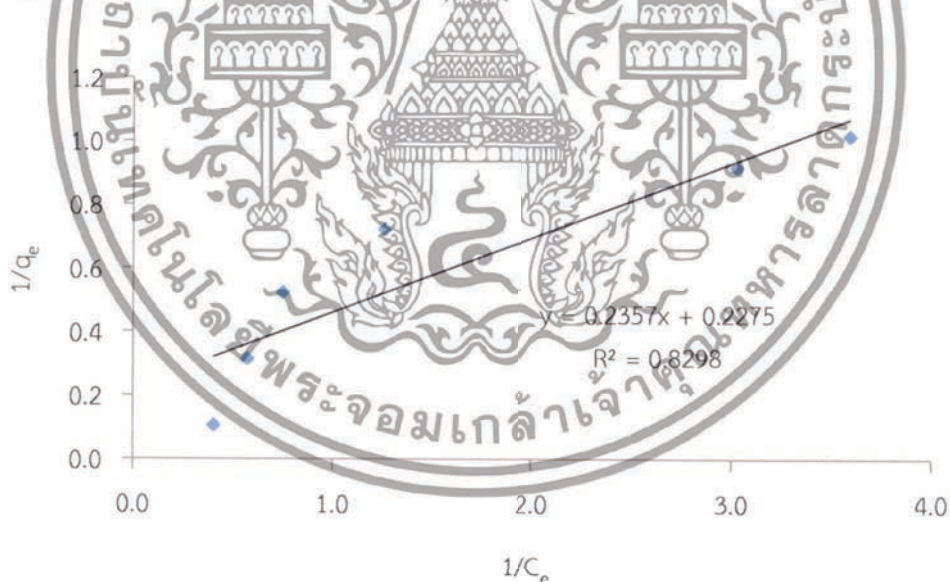
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ |        |         | ไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิช |        |         |
|------------------------|--------|---------|-----------------------|--------|---------|
| ตัวแปร                 | ทองแดง | นิกเกิล | ตัวแปร                | ทองแดง | นิกเกิล |
| $Q_m$ (mg/g)           | 9.6339 | 5.2854  | $K_f$ (mg/g)          | 4.7841 | 3.1103  |
| $K_L$                  | 0.7310 | 0.8162  | $1/n$                 | 0.8766 | 1.0466  |
| $R^2$                  | 0.9786 | 0.7682  | $R^2$                 | 0.9732 | 0.7076  |

จากตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าการดูดซับ ( $Q_m$ ) ของทองแดง อยู่ที่ 9.64 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9786 และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิชมีค่าความสามารถในการดูดซับ ( $K_f$ ) ทองแดง อยู่ที่ 4.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9732 หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) พบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

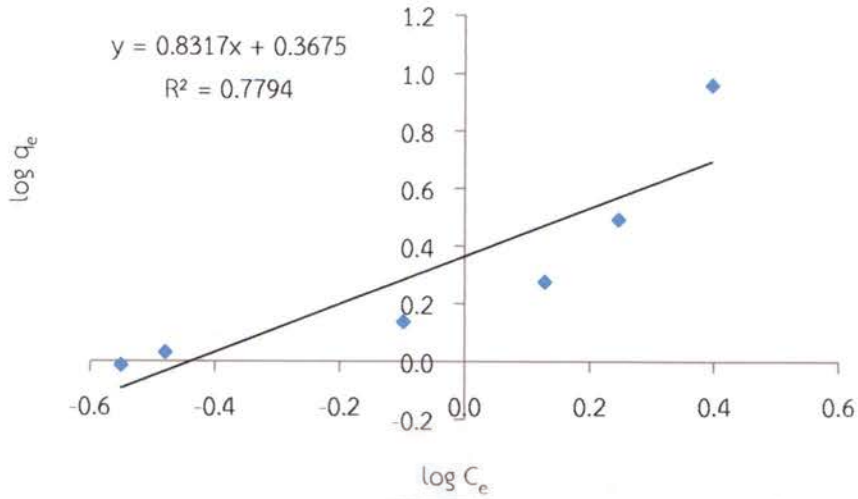
ไอโซเทอร์มของการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถอธิบายได้ทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจจะเป็นไปได้ว่ากลไกการดูดซับอาจเป็นได้ทั้งสองกลไก ทำให้ทราบพฤติกรรมในการดูดซับว่า ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีความสามารถดูดติดได้เท่าๆกัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้ชั้นเดียว (Monolayer) และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วอ็อกไซด์หรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน พื้นที่ผิวในการดูดซับมีตำแหน่งและกลไกดูดซับที่เหมือนกัน (Homogeneous Surface) ส่วนไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชการดูดซับทุกจุดไม่เท่ากัน สารที่ถูกดูดซับจะดูดซับได้แบบต่อเนื่อง (สุदारตัน และคณะ, 2556)

ส่วนการดูดซับนิกเกิลไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีค่าการดูดซับ ( $Q_m$ ) นิกเกิลอยู่ที่ 5.29 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7682 และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7076 และมีค่าความสามารถในการดูดซับ ( $K_f$ ) นิกเกิลอยู่ที่ 3.11 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของการดูดซับนิกเกิลของไอโซเทอร์มทั้งแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช จะพบว่ามีค่าที่ค่อนข้างต่ำกว่าเกณฑ์ในการพิจารณา ทั้งนี้แล้วสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับนิกเกิลอาจเกิดกลไกในการดูดซับขึ้นได้หลากหลายกลไกหรือเกิดในสมการการดูดซับแบบอื่น ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้ผลของแลงเมียร์ไอโซเทอร์มเพราะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่มากกว่าฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม มาคำนวณหาปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ในการหาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานต่อไป



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับทองแดงด้วยกากซันอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ

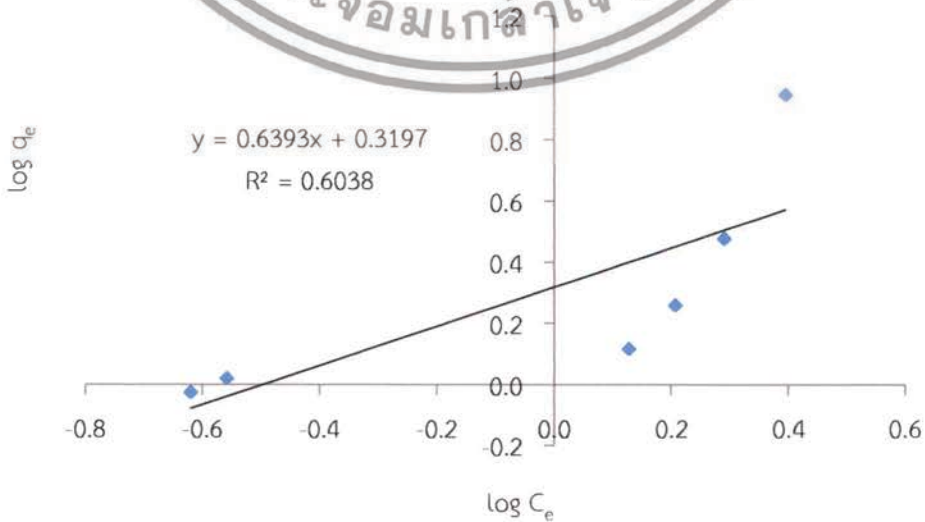
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับทองแดงด้วยกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ |        |         | ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช |        |         |
|------------------------|--------|---------|-----------------------|--------|---------|
| ตัวแปร                 | ทองแดง | นิกเกิล | ตัวแปร                | ทองแดง | นิกเกิล |
| $Q_m$ (mg/g)           | 4.3956 | 3.0562  | $K_f$ (mg/g)          | 2.3329 | 2.0879  |
| $K_L$                  | 0.9652 | 1.8486  | 1/n                   | 0.8317 | 0.6393  |
| $R^2$                  | 0.8298 | 0.7099  | $R^2$                 | 0.7794 | 0.6038  |

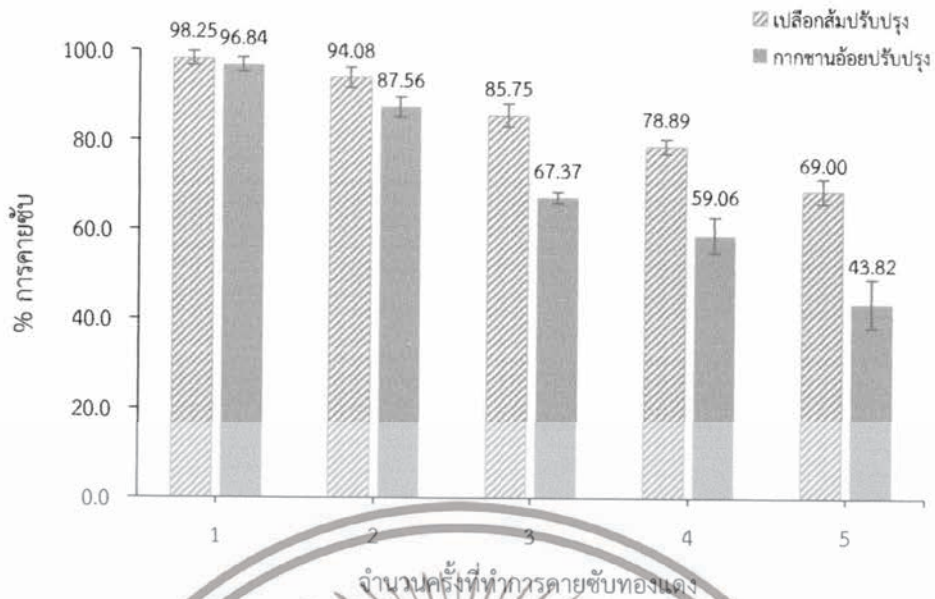
จากตารางที่ 4.3 ในการดูดซับโลหะทองแดง และนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าการดูดซับ ( $Q_m$ ) ทองแดงอยู่ที่ 4.40 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8298 และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีความสามารถในการดูดซับ ( $K_f$ ) ทองแดง อยู่ที่ 2.33 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7099 ส่วนการดูดซับโลหะนิกเกิล พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าการดูดซับ ( $Q_m$ ) อยู่ที่ 3.06 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8298 และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีความสามารถในการดูดซับ ( $K_f$ ) อยู่ที่ 2.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7794 เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียของโลหะทั้ง 2 ชนิดแล้วจะเห็นได้ว่ากลไกของการดูดซับไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎีของสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช กลไกในการดูดซับอาจจะเกิดขึ้นได้หลากหลายกลไกหรืออาจจะเกิดไอโซเทอร์มขึ้นในรูปแบบอื่น ดังนั้น การคำนวณหาปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ในการหาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานจึงจำเป็นต้องพิจารณาที่ค่า  $R^2$  พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ดังนั้น การดูดซับน้ำเสียโลหะทองแดง และนิกเกิลด้วยเปลือกส้มและกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถเป็นได้ทั้งแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช ส่วนการดูดซับน้ำเสียนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ และการดูดซับน้ำเสียทองแดง และนิกเกิลด้วยกากชานอ้อยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่น้อยเกินไป จึงไม่สามารถระบุได้ว่ากลไกของการดูดซับอยู่ในรูปแบบใด เพราะผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับทฤษฎี ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยหลายๆปัจจัยที่มีผลต่อการหาปริมาณวัสดุดูดซับ จึงควรที่จะทำการศึกษาไอโซเทอร์มอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อมาสนับสนุนและยืนยัน

#### 4.5 การศึกษาความเหมาะสมในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่

การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ และการนำวัสดุดูดซับที่ทำการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง และในการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับทำได้โดยนำวัสดุดูดซับ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพหลังจากที่ได้ดูดซับโลหะในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว นำมาอบให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร เป็นตัวคายซับ แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที กรองสารละลายที่ได้แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่คายออกมาด้วยเครื่อง AAS ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 (จากตารางผลภาคผนวก จ.5)

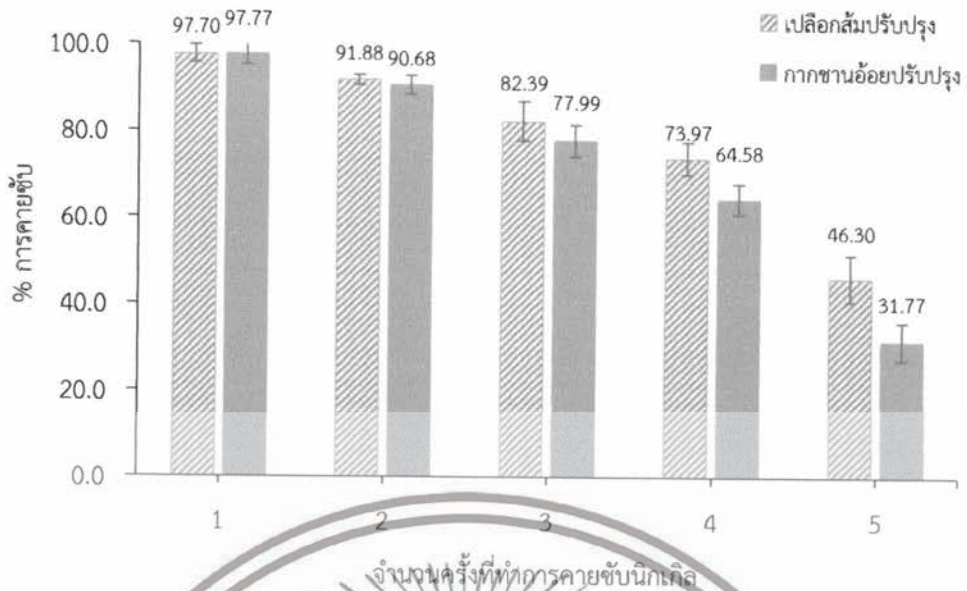
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.18** ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการคายน้ผึ้งของแดงออกจากเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพกับจำนวนครั้งของการคายน้ผึ้ง

ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 พบว่า การคายน้ผึ้งของแดงออกจากวัสดุดูดซับด้วยกรดไฮโดรคลอริกในครั้งแรกนั้นทั้งเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพคายน้ผึ้งของแดงออกมา โดยมีค่าอยู่ที่  $98.25 \pm 1.53$  % ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่  $96.84 \pm 1.56$  % จะเห็นว่าการคายน้ผึ้งด้วยกรดไฮโดรคลอริกในครั้งแรก สามารถทำให้ของแดงหลุดออกมาจากวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดได้มากเกือบ 100 % การคายน้ผึ้งครั้งที่ 2 เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพคายน้ผึ้งของแดงออกมามีค่าอยู่ที่  $94.08 \pm 2.26$  % และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่  $87.56 \pm 2.27$  % ตามลำดับ และครั้งที่ 3 เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถคายน้ผึ้งของแดงออกมามีค่าอยู่ที่  $85.75 \pm 2.50$  % ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพคายน้ผึ้งของแดงได้  $67.37 \pm 1.23$  % เมื่อทำการคายน้ผึ้งไปครั้งที่ 5 เปลือกส้มและกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพก็ยังสามารถคายน้ผึ้งได้ดีมีค่าอยู่ที่  $69.00 \pm 2.74$  % และ  $43.82 \pm 5.42$  % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการคายน้ผึ้งของแดงด้วยวัสดุดูดซับทั้งสองชนิดเริ่มมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเปรียบเทียบการคายน้ผึ้งของวัสดุทั้งสองชนิดจะเห็นว่าเมื่อทดลองคายน้ผึ้งไปจำนวน 5 ครั้ง โดยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถคายน้ผึ้งได้ในระดับดีกว่าซึ่งเห็นได้จากการคายน้ผึ้งในครั้งที่ 3 ค่าการคายน้ผึ้งเกิน 80 % อาจเนื่องมาจากลักษณะพื้นผิว และปริมาณรูพรุนของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพมีจำนวนที่มากกว่า จึงทำให้ดูดซับของแดงได้มาก เมื่อทำการคายน้ผึ้งโลหะทองแดงจึงหลุดออกมามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



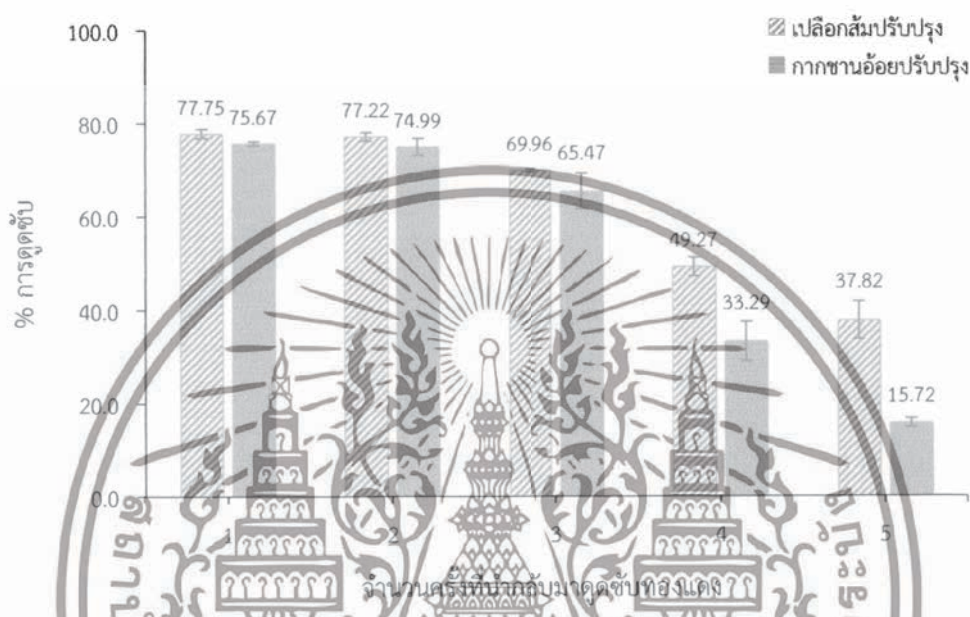
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการคายซับนิกเกิลออกจากเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพกับจำนวนครั้งของการคายซับนิกเกิล

ผลการทดลองการคายซับนิกเกิล จากรูปที่ 4.19 พบว่า ในการคายซับนิกเกิลออกจากวัสดุชุบด้วยกรดไฮโดรคลอริกในครั้งแรก เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพมีค่าคายซับนิกเกิลอยู่ที่  $97.70 \pm 2.00$  % ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าคายซับนิกเกิลอยู่ที่  $97.77 \pm 2.58$  % ส่วนการคายซับนิกเกิลในครั้งที่สองของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่  $91.88 \pm 1.09$  % และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่  $90.68 \pm 2.13$  % และเมื่อคายซับนิกเกิลไปครั้งที่ 5 เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพก็ยังสามารถคายซับนิกเกิลได้ดีกว่ามีค่าการคายซับนิกเกิลอยู่ที่  $46.30 \pm 5.43$  % และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าอยู่ที่  $31.77 \pm 4.36$  % แสดงให้เห็นว่าในการคายซับนิกเกิล เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพคายซับนิกเกิลได้ดีกว่ากากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ เพราะพื้นที่ผิวของเปลือกส้มมีจำนวนที่มากกว่าทำให้ดูดซึมนิกเกิลได้ดึ้นเอง หลังจากทำการคายซับนิกเกิลทำให้นิกเกิลหลุดออกมาในปริมาณที่มากกว่า และพบว่าในการคายซับนิกเกิลไปจำนวน 5 ครั้งประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลของวัสดุชุบทั้งสองชนิดลดลงเรื่อยๆเช่นเดียวกันกับการคายซับนิกเกิลของแดง

มีงานวิจัยของ Li Jia และคณะ (2011) ที่ทำการชุบวัสดุด้วยกรดไฮโดรคลอริก ได้กล่าวว่าการชุบวัสดุด้วยกรดไฮโดรคลอริกเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารละลายในการคายซับนิกเกิลให้กับวัสดุชุบที่ดูดซึมนิกเกิลในระดับความเข้มข้นต่ำ ดังนั้น จึงเลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกมาเป็นสารละลายในการคายซับนิกเกิลของแดงและนิกเกิลออกจากเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งการคายซับนิกเกิลของแดงและนิกเกิลด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นการช่วยฟื้นฟูสภาพของสารชุบที่เริ่มหมดสภาพนั้นให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากการทดลองการคายซับนิกเกิลจำนวน 5 ครั้ง จะเห็นได้ว่าปริมาณการคายซับนิกเกิลในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่ามากกว่า 80 % และเมื่อทำการคายซับนิกเกิลโลหะหนักออกจากวัสดุชุบในครั้งต่อไป ปริมาณการคายซับนิกเกิลมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณโลหะหนักในวัสดุชุบที่หลุดออกมาไม่หมด หรือในระหว่างที่ทำการคายซับนิกเกิลอาจเกิดการดูดซึมนิกเกิลของโลหะหนักเข้าไปใหม่ภายในตัวชุบ หรือในขั้นตอนการกรองวัสดุด้วยกระดาษกรองที่ยังมีเศษวัสดุหลงเหลือติดอยู่ ปริมาณวัสดุที่ชะล้างออกมาซึ่งจะลดลงทำให้การคายซับนิกเกิลในครั้งต่อไปมีค่าลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการคายซั้วสดดูดซับด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วนั้น นำวัสดุดูดซับไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และนิกเกิล ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ที่ pH 5 ปริมาณ 25 มิลลิตรอีกครั้ง นำไปเขย่าเป็นเวลา 60 นาทีต่อด้วย นำไปปั่นเหวี่ยง แล้วกรองเอาสารละลายส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป ซึ่งเป็นขั้นตอนของการศึกษาการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 (จากตารางผลภาคผนวก จ.5)

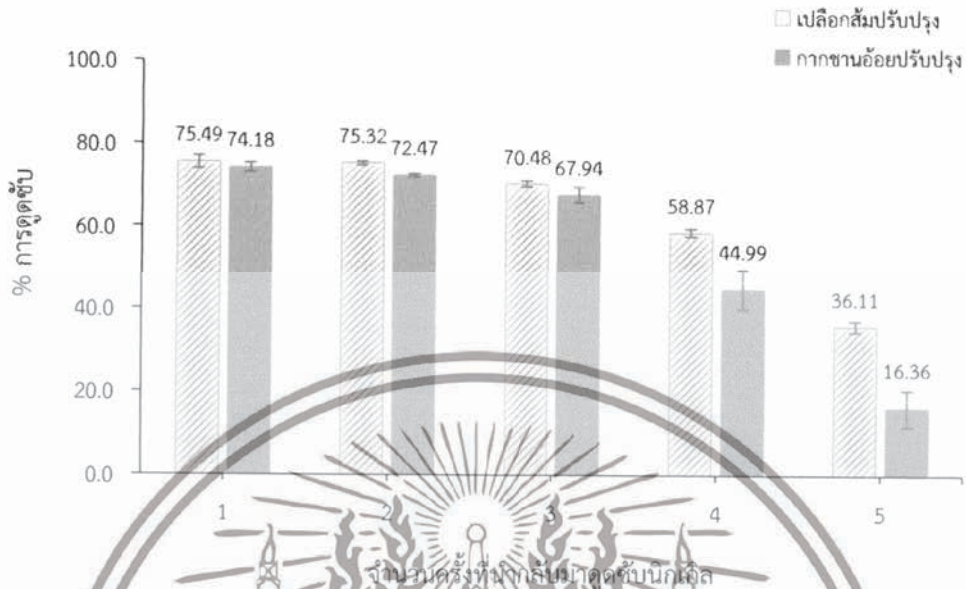


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด กับจำนวนครั้งที่นำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่

เมื่อทำการคายซั้วเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วนำมาดูดซับใหม่ จากรูปที่ 4.20 พบว่า ก่อนทำการคายซั้วเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพมีค่าการดูดซับอยู่ที่  $79.44 \pm 0.96$  % (อ้างอิงผลจากรูปที่ 4.22) หลังจากทำการคายซั้วแล้วนำมาดูดซับใหม่ในครั้งแรกสามารถดูดซับทองแดงได้  $77.75 \pm 0.97$  % ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง 1.67 % ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพมีค่าการดูดซับก่อนทำการคายซั้วอยู่ที่  $77.26 \pm 0.63$  % เมื่อนำไปทำการคายซั้วแล้วนำกลับมาดูดซับใหม่สามารถดูดซับทองแดงได้  $75.67 \pm 0.38$  % ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง 1.59 % จะเห็นได้ว่าในครั้งที่ 1-3 ประสิทธิภาพของการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ หลังจากทำการคายซั้วค่อนข้างดี มีค่าการดูดซับมากกว่า 60 % หลังจากที้นำไปทำการดูดซับใหม่ในครั้งที่ 4-5 ประสิทธิภาพลดลงเรื่อยๆ จนในครั้งสุดท้ายเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้เพียง  $37.82 \pm 4.00$  % และ  $15.72 \pm 0.96$  % ตามลำดับ ถือว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับที่น้อยมาก จากการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ถึง 3 ครั้ง ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ FENG *et al.*, (2009) เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับมากกว่า 60 % แต่เมื่อเทียบค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเสียกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้กำหนดไว้ให้ค่าความเข้มข้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดงต้องมีค่าไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) พบว่าการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่สามารถนำมาได้เพียงครั้งเดียว



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับนิกเกิลของวัสดุดูดซับ 2 ชนิด กับจำนวนครั้งที่นำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่

จากรูปที่ 4.21 พบว่า ในครั้งแรกเมื่อนำเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพมาดูดซับใหม่สามารถดูดซับนิกเกิลได้  $75.49 \pm 1.57$  % ซึ่งก่อนที่จะทำการคายชั้นเปลือกส้มสามารถดูดซับนิกเกิลได้เท่ากับ  $78.39 \pm 1.25$  % (อ้างอิงจากรูปที่ 4.22) ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง 2.50% ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพก่อนทำการคายชั้นแล้วนำกลับมาใช้ใหม่อยู่ที่  $78.04 \pm 1.19$  % (ข้อมูลจากรูปที่ 4.22) สามารถนำมาดูดซับนิกเกิลครั้งใหม่ได้  $74.18 \pm 1.09$  % เมื่อนำมาดูดซับใหม่ ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง 3.86 % จะเห็นว่าในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลใหม่ในครั้งที่ 1-3 ดูดซับได้ดีเนื่องจากมีค่าการดูดซับมากกว่า 60 % หลังจากนำไปดูดซับนิกเกิลใหม่ครั้งที่ 4-5 ค่าการดูดซับลดลงมาก โดยในครั้งที่ 5 ดูดซับนิกเกิลได้เพียง  $36.11 \pm 1.31$  % สำหรับเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพดูดซับได้  $16.36 \pm 4.38$  % ตามลำดับ และการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่สามารถนำมาใช้ได้ถึง 3 ครั้ง เช่นเดียวกับการนำวัสดุไปทำการดูดซับทองแดงใหม่ เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับมากกว่า 60 % และพบว่าการนำวัสดุดูดซับมาทำการดูดซับใหม่ในครั้งแรกส่งผลให้ปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ให้ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ดังนั้น ในการทดลองคายชั้นวัสดุดูดซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่จะเห็นว่าเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ เมื่อทำการคายชั้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วสามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ได้จำนวนหลายครั้ง เพราะวัสดุดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพจะมีโครงสร้างขนาดรูพรุนมากทำให้ดูดซับ และคายชั้นได้ดี แต่จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลนั้นเริ่มลดลงเรื่อยๆ เมื่อนำกลับมาดูดซับใหม่ อย่างไรก็ตามการดูดซับครั้งต่อไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงอาจเป็นเพราะปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับเข้าไปฝังตัวแน่นตามรูพรุนขนาดเล็กๆ และไม่สามารถหลุดออกมาได้หมด การทำการคายซับ และนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่เป็นข้อดีอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตวัสดุดูดซับ และโลหะที่ทำการคายซับออกมาแล้วอาจสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

#### 4.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

##### 4.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วัสดุดูดซับ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากชานอ้อย ที่ปรับปรุงด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M ในปริมาณ 0.1 กรัม ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ pH 5 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ระยะเวลาดูดซับ 60 นาที ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (จากตารางผลภาคผนวก จ.6)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์กับวัสดุดูดซับ

จากรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นการหาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทองแดง และนิกเกิล ด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่า เปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดง และนิกเกิลได้เท่ากับ  $79.44 \pm 0.96$  และ  $78.39 \pm 1.25$  % ตามลำดับ ส่วนกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพก็สามารถดูดซับทองแดงและนิกเกิลได้  $77.26 \pm 6.34$  และ  $78.04 \pm 1.19$  % ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และนิกเกิลมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณโลหะในน้ำเสียมีค่าไม่เกินตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ให้ค่าความเข้มข้นของทองแดงต้องมีค่าไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และของนิกเกิลต้องมีค่าความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

ดังนั้น ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่างเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพ อาจสรุปได้ว่าวัสดุเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการดูดซับโลหะทั้ง 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บมีค่า pH 2 และเป็นน้ำเสียบ่อแยกชนิดโลหะ วิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำเสียทองแดง และนิกเกิล โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS พบว่าจากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำเสียทองแดง และนิกเกิล โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เมื่อทราบแล้วว่าน้ำเสียทองแดงจากโรงงานมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 150.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียนิกเกิลจากโรงงานมีความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 250.50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการดูดซับด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ คือ ปรับค่า pH ในน้ำปริมาตร 25 มิลลิลิตร ให้เท่ากับ pH 5 จากนั้นเติมวัสดุดูดซับลงไป โดยปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ต่ออัตราน้ำเสียในปริมาตร 25 มิลลิลิตร ได้มาจากผลการคำนวณปริมาณ  $Q_m$  (mg/g) ที่ได้จากแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม จึงได้ปริมาณของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ต้องใช้ในปริมาณ 0.3905 กรัม สำหรับดูดซับทองแดง และ 1.1849 กรัม สำหรับดูดซับนิกเกิล และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ ในปริมาณ 0.8560 กรัม สำหรับดูดซับทองแดง และ 2.0491 กรัม สำหรับดูดซับนิกเกิล ใช้ระยะเวลาดูดซับ 60 นาที และนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง AAS ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.24 (จากตารางผลภาคผนวก จ. 7)



รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะเมื่อใช้วัสดุดูดซับที่คำนวณได้จากแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

จากรูปที่ 4.23 พบว่า การดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพปริมาณ 0.3905 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ  $71.39 \pm 2.97$  % และการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพปริมาณ 1.1849 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ  $76.87 \pm 3.44$  % ส่วนกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพปริมาณ 0.8560 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง เท่ากับ  $70.74 \pm 3.13$  % และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพปริมาณ 2.0491 กรัม ในมีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลเท่ากับ  $76.12 \pm 2.49$  % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพนั้น จะเห็นได้ว่าเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดง และนิกเกิลได้ใกล้เคียงกับกากชานอ้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงคุณภาพ เช่นเดียวกันนั้น การที่เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพและกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะลดลงจากที่เคยดูดซับได้มากในขั้นตอนการทดลองดูดซับโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ อาจเนื่องมาจาก มีการปนเปื้อนของไอออนของโลหะชนิดอื่นๆในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงไปบ้าง (อ้างอิงจากผลการทดลอง 4.7)

ดังนั้น ในการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล ด้วยเปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพนั้น พบว่า วัสดุดูดซับที่ทำการปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียใกล้เคียงกัน

#### 4.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF

หลังจากที่ได้นำตัวดูดซับไปทำการดูดซับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของทองแดงและนิกเกิลแล้ว นำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ผลการทดลองที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 (จากภาคผนวก ฉ)

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและชนิดของธาตุในวัสดุดูดซับด้วยเครื่อง XRF

| ตัวอย่าง                           | ผลการวิเคราะห์   |
|------------------------------------|--|
| OPI                                | O 30.0 %, S 1.22 %, Ca 60.0 %, Fe 1.69 %, Cu 1.75 %            |
| OPI + น้ำเสียสังเคราะห์<br>ทองแดง  | O 22.7 %, S 1.55 %, Ca 20.90 %, Fe 1.86 %, Cu 44.8 %           |
| OPI + น้ำเสียสังเคราะห์<br>นิกเกิล | O 27.2 %, S 2.13 %, Ca 30.3 %, Fe 2.67 %, Cu 4.75 %, Ni 25.1 % |
| OPI + น้ำเสียทองแดงจาก<br>โรงงาน   | O 24.6 %, S 1.57 %, Ca 23.8 %, Fe 1.02 %, Cu 48.65 %           |
| OPI + น้ำเสียนิกเกิลจาก<br>โรงงาน  | O 26.0 %, S 1.94 %, Ca 31.3 %, Fe 1.29 %, Cu 3.16 %, Ni 34.0 % |
| SCI                                | O 23.0 %, Zn 2.35 %, Ca 41.2 %, Cu 9.59 %                      |
| SCI + น้ำเสียสังเคราะห์<br>ทองแดง  | O 17.2 %, Zn 2.06 %, Ca 10.2 %, Cu 50.24 %                     |
| SCI + น้ำเสียสังเคราะห์<br>นิกเกิล | O 27.6 %, Zn 2.23 %, Ca 8.63 %, Cu 8.98 %, Ni 14.4 %           |
| SCI + น้ำเสียทองแดงจาก<br>โรงงาน   | O 23.0 %, Zn 2.0 %, Ca 6.12 %, Cu 43.0 %                       |
| SCI + น้ำเสียนิกเกิลจาก<br>โรงงาน  | O 20.6 %, Zn 2.90 %, Ca 9.78 %, Cu 9.04 %, Ni 40.2 %           |

**หมายเหตุ** Ni คือ นิกเกิล, Cu คือ ทองแดง, OPI คือ เปลือกส้มปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$

SCI คือ กากชานอ้อยปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง และนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์ และดูดซับน้ำเสียโรงงานซูป พบว่า มีโลหะปนอยู่ในวัสดุดูดซับ และมีปริมาณ โลหะเพิ่มขึ้น จากผลการวิเคราะห์ แม้ว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณโลหะหนักที่ต้องการทราบจะมีค่าน้อยกว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่คำนวณได้ แต่ก็เป็นตัวยืนยันว่าในวัสดุดูดซับมีโลหะชนิดอื่นๆนอกเหนือจาก โลหะที่ต้องการทราบปะปนอยู่ในวัสดุดูดซับที่ทำการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงาน

#### 4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

การทดลองศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของทองแดง และนิกเกิลโดยใช้วัสดุดูดซับ คือ เปลือกส้ม และกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  นั้น ได้มีการคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการทดลอง ได้แก่ สารเคมี ปริมาณวัสดุ ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า เป็นต้น มีรายละเอียด ผลวิเคราะห์ ดังนี้ (อ้างอิงผลจาก ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการทำวิจัยในการบำบัดน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร

| ขั้นตอน                                       | รายละเอียด         |                             | ปริมาณที่ใช้ | เวลา (ชั่วโมง) | ราคา                    | ราคาสุทธิ     |
|---|--------------------|-----------------------------|--------------|----------------|-------------------------|---------------|
|   |                    |                             |              |                | AR Grade                | (บาท)         |
| ปรับปรุง วัสดุ                                | วัสดุ <sup>1</sup> | กากชานอ้อย                  | 0.1 g        |                | 400 บาท/ตัน.            | 0.00004       |
|   |                    | NaOH (0.8 mol/L)            | 0.25 ml      |                | 335 บาท/Kg.             | 0.003         |
|   | สารเคมี            | $\text{CaCl}_2$ (0.8 mol/L) | 0.25 (ml)    |                | 290 บาท/500 g           | 0.005         |
|   |                    | Ethanol                     | 0.50 ml      |                | 900 บาท/215 L           | 0.18          |
|   | ค่าน้ำ             | ล้างสารเคมี                 | 2.5          |                | 9.50 บาท/m <sup>3</sup> | 0.02          |
|   | ค่าไฟฟ้า*          | เตาอบ (1300 W)              | 31.20 unit   | 24             | 2.76 บาท/ unit          | 86.11         |
| <b>รวมค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงวัสดุ (บาท)</b> |                    |                             |              |                |                         | <b>86.31</b>  |
| การดูดซับ                                     | ค่าไฟฟ้า*          | เครื่องเขย่า (150 W)        | 0.15 unit    | 1              | 2.76 บาท/ unit          | 0.41          |
| การ คายซับ                                    | สารเคมี            | HCl (0.05 mol/L)            | 25 ml        |                | 350 บาท/2.5 L           | 0.02          |
|   | ค่าน้ำ             | ล้างสารเคมี                 | 2.5          |                | 9.50 บาท/m <sup>3</sup> | 0.02          |
|   | ค่าไฟฟ้า*          | เตาอบ (1300 W)              | 31.20 unit   | 24             | 2.76 บาท/ unit          | 86.11         |
|   |                    | เครื่องเขย่า (150 W)        | 0.08 unit    | 0.50           | 2.76 บาท/ unit          | 0.21          |
| <b>รวมค่าใช้จ่ายของการคายซับ (บาท)</b>        |                    |                             |              |                |                         | <b>86.36</b>  |
| <b>รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)</b>             |                    |                             |              |                |                         | <b>173.08</b> |

หมายเหตุ \* คิดในอัตราค่าไฟฟ้าของกิจการขนาดเล็ก (2.76 บาท/unit)

<sup>1</sup> วัสดุเปลือกส้มที่นำมาใช้เป็นเศษวัสดุไม่มีราคาซื้อขายในท้องตลาด

จากการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการทำวิจัยบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนทองแดง และนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 ml ทำการบำบัดแบบแบตช์ 1 ครั้ง ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าในตารางที่ 4.5 เมื่อรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดคิดเป็นจำนวนเงิน 173.08 บาท โดยในขั้นตอนการปรับปรุงวัสดุด้วยสารเคมีชนิด AR Grade พบว่า ต้นทุนจะอยู่ที่ 86.31 บาท ต่อการดูดซับ 1 ครั้ง และเมื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการคายซับหลังจากทำการดูดซับแล้ว มีต้นทุนอยู่ที่ 86.36 บาท ส่วนใหญ่จะหมดไปกับค่าไฟฟ้า มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 86.34 บาท ส่วนราคา สารเคมีที่ใช้ในการคายซับมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 0.02 บาท ดังนั้น ในการวิเคราะห์ต้นทุนของการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในครั้งนี้ถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการคายซับเท่ากับราคาปรับปรุงวัสดุใหม่ หากคิดค่าการจัดการ เช่น ค่าแรง ค่าบริหารจัดการอื่นๆ ถือว่าไม่คุ้มค่า

ในการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนทองแดงที่ความเข้มข้น 150.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิเกิลที่ความเข้มข้น 250.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ทำการบำบัดแบบแบดซ์ 1 ครั้ง ระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ได้ทำการคิดเทียบกับความเข้มข้นน้ำเสียในการทดลองที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของราคาสารเคมีเกรด Commercial ค่าใช้จ่ายทั้งหมดคิดเป็นจำนวนเงิน 1,272.42 บาท โดยค่าการปรับปรุงวัสดุดูดซับ และค่าน้ำ-ค่าไฟ เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับ 1 ครั้ง มีต้นทุนอยู่ที่ 1,112.85 บาท ส่วนการคายซับจะมีต้นทุนอยู่ที่ 157.54 บาท จะหมดไปกับค่าน้ำ-ค่าไฟฟ้าเป็นจำนวนเงิน 95.37 บาท ส่วนราคาสารเคมีเป็นจำนวนเงิน 62.17 บาท จะเห็นว่าค่าใช้จ่ายของการคายซับใช้ต้นทุนน้อยกว่าการปรับปรุงวัสดุใหม่ ดังนั้น การคายซับวัสดุดูดซับจึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากต้นทุนในการทำการคายซับวัสดุไม่สูงมาก และยังช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะของการปรับสภาพกากขอน้อยที่เหมาะสม ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกส้ม และกากขอน้อยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสีย ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับของเปลือกส้ม และกากขอน้อยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลในน้ำเสีย ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารปรับสภาพที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการปรับสภาพกากขอน้อย คือ NaOH 0.8 mol/L และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L

2. ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับก่อน และหลังปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> พบว่า วัสดุที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ ลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระ มีปริมาณรูพรุนที่มากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

3. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้ในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล ด้วยเปลือกส้ม และกากขอน้อยปรับปรุงคุณภาพ คือ พีเอช 5 และใช้เวลา 60 นาที

4. ไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถเป็นได้ทั้งแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช จึงบอกได้ว่าลักษณะพื้นผิววัสดุเป็นแบบเดียวกันหมด และกระบวนการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียเป็นได้ทั้งแบบชั้นเดียว (Monolayer Sorption) และเป็น การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Sorption) ส่วนการดูดซับน้ำเสียนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ และการดูดซับน้ำเสียทองแดง และนิกเกิลด้วยกากขอน้อยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่น้อยเกินไป จึงไม่สามารถระบุได้ว่ากลไกของการดูดซับอยู่ในรูปแบบใด เพราะผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับทฤษฎี

5. เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง 50 mg/L และนิกเกิล 50 mg/L มาทำการดูดซับโดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 mol/L และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L ในสภาวะที่ใช้บำบัด คือ พีเอช 5 และเวลา 60 นาที จะพบว่า เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้ 79.44±0.96 % และนิกเกิลได้ 78.39±1.25 % และเมื่อใช้กากขอน้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 mol/L และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L มาดูดซับโลหะ โดยใช้สภาวะเดียวกัน จะพบว่า กากขอน้อยปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้ 77.26±6.34 % และนิกเกิลได้ 78.04±1.19 %

6. เมื่อใช้น้ำเสียจากโรงงานที่มีทองแดงความเข้มข้น 150.50 mg/L และนิกเกิลความเข้มข้น 250.50 mg/L ทำการดูดซับโดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 mol/L และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L ในสภาวะที่ใช้บำบัด คือ พีเอช 5 และเวลา 60 นาที พบว่า เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้ 71.39±2.97 % และนิกเกิลได้ 76.87±3.44 % และเมื่อใช้กากขอน้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 mol/L และ CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L มาดูดซับโลหะ โดยใช้สภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกัน จะพบว่า กากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับทองแดงได้  $70.74 \pm 3.13$  % และ นิกเกิลได้  $76.12 \pm 2.49$  %

7. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดงความเข้มข้น 150.50 mg/L และนิกเกิลความเข้มข้น 250.50 mg/L ปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรจะเป็นเงิน 1,272.42 บาท ซึ่งมีฐานการพิจารณาเฉพาะค่าสารเคมี ค่าวัสดุ ค่าน้ำ และค่าไฟฟ้าเท่านั้น ถือว่ามีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากนัก

8. ในการวิเคราะห์ต้นทุนของการทำวิจัยครั้งนี้มีค่าใช้จ่ายในการคายซับเท่ากับราคาปรับปรุงวัสดุใหม่จึงถือว่าไม่มีความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

9. วัสดุดูดซับสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ถึง 3 ครั้ง โดยในการนำมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1-3 ประสิทธิภาพประสิทธิภาพการดูดซับจะสูง คือ ประมาณ 60%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปทดลองใช้จริงกับโรงงาน
- 5.2.2. ควรศึกษาในรูปแบบคอลัมน์เพื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองแบบแบตช์
- 5.2.3. ควรมีการศึกษาโลหะหนักหลังจากทำการคายซับแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่
- 5.2.4. ควรมีการศึกษาการดูดซับกับน้ำเสียโลหะผสม
- 5.2.5. ควรมีการศึกษาแนวทางในการกำจัดเปลือกส้ม และกากขานอ้อยหลังจากที่ได้ทำการดูดซับโลหะหนักแล้ว เพื่อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม
- 5.2.6. ควรมีการศึกษาถึงวัสดุดูดซับชนิดอื่นในการนำมาดูดซับโลหะทองแดง และนิกเกิล
- 5.2.7. ควรที่จะมีการทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับนอกเหนือจากแลงเมียร์ และ ฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html). สืบค้นเมื่อ 2 พ.ค. 2557.
- กรมพลังงานงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. โครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสเชิงพาณิชย์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://webkc.dede.go.th/webmax/sites/default/files/Final%20Report.pdf>. สืบค้นเมื่อ 18 ธ.ค. 2558.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. พลังงานชีวมวล. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.dede.go.th/kmmf/download/นวัตกรรม/สวค./พลังงานชีวมวล.pdf>. สืบค้นเมื่อ 2 พ.ค. 2557.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. อุตสาหกรรมชุบโลหะ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://www2.diw.go.th/Standard/Web/pane\\_files/Industry26.asp](http://www2.diw.go.th/Standard/Web/pane_files/Industry26.asp). สืบค้นเมื่อ 2 พ.ค. 2557.
- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2553. การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ. กระทรวงวิทยาศาสตร์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR2.pdf>. สืบค้นเมื่อ 25 มี.ค. 2557.
- กิตติพันธ์ บางยี่ขัน. 2557. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ - โลหะกับการพัฒนา. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.dpim.go.th/service/download?articleid=3269>. สืบค้นเมื่อ 2 พ.ค. 2557.
- กุหลาบ สิทธิสวนจิก, พริยา โชติอนอม และ ชัตติยา ชิมวงษ์. 2555. “ผลของวิธีการเตรียมต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและสมบัติเชิงหน้าที่ของใยอาหารผงจากกากส้มเขียวหวาน”. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา. 43(2)(พิเศษ) : 233-236.
- เกียรติพงษ์ ได้การ. 2555. เครื่องวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/88> เครื่องวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์-xrf.html. สืบค้นเมื่อ 20 มี.ค. 2557.
- จันทนา ไพรบูรณ์, ไศรดากรณ์ พิมลา, มัทริยา แหะเหย็บ และอนงค์ จิรภัทร. 2555. “การดูดซับสีเขียวอมเบสีกด้วยสาหร่ายสีเขียว *Spirogyra sp.*”. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(1) : 242-253.
- จิราวรรณ ศรีใส. 2553. “ผลผลิตและปฏิกิริยาของสายพันธุ์อ้อยต่อการเข้าทำลายของหนอนกอปลวกและโรคอ้อยในสภาพพื้นที่ปลูกแตกต่างกัน”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัญชิตา สายขุมดี. 2556. การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยการใช้เครื่อง AAS. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/เครื่องAAS.pdf>. เอกสารนี้เป็นสืบค้นเมื่อ 20 มี.ค. 2557. ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชวณัฐ สิทิติลกรัตน์, พิลาณี ไวถนอมสัจย์, จิราพร เชื้อกุล และปรีศนา สิริอาษา. 2548. “การผลิตเพคตินจากเปลือกและกากผลส้มเหลืองทิ้ง”. หน้า 469-480. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43 : สาขาสัตว์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ซันนันทน์ นิवासวงษ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. “การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย”. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(4) : 1073-1088. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol\\_40\\_No\\_4\\_P\\_1073-1088.pdf](http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_40_No_4_P_1073-1088.pdf). สืบค้นเมื่อ 6 พ.ค. 2558.
- ชุติมา เสพย์ธรรม. 2543. “การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยแกลบเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทิวาสวัสดิ์ สิริโสม. 2553. “ผลของการดัดแปรไดอะทอมไมต์ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนัก”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธิตติมา รักธรรมดี และมนตรี ไชยสัตถุส. 2544. “การศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำเสียด้วยชานอ้อยที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิมิตร ตั้งเสริมมงคล และประพนธ์ มณีสหพงษ์. 2545. “คอมโพสิตจากขูดพอลิسترินที่ใช้แล้วกับเส้นใยชานอ้อย”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นงภัท ไชยวิทิตกุล. 2555. คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง. นครราชสีมา : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- น.ม.ส. (นามแฝง). 2550. การผลิตและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมน้ำตาล. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.vcharkarn.com/varticle/33115>. สืบค้นเมื่อ 18 ธ.ค. 2558.
- น.ม.ส. (นามแฝง). 2553. ชนิดของ Infrared Spectrophotometer. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://share.psu.ac.th/blog/aym2/16858>. สืบค้นเมื่อ 16 พ.ค. 2557
- น.ม.ส. (นามแฝง). 2557. บทความวิชาการ : "ส้ม" ประโยชน์ทั้งลูก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.vcharkarn.com/varticle/43939>. สืบค้นเมื่อ 22 มี.ค. 2557.
- นนทชัย เพิ่มพงศาเจริญ, ปวีณา พลนวน และวิฑูรย์ คุณานิช. 2553. “การศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เปรมปรี ฌ สงขลา. 2544. คู่มือการลงทุนทำสวนส้มอย่างมืออาชีพ : เคหการเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : หจก.มิตรเกษตรการตลาดและโฆษณา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปณณมา ศิริพันธ์โนน และภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2554. “การพัฒนาสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดนาโน สำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม”. หน้า 4-10. ใน งานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน : คณะวิทยาศาสตร์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พาวิณ มะโนชัย. 2557. สัม. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/ps416/chap\\_05.html](http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/ps416/chap_05.html). สืบค้นเมื่อ 22 มี.ค. 2557.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2555. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/139-ftir-raman-spectrometer.html> . สืบค้นเมื่อ 1 พ.ค. 2557.
- มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2555. Scanning Electron Microscope (SEM). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>. สืบค้นเมื่อ 1 พ.ค. 2557.
- ยุพดี เส้นขาว. 2557. “การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยมะขามและเปลือกทับทิม”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 22(2) : 184-201.
- วัชรီ คตินนทกุล และเจนจิรา ภูริรักษ์พิติกกร. 2556. “การปรับสภาพเปลือกข้าวโพดและเปลือกมะพร้าวด้วยของเหลวไอออนิก เพื่อเพิ่มผลผลิตน้ำตาลกลูโคส”. *Bulletin of Applied Science*, 2 : 26-34. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://lib3.dss.go.th/fulltext/bulletin\\_science/bas\\_vol2\\_no2\\_2013\\_P26-34.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/bulletin_science/bas_vol2_no2_2013_P26-34.pdf). สืบค้นเมื่อ 22 มี.ค. 2557.
- วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2557. Scanning Electron Microscopy (SEM). [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-electron-microscopysem.html>. สืบค้นเมื่อ 2 ก.ค. 2557.
- วิลาสินี ศรีมุงคุณ. 2548. “การใช้ประโยชน์จากขานอ้อยและเถาขานอ้อยเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศศิธร พุทธวงษ์. 2551. “กลไกการบำบัดโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ชนิดที่ให้น้ำไหลเหนือพื้นผิว (ระยะที่ 2)”. ใน รายงานการวิจัยสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ศานิต ไชยยะ. 2547. “อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซต์”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ (เคมีสิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สราวุธ ศรีคุณ. 2550. “การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ที่

สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สมบูรณ์ ประยามศรีเมฆ. 2548. “การบำบัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เซสเหล็ก”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุดารัตน์ สัตยากุล, สุรเชษฐ์ สุริยะ และธนอร ลิกขไชย. (2556). ไอโซเทอมการดูดซับสีแอสซิดโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากกาแฟ, ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 20-21.
- สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์. 2549. “การดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโดยสาหร่าย”. หน้า 55-57. ใน รายงานการวิจัยภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุพะไชย จินดาวงศ์กุล. 2555. “การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ”. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 60(189) : 22-24.
- สำนักงานพาณิชย์จังหวัดเชียงใหม่. 2553. บทวิเคราะห์-สัมเขี้ยวหวาน. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://tisc.feu.ac.th/input/file\\_upload/PDFบทวิเคราะห์-สัมเขี้ยวหวาน\\_2010\\_12\\_17\\_00\\_59\\_21.pdf](http://tisc.feu.ac.th/input/file_upload/PDFบทวิเคราะห์-สัมเขี้ยวหวาน_2010_12_17_00_59_21.pdf). สืบค้นเมื่อ 19 ธ.ค. 2558.
- หฤทัย ศิระวงษ์. 2547. “การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับประจุโลหะของกากมันสำปะหลัง โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันกับกรดซัลฟิวริก”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- หัสวีภา หมายมัน. 2555. Scanning Electron Microscope : SEM. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscrope.html>. สืบค้นเมื่อ 2 ก.ค. 2557.
- อรทัย วิเศษรัตน์, รินรดี งามสมบัติ, ปานใจ สือประเสริฐลลิตี และจิตติมา ประสาระเอ. 2556. “การดูดซับน้ำมันโดยใช้ขานอ้อยและขนอ้อยปรับสภาพ”. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 31(4) : 354-362.
- อรพิน โทนเตี้ยว. 2554. “การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้กากชา”. หน้า 654-661. ใน การประชุมทางวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อภิชาติ ศรีสะอาด. 2545. คู่มือการทำสวนส้มอย่างมืออาชีพ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ก.พล (1996).
- อัญชุลี เลิศสงคราม. 2554. “การดูดซับโลหะหนักโดยวิธีทางชีวภาพ”. วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนาองค์การเภสัชกรรม. 18(3) : 17-22.
- อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล. 2554. “การเตรียมเซลล์โลสฟอสเฟตที่มีความสามารถ ในการแลกเปลี่ยนประจุสูงจากขานอ้อย และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุดังกล่าว”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์. 2547. “การศึกษาการใช้ประโยชน์ของจอกหูหนู และผักตบชวาในการดูดซับสารอินทรีย์”. หน้า 10-18. ใน รายงานการวิจัยภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Ana Maria Torrado, Sandra Cortes, Jose Manuel Salgado, Belem Max, Noelia Rodriguez, Belindo P. Bibbins, Attilio Converti and Jose Manuel Dominguez. 2011. “Citric acid Production from Orange peel Wastes by Solid-State Fermentation”. *Brazilian Journal of Microbiology*. 42 : 394-409.
- Bo Zhang and Abolghasem Shahbazi. 2011. “Recent Developments in Pretreatment Technologies for Production of Lignocellulosic Biofuels”. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology*. 2(2) : 1-8. [Online]. Available : <http://www.omicsonline.org/2157-7463/2157-7463-2-108.pdf>., Access Date 12 November 2014.
- Brian C. Smith. 1996. What is FT-IR? : Schematic illustration of FTIR system. [Online]. Available : <http://epic.ms.northwestern.edu/Keckll/ftir1.asp>. Access Date 10 July 2014.
- Feng Ning-chuan and Guo Xue-yi. 2012. “Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 22 : 1224-1231.
- Feng Ning-chuan, Guo Xue-yi, and LIANG Sha. 2009. “Kinetic and thermodynamic studies on biosorption of Cu(II) by chemically modified orange peel”. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 19 : 1365-1370.
- Fred Hochgraf. 2557. Scanning Electron Microscopes (SEM). [Online]. Available : <http://www.nhml.com/scanning-electron-microscopes-sem.cfm>. Access Date 19 October 2014.
- Panda G.C., Das S.K., Guha A.K. 2008. “Biosorption of cadmium and nickel by functionalized husk of *Lathyrus sativus*”. *Colloids and Surfaces B : Biointerfaces*. 62 : 173-179.
- Jame s Glyn. 2004. Sugarcane. 2<sup>nd</sup> ed. United Kingdom : Oxford.
- Leandro Vinicius Alues Gugel and Laurent Frederic Gil. 2009. “Adsorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) from aqueous singlemetal solutions by succinylated twice-mercerized sugarcane bagasse functionalized with triethylenetetramine”. *Water Research*. 43 : 4479-4488.
- n.p. (no place of publishing). n.d. (no date). **Introduction to Pectin – Structure**. [Online]. Available : <http://www.cybercolloids.net/information/technical-articles/introduction-pectin-structure>. Access Date 1 October 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pehlivan E., Tran H.T., Ouédraogo W.K.I., Schmidt C., Zachmann D. and Bahadir M.. 2013. "Sugarcane bagasse treated with hydrous ferric oxide as a potential adsorbent for the removal of As(V) from aqueous solutions". *Food Chemistry*. 138 : 133-138.
- Ravindra Kumar Gautam, Ackmez Mudhoob, Giusy Lofranoc and Mahesh Chandra Chattopadhyayaa. 2014. "Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration : Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2 : 239-259.
- Xiaomin Li, Yanru Tang, Xiuju Cao, Dandan Lu, Fang Luo and Wenjing Shao. 2008. "Preparation and evaluation of orange peel cellulose adsorbents for effective removal of cadmium, zinc, cobalt and nickel". *Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects*. 317 : 512-521.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

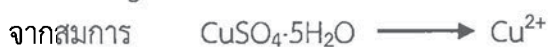
## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารละลาย

#### 1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

##### 1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง

ต้องการเตรียมสารละลายทองแดงเข้มข้น 1,000 mg/L คำนวณหาปริมาณคอปเปอร์ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ต้องใช้ โดยน้ำหนักโมเลกุล (MW) ของคอปเปอร์ซัลเฟต เท่ากับ 249.50 mg



จะได้  $\text{Cu}^{2+}$  63.50 mg อยู่ใน  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 249.50$  mg

ถ้า  $\text{Cu}^{2+}$  1,000 mg อยู่ใน  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = (249.50 \text{ mg} \times 1,000 \text{ mg}) / 63.50 \text{ mg}$   
 $= 3,929.13 \text{ mg/L}$

ดังนั้น สารละลายทองแดงเข้มข้น 1,000 mg/L จะใช้ปริมาณ  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  3.9291 กรัมต่อน้ำ 1 L

##### 1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล

ต้องการเตรียมสารละลายนิกเกิลเข้มข้น 1,000 mg/L คำนวณหาปริมาณนิกเกิลซัลเฟต เฮกซะไฮเดรต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ต้องใช้ โดยน้ำหนักโมเลกุล (MW) ของนิกเกิลซัลเฟต เท่ากับ 262.76 mg



จะได้  $\text{Ni}^{2+}$  58.70 mg อยู่ใน  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 262.70$  mg

ถ้า  $\text{Ni}^{2+}$  1,000 mg อยู่ใน  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = (262.70 \text{ mg} \times 1,000 \text{ mg}) / 58.70 \text{ mg}$   
 $= 4,475.30 \text{ mg/L}$

ดังนั้น สารละลายนิกเกิลเข้มข้น 1,000 mg/L จะใช้ปริมาณ  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  4.4753 กรัมต่อน้ำ 1 L

#### 2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน $\text{Cu}^{2+}$ และ $\text{Ni}^{2+}$ ที่ความเข้มข้น 50 mg/L

##### 2.1 การคำนวณหาปริมาตรสารละลาย ที่ความเข้มข้น 50 mg/L

ต้องการสารละลายที่ความเข้มข้น 50 mg/L จากสารละลายสต็อกที่เตรียมไว้ก่อนหน้าความเข้มข้น 1,000 mg/L ที่ปริมาตร 1,000 ml

จากสูตร  $M_1V_1 = M_2V_2$

จะได้  $(1,000 \text{ mg/L}) \times V_1 = (50 \text{ mg/L}) \times (1,000 \text{ ml})$

$= 50 \text{ ml}$

ดังนั้น จะต้องใช้ปริมาตรสารละลายเริ่มต้น 50 ml เพื่อเตรียมสารละลายความเข้มข้น 50 mg/L

### 3. การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุอุตสาหกรรม

แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณสารละลายที่ต้องเตรียม เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุอุตสาหกรรมในการทดลองเพียงบางความเข้มข้นของสารละลาย

#### 3.1 การเตรียม NaOH 0.8 mol/L

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย NaOH 0.8 mol/L ในปริมาตร 500 ml

$$\begin{aligned} \text{เมื่อมวลโมเลกุล (MW) ของ NaOH} &= 23 + 16 + 1 = 40 \text{ g/mole} \\ \text{สารละลาย NaOH 1,000 ml} &= \text{สารละลาย NaOH 500 ml} \\ \hline \text{มี NaOH 0.8 mole} & \qquad \qquad \qquad \text{มี NaOH (mole)} \\ \text{NaOH (mole)} &= \frac{\text{NaOH 0.8 mole} \times \text{สารละลาย NaOH 500 ml}}{\text{สารละลาย NaOH 1,000 ml}} \\ &= 0.40 \text{ mole} \times 40 \text{ g/mole} \\ &= 16 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ NaOH จำนวน 16 กรัม ละลายน้ำให้มีปริมาตรเป็น 500 ml

#### 3.2 การเตรียม CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L

ต้องการเตรียมสารละลาย CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L ในปริมาตร 250 ml

$$\begin{aligned} \text{เมื่อมวลโมเลกุล (MW) ของ CaCl}_2 &= 40 + (35.5 \times 2) = 111 \text{ g/mole} \\ \text{สารละลาย CaCl}_2 \text{ 1,000 ml} &= \text{สารละลาย CaCl}_2 \text{ 250 ml} \\ \hline \text{มี CaCl}_2 \text{ 0.8 mole} & \qquad \qquad \qquad \text{มี CaCl}_2 \text{ (mole)} \\ \text{CaCl}_2 \text{ (mole)} &= \frac{\text{CaCl}_2 \text{ 0.8 mole} \times \text{สารละลาย CaCl}_2 \text{ 250 ml}}{\text{สารละลาย CaCl}_2 \text{ 1,000 ml}} \\ &= 0.20 \text{ mole} \times 111 \text{ g/mole} \\ &= 22.20 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ CaCl<sub>2</sub> จำนวน 22.20 กรัม ละลายน้ำให้มีปริมาตรเป็น 250 ml

### 4. การเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการทดลอง

#### 4.1 การเตรียม NaOH 0.1 mol/L

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย NaOH 0.1 mol/L ในปริมาตร 100 ml

$$\begin{aligned} \text{เมื่อมวลโมเลกุล (MW) ของ NaOH} &= 23 + 16 + 1 = 40 \text{ g/mole} \\ \text{สารละลาย NaOH 1,000 ml} &= \text{สารละลาย NaOH 100 ml} \\ \hline \text{มี NaOH 0.1 mole} & \qquad \qquad \qquad \text{มี NaOH (mole)} \\ \text{NaOH (mole)} &= \frac{\text{NaOH 0.1 mole} \times \text{สารละลาย NaOH 100 ml}}{\text{สารละลาย NaOH 1,000 ml}} \\ &= 0.01 \text{ mole} \times 40 \text{ g/mole} \\ &= 0.40 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ NaOH จำนวน 0.40 กรัม ละลายน้ำให้มีปริมาตรเป็น 100 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การเตรียม HCl 0.1 mol/L

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย HCl 0.1 mol/L ในปริมาตร 100 ml ใน HCl จากขวดจะมี ปริมาณเนื้อกรด 37% w/v , density = 1.19 g/ml , MW = 36.5 g/mole

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{หาปริมาณความเข้มข้นของ HCl จาก C (mol/L)} &= \frac{10 \times D \text{ (g/ml)} \times \% \text{ HCl}}{\text{MW (g/mole)}} \\ &= \frac{10 \times 1.19 \text{ (g/ml)} \times 37}{36.5 \text{ g/mole}} \\ &= 12.0630 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

จะได้

$$\begin{aligned} (12.0630 \text{ mol/L}) \times V_1 &= (0.1 \text{ mol/L}) \times (100 \text{ ml}) \\ &= 0.83 \text{ ml} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ปริมาตร HCl เริ่มต้น 0.83 ml เพื่อเตรียมสารละลาย HCl 0.1 mol/L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

#### 1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานในการวัดด้วยเครื่อง AAS

##### อุปกรณ์และสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 100 mg/L\*
2. สารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 100 mg/L\*
3. น้ำปราศจากไอออน
4. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml
5. ปิเปต 1, 5, 10 mL
6. บีกเกอร์

##### วิธีการวัดความเข้มข้นของ $\text{Cu}^{2+}$

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาณ 1 ml เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 10 mg/L
2. เตรียมสารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 mg/L โดยปิเปตสารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 10 mg/L จำนวน 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 ml ตามลำดับ เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 50 ml
3. เก็บสารละลายมาตรฐาน  $\text{Cu}^{2+}$  ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 mg/L ไว้ในขวดพลาสติก เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐานในการวัดความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

##### วิธีการวัดความเข้มข้นของ $\text{Ni}^{2+}$

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 1000 mg/L ปริมาณ 1 ml เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดปริมาตร 100 ml จะได้สารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 10 mg/L
2. เตรียมสารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 mg/L โดยปิเปตสารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 10 mg/L จำนวน 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5, 10.0 และ 15.0 ml ตามลำดับ เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 50 ml
3. เก็บสารละลายมาตรฐาน  $\text{Ni}^{2+}$  ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 mg/L ไว้ในขวดพลาสติก เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐานในการวัดความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง AAS
- 4.

**หมายเหตุ :** \* ทางห้องปฏิบัติการได้เตรียมสต็อกน้ำไว้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กราฟของสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง

### 2.1 การปรับสภาพกากชานอ้อย

ตารางที่ ข-1 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการปรับสภาพ

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.197              | 0.0233                  |
| 0.40                       | 0.376              | 0.0449                  |
| 0.60                       | 0.638              | 0.0769                  |
| 0.80                       | 0.822              | 0.0997                  |
| 1.00                       | 0.999              | 0.1220                  |
| 1.20                       | 1.202              | 0.1480                  |
| 1.40                       | 1.387              | 0.1720                  |
| 1.60                       | 1.577              | 0.1972                  |



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการแปรผันค่าความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากชานอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 การปรับสภาพกากขี้ (ต่อ)

ตารางที่ ข-2 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการปรับสภาพ

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.1690             | 0.0071                  |
| 0.40                       | 0.4610             | 0.0195                  |
| 0.60                       | 0.5400             | 0.0228                  |
| 0.80                       | 0.8200             | 0.0345                  |
| 1.00                       | 1.0320             | 0.0433                  |
| 1.50                       | 1.4810             | 0.0617                  |
| 2.00                       | 2.0540             | 0.0850                  |
| 3.00                       | 2.9140             | 0.1193                  |



รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ใช้ศึกษาการแปรผันค่าความเข้มข้นของสารปรับสภาพกากขี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ ข-3 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.176              | 0.0207                  |
| 0.40                       | 0.395              | 0.0479                  |
| 0.60                       | 0.638              | 0.0800                  |
| 0.80                       | 0.843              | 0.1092                  |
| 1.00                       | 1.039              | 0.1387                  |
| 1.20                       | 1.207              | 0.1655                  |
| 1.40                       | 1.378              | 0.1943                  |
| 1.60                       | 1.528              | 0.2210                  |



รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ข-4 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.190              | 0.0153                  |
| 0.40                       | 0.405              | 0.0323                  |
| 0.60                       | 0.603              | 0.0477                  |
| 0.80                       | 0.814              | 0.0639                  |
| 1.00                       | 1.014              | 0.0791                  |
| 1.50                       | 1.512              | 0.1159                  |
| 2.00                       | 2.017              | 0.1520                  |
| 3.00                       | 2.936              | 0.2148                  |



รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของ pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การหาสถานะที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ข-5 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.195              | 0.0229                  |
| 0.40                       | 0.377              | 0.0445                  |
| 0.60                       | 0.640              | 0.0765                  |
| 0.80                       | 0.824              | 0.0993                  |
| 1.00                       | 1.000              | 0.1216                  |
| 1.20                       | 1.202              | 0.1476                  |
| 1.40                       | 1.385              | 0.1716                  |
| 1.60                       | 1.574              | 0.1967                  |



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ข-6 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.158              | 0.0119                  |
| 0.40                       | 0.412              | 0.0313                  |
| 0.60                       | 0.625              | 0.0477                  |
| 0.80                       | 0.839              | 0.0644                  |
| 1.00                       | 1.045              | 0.0808                  |
| 1.50                       | 1.538              | 0.1207                  |
| 2.00                       | 2.020              | 0.1609                  |
| 3.00                       | 2.854              | 0.2355                  |



รูปที่ ข-6 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การหาไอโซเทอร์ม

ตารางที่ ข-7 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาไอโซเทอร์ม

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.202              | 0.0213                  |
| 0.40                       | 0.388              | 0.0412                  |
| 0.60                       | 0.596              | 0.0638                  |
| 0.80                       | 0.816              | 0.0884                  |
| 1.00                       | 1.020              | 0.1123                  |
| 1.20                       | 1.214              | 0.1363                  |
| 1.40                       | 1.397              | 0.1611                  |
| 1.60                       | 1.553              | 0.1864                  |



รูปที่ ข-7 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การหาไอโซเทอร์ม (ต่อ)

ตารางที่ ข-8 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาไอโซเทอร์ม

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.175              | 0.0161                  |
| 0.40                       | 0.389              | 0.0292                  |
| 0.60                       | 0.647              | 0.0486                  |
| 0.80                       | 0.821              | 0.0618                  |
| 1.00                       | 1.032              | 0.0779                  |
| 1.50                       | 1.539              | 0.1168                  |
| 2.00                       | 2.005              | 0.1529                  |
| 3.00                       | 2.882              | 0.2218                  |



รูปที่ ข-8 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับ/การคายซับ/การนำกลับมาใช้ใหม่

ตารางที่ ข-9 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาประสิทธิภาพการดูดซับ

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.174              | 0.0198                  |
| 0.40                       | 0.431              | 0.0497                  |
| 0.60                       | 0.624              | 0.0730                  |
| 0.80                       | 0.811              | 0.0962                  |
| 1.00                       | 1.004              | 0.1207                  |
| 1.20                       | 1.191              | 0.1451                  |
| 1.40                       | 1.392              | 0.1721                  |
| 1.60                       | 1.571              | 0.1970                  |



รูปที่ ข-9 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาประสิทธิภาพการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การหาประสิทธิภาพในการดูดซับ/การคายซับ/การนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

ตารางที่ ข-10 ผล AAS ของมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาประสิทธิภาพการดูดซับ

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) | ความเข้มข้น (mg/L) | ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.) |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0.00                       | 0.000              | 0.0000                  |
| 0.20                       | 0.186              | 0.0137                  |
| 0.40                       | 0.386              | 0.0285                  |
| 0.60                       | 0.642              | 0.0473                  |
| 0.80                       | 0.810              | 0.0596                  |
| 1.00                       | 1.013              | 0.0746                  |
| 1.50                       | 1.535              | 0.1128                  |
| 2.00                       | 2.010              | 0.1476                  |
| 3.00                       | 2.910              | 0.2131                  |



รูปที่ ข-10 กราฟมาตรฐานสารละลายโลหะนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) ที่ใช้ศึกษาการหาประสิทธิภาพการดูดซับ

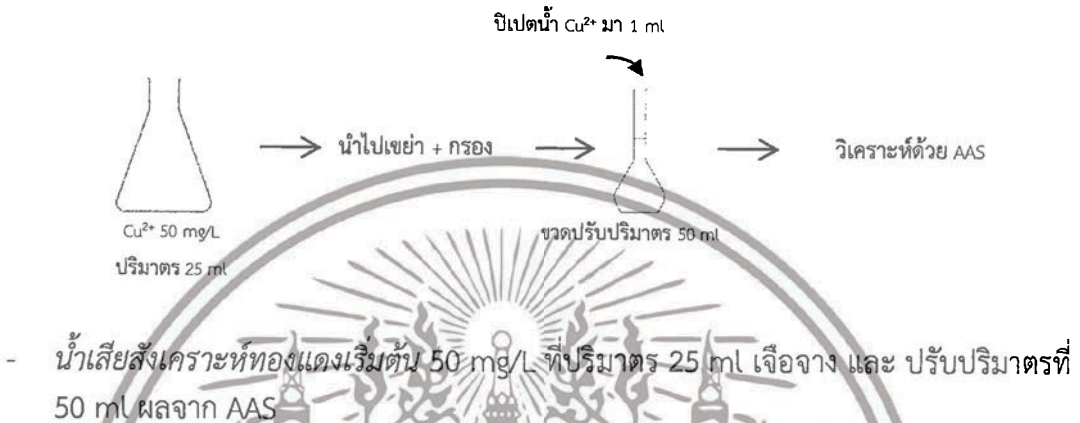
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณผลการทดลอง

#### 1. การคำนวณผลการทดลองหลังจากที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

ตัวอย่าง การคำนวณผลการทดลองดูดซับน้ำเสียทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ pH 2



$$\text{ครั้งที่ 1} = 1.005 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 50.25 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 0.966 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 48.30 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 0.972 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 48.60 \text{ mg/L}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง} = 49.05 \text{ mg/L}$$



- น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงชุดควบคุม (ปรับค่าน้ำให้เป็น pH 2) ที่ปริมาตร 25 ml เจือจาง และ ปรับปริมาตรที่ 50 ml ผลจาก AAS

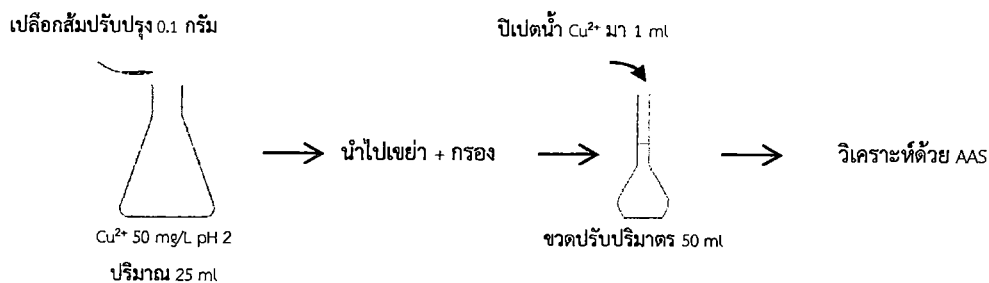
$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.932 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 46.60 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 0.923 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 46.15 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 0.909 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 45.45 \text{ mg/L}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง} = 46.07 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ดูดซับแล้ว (ปรับค่าน้ำให้เป็น pH 2) ที่ปริมาตร 25 ml ดูดซับด้วยเปลือกส้มปรับปรุรง 0.1 g เจือจาง และ ปรับปริมาตรที่ 50 ml ผลจาก AAS

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.331 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 16.55 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 0.320 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 16.00 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 0.333 \text{ mg/L} \times 50 \text{ เท่า} = 16.65 \text{ mg/L}$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง} = 16.40 \text{ mg/L}$$

### 1.1 การคำนวณหาการตกตะกอน (%)

$$\text{การตกตะกอน (\%)} = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (mg/L)

$C_1$  คือ ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ชุดควบคุม (mg/L)

จะได้

$$\begin{aligned} \text{ครั้งที่ 1} &= \frac{(50.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 46.60 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{50.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100 \\ &= 7.26 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ครั้งที่ 2} &= \frac{(48.30 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 46.15 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{48.30 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100 \\ &= 4.45 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ครั้งที่ 3} &= \frac{(48.60 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 45.45 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{48.60 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100 \\ &= 6.48 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ pH 2 เฉลี่ยทั้ง 3 ครั้ง เท่ากับ 6.07 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 การคำนวณหาการดูดซับ (%)

$$\text{การดูดซับ (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (mg/L)  
 $C_e$  คือ ค่าความเข้มข้นหลังดูดซับของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เสถียรดูดซับ (mg/L)

จะได้ ครั้งที่ 1 การดูดซับ (%) =  $\frac{(50.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 16.55 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{50.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100$

$$= 67.06 \%$$

ครั้งที่ 2 การดูดซับ (%) =  $\frac{(48.30 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 16.00 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{48.30 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100$

$$= 66.87 \%$$

ครั้งที่ 3 การดูดซับ (%) =  $\frac{(48.60 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 16.65 \frac{\text{mg}}{\text{L}})}{48.60 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \times 100$

$$= 65.74 \%$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ pH 2 เฉลี่ย เท่ากับ 62.91 %

## 1.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \text{การดูดซับ (\%)} - \text{การตกตะกอน (\%)}$$

จะได้

ครั้งที่ 1 ประสิทธิภาพการดูดซับ (%) =  $67.06 - 7.26 = 59.80 \%$

ครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับ (%) =  $66.87 - 4.45 = 62.42 \%$

ครั้งที่ 3 ประสิทธิภาพการดูดซับ (%) =  $65.74 - 6.48 = 59.26 \%$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับ (%) ทองแดงที่ pH 2 ทั้ง 3 ครั้ง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 60.49 %

## 2. การคำนวณหาค่าการคายซับ

คำนวณประสิทธิภาพในการคายซับ คำนวณจาก

$$\text{ประสิทธิภาพการคายซับ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารละลายก่อนคายซับ}}{\text{ความเข้มข้นของสารละลายหลังคายซับ}} \times 100$$

ตัวอย่าง คำนวณค่าการคายซับทองแดงออกจากเปลือกส้มปรับปรุง (จากภาคผนวก จ-15)

ครั้งที่ 1  $\text{Cu}^{2+}$  ก่อนคายซับ (mg/L) =  $(78.47 \times 47.15 \text{ mg/L}) / 100$   
 $= 37.00 \text{ mg/L}$

การคายซับ (%) ครั้งที่ 1 =  $(37.00 \text{ mg/L} / 37.00 \text{ mg/L}) \times 100 = 100 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ครั้งที่ 2 } \text{Cu}^{2+} \text{ ก่อนคายซับ (mg/L)} &= (80.39 \times 48.05 \text{ mg/L}) / 100 \\ &= 38.10 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{การคายซับ (\%)} \text{ ครั้งที่ 2} = (38.63 \text{ mg/L} / 37.55 \text{ mg/L}) \times 100 = 97.23 \%$$

$$\begin{aligned} \text{ครั้งที่ 3 } \text{Cu}^{2+} \text{ ก่อนคายซับ (mg/L)} &= (79.46 \times 47.95 \text{ mg/L}) / 100 \\ &= 38.10 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

$$\text{การคายซับ (\%)} \text{ ครั้งที่ 3} = (38.10 \text{ mg/L} / 37.15 \text{ mg/L}) \times 100 = 97.51 \%$$

ดังนั้น เปอร์เซนต์การคายซับทองแดงในครั้งแรกจากการทดลอง 3 ซ้ำ ออกจากเปลือกส้มมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.25 %

### 3. การคำนวณหาค่าความแตกต่างโดยใช้ Q-test

จากการทดลองจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์สารหนึ่งหลายๆ ครั้ง ผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาบางครั้งมีค่าแตกต่างไปจากค่าอื่นๆ ในกลุ่มมาก ถ้านำค่าที่ต่างไปนี้มารวมคิดค่าเฉลี่ยก็จะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยที่ไม่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องตัดสินใจว่าค่าตัวเลขอันนั้นไว้หรือตัดทิ้งไป จึงนำเกณฑ์ที่นิยม ได้แก่ การทดสอบแบบคว (Q-test) มาใช้ในการวิเคราะห์ค่า คำนวณจากสูตรต่อไปนี้

$$Q = \frac{\text{ความห่าง}}{\text{พิสัย}}$$

เมื่อ ความห่าง คือ ผลต่างระหว่างค่าที่เป็นปัญหากับค่าที่ใกล้เคียงกัน

พิสัย คือ ผลต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด

หลังจากที่คำนวณค่าที่ต้องการวิเคราะห์ได้แล้วนั้น จะนำค่าที่คำนวณได้เทียบกับตารางค่า Q ที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้จะเทียบกับตาราง Q ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 %

ตารางที่ ค-1 ค่า Q ที่ระดับความเชื่อมั่น 90 %, 95 % และ 99 %

| จำนวนครั้งที่วิเคราะห์<br>(N) | ระดับความเชื่อมั่น (%) |                 |                 |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|
|                               | Q <sub>90</sub>        | Q <sub>95</sub> | Q <sub>99</sub> |
| 3                             | 0.941                  | 0.970           | 0.994           |
| 4                             | 0.765                  | 0.829           | 0.926           |
| 5                             | 0.642                  | 0.710           | 0.821           |
| 6                             | 0.560                  | 0.625           | 0.740           |
| 7                             | 0.507                  | 0.568           | 0.680           |
| 8                             | 0.468                  | 0.526           | 0.634           |
| 9                             | 0.437                  | 0.493           | 0.598           |
| 10                            | 0.412                  | 0.466           | 0.568           |
| 15                            | 0.338                  | 0.384           | 0.475           |
| 20                            | 0.300                  | 0.342           | 0.425           |
| 25                            | 0.277                  | 0.317           | 0.393           |
| 30                            | 0.260                  | 0.298           | 0.372           |

ที่มา : [www.science.psu.ac.th/pdf/teaching/Analyze\\_chem3.pdf](http://www.science.psu.ac.th/pdf/teaching/Analyze_chem3.pdf). (สืบค้นเมื่อ 13 พฤษภาคม 2558).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

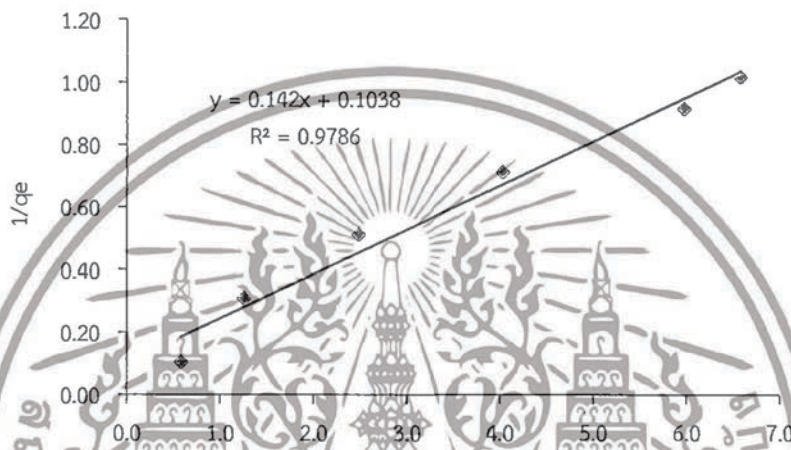
## ภาคผนวก ง

### การคำนวณผลไอโซเทอร์ม

#### 1. การคำนวณไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวัสดุดูดซับ

##### 1.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ ง-1 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์

จาก

เมื่อ

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

$q_e$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)  
 $Q_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบ  
 ชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ (mg/g)  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในน้ำเสียที่จุดสมดุล (mg/L)  
 $K_L$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ (L/mg)

นำมาเขียนสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q_e} = \left( \frac{1}{K_L Q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \left( \frac{1}{Q_m} \right)$$

จากรูปที่ ง-1 จะได้สมการเส้นตรง  $y = 0.142X + 0.1038$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{K_L Q_m}$  ดังนั้น  $K_L = 0.730$  L/mg

จุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{Q_m}$  ดังนั้น  $Q_m = 9.6339$  mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาคำนวณหาปัจจัยแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล ( $R_L$ ) จากสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

$$\text{ปัจจัยการแยก} = \frac{1}{1 + (0.7310)(39.40)} = 0.03355$$

ดังนั้น ปัจจัยการแยกของการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์มในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ ทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ เท่ากับ 0.0336

## 1.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)



รูปที่ ๑-2 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จาก

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ หรือค่าการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

$K_F$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (L/g)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/L)

$n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

นำมาเขียนสมการเส้นตรง โดยการใส่ค่าลอการิทึม (Logarithm) จะได้

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e$$

จากรูปที่ 2 จะได้สมการเส้นตรง  $y = 0.8766X + 0.6798$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  ดังนั้น  $\frac{1}{n} = 0.8766$  และ  $n = 1.1408$

จุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K_F$  ดังนั้น  $K_F = 4.7841$  L/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การคำนวณปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ในการดูดซับน้ำเสีย

นำผลการคำนวณค่า  $Q_m$  จากแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมาทำการคำนวณหาปริมาณวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัม) เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับน้ำเสียจากโรงงานต่อไป มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ (จากข้อ 1.1)  $Q_m$  เท่ากับ 9.6339 mg/g ถ้าน้ำเสียจากโรงงานมี  $Cu^{2+}$  ความเข้มข้นอยู่ที่ 150.50 mg/L

$$\begin{aligned} \text{จะได้ว่า ปริมาณ } Cu^{2+} \text{ 9.6339 mg อยู่ในวัสดุเปลือกส้ม} &= 1 \text{ g} \\ \text{ถ้า ปริมาณ } Cu^{2+} \text{ 150.50 mg/L อยู่ในวัสดุเปลือกส้ม} &= \frac{150.50 \text{ mg/L} \times 1 \text{ g}}{9.6339 \text{ mg}} \\ &= 15.6219 \text{ g/L} \\ \text{น้ำเสีย 1,000 ml จะใช้เปลือกส้มดูดซับ } Cu^{2+} &= 15.6219 \text{ g} \\ \text{ถ้า น้ำเสีย 25 ml จะใช้เปลือกส้มดูดซับ } Cu^{2+} &= \frac{15.6219 \text{ g} \times 25 \text{ ml}}{1,000 \text{ ml}} \\ &= 0.3905 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำเสียจากโรงงานที่มีทองแดงปนเปื้อนปริมาณ 25 ml จะใช้เปลือกส้มปรับปรุง 0.3905 g

ปริมาณวัสดุที่ต้องใช้เพื่อดูดซับน้ำเสียจากโรงงานดังแสดงในตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 ปริมาณวัสดุที่ต้องใช้เพื่อดูดซับน้ำเสียจากโรงงาน

| วัสดุ                    | ชนิดของน้ำเสีย | ความเข้มข้น<br>(mg/L) | $Q_m$<br>(mg/g) | ปริมาณวัสดุ<br>(g) |
|--------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ  | $Cu^{2+}$      | 150.50                | 9.6339          | 0.3905             |
|                          | $Ni^{2+}$      | 250.50                | 5.2854          | 1.1849             |
| กากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ | $Cu^{2+}$      | 150.50                | 4.3979          | 0.8555             |
|                          | $Ni^{2+}$      | 250.50                | 3.0562          | 2.0491             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ผลการทดลอง

#### จ.1 ผลการแปรผันค่าปรับสภาพ

หลังจากที่ปรับสภาพกากขานอ้อยแล้ว นำมาทำการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กากขานอ้อยปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-1 การแปรผันค่าปรับสภาพของกากขานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> ดูดซับทองแดง

| กากขานอ้อย                                    | การทดลองครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|---|------------------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|   |                  |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| ไม่ปรับสภาพ                                   | 1                | 50.20                  | 39.35            | 23.85                                  | 52.49           | 23.61 | 28.88  | 35.02          | 5.3559 |
|   | 2                | 48.90                  | 38.35            | 20.25                                  | 58.59           | 21.17 | 37.42  |                |        |
|   | 3                | 49.80                  | 38.55            | 20.05                                  | 59.74           | 20.98 | 38.76  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.5 M                           | 1                | 50.20                  | 39.35            | 6.98                                   | 86.10           | 23.61 | 62.49  | 63.22          | 1.4225 |
|   | 2                | 48.90                  | 38.35            | 8.08                                   | 83.48           | 21.17 | 62.31  |                |        |
|   | 3                | 49.80                  | 38.55            | 7.05                                   | 85.84           | 20.98 | 64.86  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.5 M + CaCl <sub>2</sub> 0.5 M | 1                | 50.20                  | 39.35            | 4.99                                   | 90.06           | 23.61 | 66.45  | 68.55          | 1.8524 |
|   | 2                | 48.90                  | 38.35            | 4.71                                   | 90.37           | 21.17 | 69.20  |                |        |
|   | 3                | 49.80                  | 38.55            | 4.50                                   | 90.96           | 20.98 | 69.98  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.8 M                           | 1                | 49.35                  | 37.95            | 4.83                                   | 90.21           | 22.29 | 67.92  | 67.87          | 0.0790 |
|   | 2                | 49.80                  | 38.35            | 4.78                                   | 90.40           | 22.59 | 67.81  |                |        |
|   | 3                | 45.90                  | 38.55            | 4.99                                   | 89.13           | 17.32 | 71.81  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.8 M + CaCl <sub>2</sub> 0.8 M | 1                | 49.35                  | 37.95            | 2.54                                   | 94.85           | 22.29 | 72.56  | 72.47          | 0.1371 |
|   | 2                | 49.80                  | 38.35            | 2.51                                   | 94.96           | 22.59 | 72.37  |                |        |
|   | 3                | 45.90                  | 38.55            | 2.63                                   | 94.27           | 17.32 | 76.95  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 1 M                             | 1                | 49.35                  | 37.95            | 3.65                                   | 92.60           | 22.29 | 70.31  | 71.43          | 2.3962 |
|   | 2                | 49.80                  | 38.35            | 3.79                                   | 92.39           | 22.59 | 69.80  |                |        |
|   | 3                | 45.90                  | 38.55            | 3.90                                   | 91.50           | 17.32 | 74.18  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 1 M + CaCl <sub>2</sub> 1 M     | 1                | 49.35                  | 37.95            | 2.45                                   | 95.04           | 22.29 | 72.75  | 72.85          | 0.1457 |
|   | 2                | 49.80                  | 38.35            | 2.22                                   | 95.54           | 22.59 | 72.95  |                |        |
|   | 3                | 45.90                  | 38.55            | 2.33                                   | 94.92           | 17.32 | 77.60  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ปรับสภาพกากขานอ้อยแล้ว นำมาทำการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กากขานอ้อยปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-2 การแปรผันค่าปรับสภาพของกากขานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> ดูดซับนิกเกิล

| กากขานอ้อย                                    | การทดลองครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|---|------------------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|   |                  |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| ไม่ปรับสภาพ                                   | 1                | 51.05                  | 39.90            | 17.85                                  | 65.03           | 21.84 | 43.19  | 40.65          | 1.1587 |
|   | 2                | 50.53                  | 40.55            | 19.60                                  | 61.21           | 19.74 | 41.46  |                |        |
|   | 3                | 51.73                  | 40.75            | 20.15                                  | 61.04           | 21.22 | 39.83  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.5 M                           | 1                | 51.05                  | 39.90            | 6.75                                   | 86.78           | 21.84 | 64.94  | 65.36          | 0.4480 |
|   | 2                | 50.53                  | 40.55            | 7.55                                   | 85.06           | 19.74 | 65.31  |                |        |
|   | 3                | 51.73                  | 40.75            | 6.70                                   | 87.05           | 21.22 | 65.83  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.5 M + CaCl <sub>2</sub> 0.5 M | 1                | 51.05                  | 39.90            | 6.30                                   | 87.66           | 21.84 | 65.82  | 66.84          | 1.5554 |
|   | 2                | 50.53                  | 40.55            | 5.88                                   | 88.37           | 19.74 | 68.63  |                |        |
|   | 3                | 51.73                  | 40.75            | 6.58                                   | 87.29           | 21.22 | 66.07  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.8 M                           | 1                | 42.65                  | 34.85            | 3.50                                   | 91.79           | 18.29 | 73.51  | 72.23          | 1.3512 |
|   | 2                | 43.98                  | 35.25            | 3.43                                   | 92.21           | 19.84 | 72.37  |                |        |
|   | 3                | 43.00                  | 34.33            | 3.88                                   | 90.99           | 20.17 | 70.81  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 0.8 M + CaCl <sub>2</sub> 0.8 M | 1                | 42.65                  | 34.85            | 2.58                                   | 93.96           | 18.29 | 75.67  | 74.32          | 1.1982 |
|   | 2                | 43.98                  | 35.25            | 2.98                                   | 93.23           | 19.84 | 73.39  |                |        |
|   | 3                | 43.00                  | 34.33            | 2.55                                   | 94.07           | 20.17 | 73.90  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 1 M                             | 1                | 51.05                  | 39.90            | 2.95                                   | 94.22           | 21.84 | 72.38  | 73.13          | 1.0035 |
|   | 2                | 50.53                  | 40.55            | 3.03                                   | 94.01           | 19.74 | 74.27  |                |        |
|   | 3                | 51.73                  | 40.75            | 3.13                                   | 93.96           | 21.22 | 72.74  |                |        |
| ปรับด้วย NaOH 1 M + CaCl <sub>2</sub> 1 M     | 1                | 51.05                  | 39.90            | 2.00                                   | 96.08           | 21.84 | 74.24  | 74.60          | 0.5105 |
|   | 2                | 50.53                  | 40.35            | 2.68                                   | 94.71           | 19.74 | 74.96  |                |        |
|   | 3                | 51.73                  | 40.75            | 1.95                                   | 96.23           | 21.22 | 75.01  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.2 ผลของ pH ในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล

การหาค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-3 ผลของ pH ในการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| pH | การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|    |                  |           |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 2  | 1                | 0.1003    | 50.25                  | 46.60            | 16.55                                  | 67.06           | 7.26  | 59.80  | 60.49          | 1.6917 |
|    | 2                | 0.1002    | 48.30                  | 46.15            | 16.00                                  | 66.87           | 4.45  | 62.42  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.60                  | 45.45            | 16.65                                  | 65.74           | 6.48  | 59.26  |                |        |
| 3  | 1                | 0.1003    | 50.25                  | 40.05            | 6.85                                   | 86.37           | 20.30 | 66.07  | 67.88          | 2.3975 |
|    | 2                | 0.1003    | 48.30                  | 40.65            | 6.55                                   | 86.44           | 15.84 | 70.60  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.60                  | 41.05            | 8.50                                   | 82.51           | 15.53 | 66.98  |                |        |
| 4  | 1                | 0.1002    | 50.25                  | 39.65            | 4.55                                   | 90.95           | 21.09 | 69.85  | 71.89          | 1.9823 |
|    | 2                | 0.1002    | 48.30                  | 39.50            | 3.85                                   | 92.03           | 18.22 | 73.81  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.60                  | 38.95            | 3.95                                   | 91.87           | 19.86 | 72.02  |                |        |
| 5  | 1                | 0.1003    | 50.25                  | 39.35            | 2.10                                   | 95.82           | 21.69 | 74.13  | 75.90          | 1.5944 |
|    | 2                | 0.1003    | 48.30                  | 38.80            | 1.50                                   | 96.89           | 19.67 | 77.23  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.60                  | 38.55            | 1.45                                   | 97.02           | 20.68 | 76.34  |                |        |
| 6  | 1                | 0.1003    | 50.25                  | 20.75            | 0.21                                   | 99.58           | 58.71 | 40.88  | 41.01          | 1.8324 |
|    | 2                | 0.1002    | 48.30                  | 19.15            | 0.19                                   | 99.61           | 60.35 | 39.25  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.60                  | 21.05            | 0.20                                   | 99.60           | 56.69 | 42.91  |                |        |
| 7  | 1                | 0.1003    | 50.25                  | 15.40            | 0.13                                   | 99.74           | 69.35 | 30.39  | 31.44          | 0.9970 |
|    | 2                | 0.1003    | 48.30                  | 15.80            | 0.17                                   | 99.66           | 67.29 | 32.37  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.60                  | 15.50            | 0.16                                   | 99.67           | 68.11 | 31.56  |                |        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้กากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-4 ผลของ pH ในการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| pH | การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ขูดควม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----|------------------|-----------|------------------------|---------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|    |                  |           |                        |               |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 2  | 1                | 0.1003    | 46.85                  | 46.25         | 22.25                                  | 52.51           | 1.28  | 51.23  | 52.22          | 0.9106 |
|    | 2                | 0.1002    | 47.20                  | 46.95         | 21.93                                  | 53.55           | 0.53  | 53.02  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.85                  | 47.95         | 22.35                                  | 54.25           | 1.84  | 52.41  |                |        |
| 3  | 1                | 0.1003    | 46.85                  | 43.80         | 14.95                                  | 68.09           | 6.51  | 61.58  | 62.58          | 1.2893 |
|    | 2                | 0.1003    | 47.20                  | 45.45         | 15.23                                  | 67.74           | 3.71  | 64.04  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.85                  | 45.70         | 15.35                                  | 68.58           | 6.45  | 62.13  |                |        |
| 4  | 1                | 0.1002    | 46.85                  | 40.45         | 6.58                                   | 85.97           | 13.66 | 72.31  | 71.50          | 0.9032 |
|    | 2                | 0.1002    | 47.20                  | 40.10         | 6.28                                   | 86.71           | 15.04 | 71.66  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.85                  | 40.80         | 6.35                                   | 87.00           | 16.48 | 70.52  |                |        |
| 5  | 1                | 0.1003    | 46.85                  | 38.65         | 3.87                                   | 91.74           | 17.50 | 74.24  | 73.09          | 1.0491 |
|    | 2                | 0.1003    | 47.20                  | 38.10         | 3.72                                   | 92.13           | 19.28 | 72.85  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.85                  | 39.05         | 3.79                                   | 92.24           | 20.06 | 72.18  |                |        |
| 6  | 1                | 0.1003    | 46.85                  | 19.75         | 0.39                                   | 99.18           | 57.84 | 41.33  | 54.31          | 0.4327 |
|    | 2                | 0.1002    | 47.20                  | 25.85         | 0.36                                   | 99.24           | 45.23 | 54.00  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 48.85                  | 26.95         | 0.27                                   | 99.45           | 44.83 | 54.62  |                |        |
| 7  | 1                | 0.1003    | 46.85                  | 18.45         | 0.22                                   | 99.53           | 60.62 | 38.91  | 39.05          | 0.1930 |
|    | 2                | 0.1003    | 47.20                  | 18.75         | 0.26                                   | 99.46           | 60.28 | 39.18  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 48.85                  | 17.15         | 0.25                                   | 99.49           | 64.89 | 34.60  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่หาค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-5 ผลของ pH ในการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| pH | การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|    |                  |           |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 2  | 1                | 0.1006    | 49.90                  | 49.15            | 16.50                                  | 66.93           | 1.50  | 65.43  | 65.38          | 0.0661 |
|    | 2                | 0.1006    | 48.90                  | 48.85            | 16.90                                  | 65.44           | 0.10  | 65.34  |                |        |
|    | 3                | 0.1006    | 49.55                  | 49.10            | 15.35                                  | 69.02           | 0.91  | 68.11  |                |        |
| 3  | 1                | 0.1004    | 49.90                  | 46.60            | 10.30                                  | 79.36           | 6.61  | 72.75  | 69.38          | 2.9191 |
|    | 2                | 0.1005    | 48.90                  | 44.10            | 10.90                                  | 77.71           | 9.82  | 67.89  |                |        |
|    | 3                | 0.1005    | 49.55                  | 44.90            | 11.45                                  | 76.89           | 9.38  | 67.51  |                |        |
| 4  | 1                | 0.1004    | 49.90                  | 41.85            | 4.95                                   | 90.08           | 16.13 | 73.95  | 73.57          | 1.9311 |
|    | 2                | 0.1004    | 48.90                  | 40.90            | 5.95                                   | 87.83           | 16.36 | 71.47  |                |        |
|    | 3                | 0.1004    | 49.55                  | 41.05            | 3.75                                   | 92.43           | 17.15 | 75.28  |                |        |
| 5  | 1                | 0.1003    | 49.90                  | 38.30            | 1.95                                   | 96.09           | 23.25 | 72.85  | 74.56          | 1.6677 |
|    | 2                | 0.1003    | 48.90                  | 39.50            | 2.25                                   | 95.40           | 19.22 | 76.18  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 49.55                  | 39.65            | 2.65                                   | 94.65           | 19.98 | 74.67  |                |        |
| 6  | 1                | 0.1002    | 49.90                  | 36.15            | 1.35                                   | 97.49           | 39.58 | 57.92  | 57.62          | 0.4243 |
|    | 2                | 0.1003    | 48.90                  | 32.60            | 1.50                                   | 96.93           | 33.33 | 63.60  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 49.55                  | 30.35            | 1.95                                   | 96.06           | 38.75 | 57.32  |                |        |
| 7  | 1                | 0.1001    | 49.90                  | 26.05            | 1.20                                   | 97.60           | 47.80 | 49.80  | 51.61          | 1.5880 |
|    | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 27.05            | 1.50                                   | 96.93           | 44.68 | 52.25  |                |        |
|    | 3                | 0.1000    | 49.55                  | 27.75            | 1.60                                   | 96.77           | 44.00 | 52.77  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้กากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-6 ผลของ pH ในการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| pH | การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|    |                  |           |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 2  | 1                | 0.1006    | 49.90                  | 48.85            | 21.10                                  | 57.72           | 2.10  | 55.61  | 53.96          | 1.6808 |
|    | 2                | 0.1006    | 50.35                  | 49.55            | 22.35                                  | 55.61           | 1.59  | 54.02  |                |        |
|    | 3                | 0.1006    | 47.75                  | 46.25            | 21.30                                  | 55.39           | 3.14  | 52.25  |                |        |
| 3  | 1                | 0.1004    | 49.90                  | 44.05            | 13.98                                  | 71.99           | 11.72 | 60.27  | 61.53          | 3.9657 |
|    | 2                | 0.1005    | 50.35                  | 43.15            | 13.78                                  | 72.64           | 14.30 | 58.34  |                |        |
|    | 3                | 0.1005    | 47.75                  | 43.50            | 12.00                                  | 74.87           | 8.90  | 65.97  |                |        |
| 4  | 1                | 0.1004    | 49.90                  | 40.90            | 9.13                                   | 81.71           | 18.04 | 63.68  | 66.91          | 3.0311 |
|    | 2                | 0.1004    | 50.35                  | 42.60            | 8.68                                   | 82.77           | 15.39 | 67.38  |                |        |
|    | 3                | 0.1004    | 47.75                  | 41.00            | 7.73                                   | 83.82           | 14.14 | 69.69  |                |        |
| 5  | 1                | 0.1003    | 49.90                  | 38.25            | 3.03                                   | 93.94           | 23.35 | 70.59  | 72.40          | 1.6863 |
|    | 2                | 0.1003    | 50.35                  | 39.80            | 3.20                                   | 93.64           | 20.95 | 72.69  |                |        |
|    | 3                | 0.1002    | 47.75                  | 39.05            | 3.75                                   | 92.15           | 18.22 | 73.93  |                |        |
| 6  | 1                | 0.1002    | 49.90                  | 33.25            | 2.18                                   | 95.64           | 33.37 | 62.27  | 63.19          | 0.8392 |
|    | 2                | 0.1003    | 50.35                  | 33.85            | 1.95                                   | 96.13           | 32.77 | 63.36  |                |        |
|    | 3                | 0.1003    | 47.75                  | 32.55            | 2.03                                   | 95.76           | 31.83 | 63.93  |                |        |
| 7  | 1                | 0.1001    | 49.90                  | 21.70            | 1.60                                   | 96.79           | 56.51 | 40.28  | 42.04          | 2.6415 |
|    | 2                | 0.1000    | 50.35                  | 22.30            | 1.78                                   | 96.47           | 55.71 | 40.76  |                |        |
|    | 3                | 0.1000    | 47.75                  | 22.90            | 1.38                                   | 97.12           | 52.04 | 45.08  |                |        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จ.3 ผลของระยะเวลาในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล

การหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง pH 5 เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ-7 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| เวลา<br>(นาที) | การ<br>ทดลอง<br>ครั้งที่ | วัสดุ<br>(g) | น้ำเสีย<br>เริ่มต้น<br>(mg/L) | ชุด<br>ควบคุม<br>(mg/L) | ปริมาณ<br>Cu <sup>2+</sup><br>คงเหลือ<br>(mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%)  |       |        | %<br>ดูดซับ<br>เฉลี่ย | SD     |
|----------------|--------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------|---|------------------|-------|--------|-----------------------|--------|
|                |                          |              |                               |                         |   | ดูดซับ+<br>ตะกอน | ตะกอน | ดูดซับ |                       |        |
| 20             | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 37.75                   | 13.65   | 70.96            | 19.68 | 51.28  | 51.31                 | 0.1358 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 38.85                   | 15.10   | 67.28            | 15.82 | 51.46  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 37.20                   | 13.70   | 70.15            | 18.95 | 51.20  |                       |        |
| 40             | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 39.10                   | 4.55  | 90.32            | 16.81 | 73.51  | 72.20                 | 1.5208 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 37.45                   | 4.90  | 89.38            | 18.85 | 70.53  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 37.10                   | 3.80  | 91.72            | 19.17 | 72.55  |                       |        |
| 60             | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 39.05                   | 2.15  | 95.43            | 16.91 | 78.51  | 78.95                 | 2.6601 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 37.30                   | 1.98  | 95.72            | 19.18 | 76.54  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 38.95                   | 1.40  | 96.95            | 15.14 | 81.81  |                       |        |
| 80             | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 36.10                   | 1.28  | 97.29            | 23.19 | 74.10  | 78.43                 | 4.8808 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 37.40                   | 1.65  | 96.42            | 18.96 | 77.46  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 40.40                   | 1.98  | 95.70            | 11.98 | 83.71  |                       |        |
| 100            | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 37.80                   | 1.98  | 95.80            | 19.57 | 76.22  | 78.89                 | 3.3616 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 39.40                   | 1.25  | 97.29            | 14.63 | 82.67  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 37.05                   | 1.35  | 97.06            | 19.28 | 77.78  |                       |        |
| 120            | 1                        | 0.1000       | 47.00                         | 39.20                   | 1.00  | 97.87            | 16.60 | 81.28  | 78.57                 | 2.4781 |
|                | 2                        | 0.1000       | 46.15                         | 37.20                   | 1.20  | 97.40            | 19.39 | 78.01  |                       |        |
|                | 3                        | 0.1000       | 45.90                         | 36.95                   | 1.88  | 95.92            | 19.50 | 76.42  |                       |        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้กากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง pH 5 เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ-8 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| เวลา (นาที) | การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|-------------|------------------|-----------|------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|             |                  |           |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 20          | 1                | 0.1000    | 46.60                  | 37.85            | 13.38                                  | 71.30           | 18.78 | 52.52  | 51.02          | 2.0563 |
|             | 2                | 0.1000    | 47.00                  | 38.10            | 13.73                                  | 70.80           | 18.94 | 51.86  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.10                  | 37.75            | 13.85                                  | 71.79           | 23.12 | 48.68  |                |        |
| 40          | 1                | 0.1000    | 47.80                  | 40.35            | 6.75                                   | 85.88           | 15.59 | 70.29  | 67.39          | 2.6269 |
|             | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 39.85            | 7.23                                   | 85.22           | 18.51 | 66.72  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.60                  | 40.75            | 8.43                                   | 83.01           | 17.84 | 65.17  |                |        |
| 60          | 1                | 0.1000    | 47.80                  | 38.10            | 2.81                                   | 94.12           | 20.29 | 73.83  | 74.33          | 0.6859 |
|             | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 39.80            | 3.07                                   | 93.72           | 18.61 | 75.11  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.60                  | 39.40            | 2.67                                   | 94.62           | 20.56 | 74.05  |                |        |
| 80          | 1                | 0.1000    | 47.80                  | 38.85            | 3.13                                   | 93.45           | 18.72 | 74.73  | 74.72          | 0.0073 |
|             | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 39.05            | 1.92                                   | 96.07           | 20.14 | 75.93  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.60                  | 39.20            | 2.14                                   | 95.69           | 20.97 | 74.72  |                |        |
| 100         | 1                | 0.1000    | 47.80                  | 39.40            | 2.89                                   | 93.95           | 17.57 | 76.38  | 74.17          | 1.9369 |
|             | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 37.60            | 1.72                                   | 96.48           | 23.11 | 73.37  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.60                  | 37.95            | 1.86                                   | 96.25           | 23.49 | 72.76  |                |        |
| 120         | 1                | 0.1000    | 47.80                  | 37.85            | 1.73                                   | 96.58           | 20.82 | 75.56  | 74.93          | 0.8295 |
|             | 2                | 0.1000    | 48.90                  | 38.10            | 1.31                                   | 97.32           | 22.09 | 75.24  |                |        |
|             | 3                | 0.1000    | 49.60                  | 39.40            | 2.70                                   | 94.56           | 20.56 | 73.99  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้เปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ pH 5 เขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ-9 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| เวลา (นาที) | การทดลอง ครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสีย เริ่มต้น (mg/L) | ซุด ควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับ เฉลี่ย | SD     |
|-------------|-------------------|-----------|-------------------------|-------------------|--|-----------------|-------|--------|-----------------|--------|
|             |                   |           |                         |                   |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                 |        |
| 20          | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 38.10             | 9.60                                   | 80.21           | 21.44 | 58.76  | 58.13           | 2.1948 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 38.90             | 9.35                                   | 81.03           | 21.10 | 59.94  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 36.50             | 8.60                                   | 82.83           | 27.15 | 55.69  |                 |        |
| 40          | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 36.95             | 3.28                                   | 93.25           | 23.81 | 69.43  | 69.45           | 0.0199 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 37.60             | 2.83                                   | 94.27           | 23.73 | 70.54  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 38.25             | 3.45                                   | 93.11           | 23.65 | 69.46  |                 |        |
| 60          | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 36.00             | 1.05                                   | 97.84           | 25.77 | 72.06  | 74.41           | 2.2262 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 38.90             | 1.19                                   | 97.59           | 21.10 | 76.49  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 38.45             | 1.04                                   | 97.92           | 23.25 | 74.67  |                 |        |
| 80          | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 38.15             | 1.12                                   | 97.69           | 21.34 | 76.35  | 74.10           | 1.9627 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 37.15             | 1.29                                   | 97.38           | 24.65 | 72.74  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 37.85             | 1.17                                   | 97.66           | 24.45 | 73.21  |                 |        |
| 100         | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 36.65             | 0.98                                   | 97.98           | 24.43 | 73.55  | 74.02           | 1.3264 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 38.30             | 1.07                                   | 97.83           | 22.31 | 75.52  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 37.60             | 1.03                                   | 97.94           | 24.95 | 72.99  |                 |        |
| 120         | 1                 | 0.1000    | 48.50                   | 38.45             | 0.83                                   | 98.29           | 20.72 | 77.57  | 74.39           | 3.7443 |
|             | 2                 | 0.1000    | 49.30                   | 35.50             | 0.86                                   | 98.26           | 27.99 | 70.26  |                 |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 50.10                   | 38.75             | 1.00                                   | 98.00           | 22.65 | 75.35  |                 |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้กากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M ขนาด 50 เมช ปริมาณ 0.1 กรัมต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสี้ยวสังเคราะห์นิกเกิลที่ pH 5 เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ จ-10 ผลของระยะเวลาในการดูดซับน้ำเสี้ยวสังเคราะห์นิกเกิลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| เวลา (นาที) | การทดลอง ครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสี้ยว เริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|-------------|-------------------|-----------|---------------------------|------------------|--|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|             |                   |           |                           |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| 20          | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 42.05            | 11.83                                  | 74.43           | 9.08  | 65.35  | 59.72          | 4.9435 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 40.55            | 13.33                                  | 71.77           | 14.09 | 57.68  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 41.20            | 14.13                                  | 70.73           | 14.61 | 56.11  |                |        |
| 40          | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 36.65            | 2.90                                   | 93.74           | 20.76 | 72.98  | 72.96          | 0.0275 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 37.30            | 2.87                                   | 93.92           | 20.97 | 72.94  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 42.25            | 2.75                                   | 94.30           | 12.44 | 81.87  |                |        |
| 60          | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 40.25            | 2.53                                   | 94.53           | 12.97 | 81.56  | 78.16          | 3.2171 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 39.55            | 2.85                                   | 93.96           | 16.21 | 77.75  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 39.15            | 2.89                                   | 94.02           | 18.86 | 75.16  |                |        |
| 80          | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 38.50            | 2.64                                   | 94.29           | 16.76 | 77.54  | 78.19          | 4.5245 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 41.35            | 2.67                                   | 94.34           | 15.33 | 83.01  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 38.30            | 2.58                                   | 94.65           | 20.62 | 74.03  |                |        |
| 100         | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 36.05            | 2.42                                   | 94.78           | 22.05 | 72.72  | 78.13          | 4.7946 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 41.25            | 2.61                                   | 94.48           | 12.61 | 81.88  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 40.85            | 2.46                                   | 94.91           | 15.13 | 79.78  |                |        |
| 120         | 1                 | 0.1000    | 46.25                     | 38.95            | 2.44                                   | 94.74           | 15.78 | 78.95  | 78.22          | 0.8928 |
|             | 2                 | 0.1000    | 47.20                     | 39.50            | 2.46                                   | 94.79           | 16.31 | 78.47  |                |        |
|             | 3                 | 0.1000    | 48.25                     | 39.60            | 2.34                                   | 95.18           | 17.93 | 77.29  |                |        |

หมายเหตุ

ไม่นำมาคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### จ.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับทองแดงและนิกเกิล ด้วยเปลือกส้มและกากชานอ้อย

การหาไอโซเทอร์มในการดูดซับทองแดง และนิกเกิล โดยใช้เปลือกส้ม และกากชานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M + CaCl<sub>2</sub> 0.8 M โดยแปรผันปริมาณวัสดุตั้งแต่ 0.1-1.0 กรัม ต่อ 25 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 5 เขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที

ตารางที่ จ-11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | C <sub>e</sub> (mg/L) | q <sub>e</sub> (mg/g) | Langmuir Isotherm |                  | Freundlich Isotherm |                    |
|------------------|-----------|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                  |           |                        |                  |                       |                       | 1/C <sub>e</sub>  | 1/q <sub>e</sub> | Log C <sub>e</sub>  | Log q <sub>e</sub> |
| 1                | 0.1002    | 48.60                  | 40.70            | 2.20                  | 9.6058                | 0.4545            | 0.1041           | 0.3424              | 0.9825             |
| 2                | 0.1001    | 48.50                  | 38.45            | 1.70                  | 9.1783                | 0.5882            | 0.1090           | 0.2304              | 0.9628             |
| 3                | 0.1000    | 49.40                  | 39.05            | 1.45                  | 9.4000                | 0.6897            | 0.1064           | 0.1614              | 0.9731             |
| Avg.             | 0.1001    | 48.83                  | 39.40            | 1.78                  | 9.3947                | 0.5775            | 0.1065           | 0.2447              | 0.9728             |
| 1                | 0.3003    | 48.60                  | 40.70            | 0.85                  | 3.3175                | 1.1765            | 0.3014           | -0.0706             | 0.5208             |
| 2                | 0.3004    | 48.50                  | 38.45            | 0.80                  | 3.1333                | 1.2500            | 0.3192           | -0.0969             | 0.4960             |
| 3                | 0.3000    | 49.40                  | 39.05            | 0.75                  | 3.1917                | 1.3333            | 0.3133           | -0.1249             | 0.5040             |
| Avg.             | 0.3002    | 48.83                  | 39.40            | 0.80                  | 3.2142                | 1.2533            | 0.3113           | -0.0975             | 0.5069             |
| 1                | 0.5004    | 48.60                  | 40.70            | 0.47                  | 2.0099                | 2.1277            | 0.4975           | -0.3279             | 0.3032             |
| 2                | 0.5003    | 48.50                  | 38.45            | 0.42                  | 1.9004                | 2.3810            | 0.5262           | -0.3768             | 0.2788             |
| 3                | 0.5000    | 49.40                  | 39.05            | 0.34                  | 1.9355                | 2.9412            | 0.5167           | -0.4685             | 0.2868             |
| Avg.             | 0.5002    | 48.83                  | 39.40            | 0.41                  | 1.9486                | 2.4833            | 0.5135           | -0.3911             | 0.2896             |
| 1                | 0.7003    | 48.60                  | 40.70            | 0.30                  | 1.4424                | 3.3898            | 0.6933           | -0.5302             | 0.1591             |
| 2                | 0.7002    | 48.50                  | 38.45            | 0.26                  | 1.3637                | 3.9216            | 0.7333           | -0.5935             | 0.1347             |
| 3                | 0.7000    | 49.40                  | 39.05            | 0.21                  | 1.3871                | 4.7619            | 0.7209           | -0.6778             | 0.1421             |
| Avg.             | 0.7002    | 48.83                  | 39.40            | 0.25                  | 1.3978                | 4.0244            | 0.7158           | -0.6005             | 0.1453             |
| 1                | 0.9004    | 48.60                  | 40.70            | 0.19                  | 1.1249                | 5.4054            | 0.8890           | -0.7328             | 0.0511             |
| 2                | 0.9003    | 48.50                  | 38.45            | 0.16                  | 1.0632                | 6.2112            | 0.9405           | -0.7932             | 0.0266             |
| 3                | 0.9000    | 49.40                  | 39.05            | 0.16                  | 1.0803                | 6.2893            | 0.9257           | -0.7986             | 0.0335             |
| Avg.             | 0.9002    | 48.83                  | 39.40            | 0.17                  | 1.0895                | 5.9686            | 0.9184           | -0.7749             | 0.0371             |
| 1                | 1.0020    | 48.60                  | 40.70            | 0.15                  | 1.0118                | 6.8027            | 0.9883           | -0.8327             | 0.0051             |
| 2                | 1.0010    | 48.50                  | 38.45            | 0.15                  | 0.9564                | 6.4935            | 1.0455           | -0.8125             | -0.0193            |
| 3                | 1.0000    | 49.40                  | 39.05            | 0.16                  | 0.9724                | 6.4103            | 1.0284           | -0.8069             | -0.0122            |
| Avg.             | 1.0010    | 48.83                  | 39.40            | 0.15                  | 0.9802                | 6.5688            | 1.0208           | -0.8173             | -0.0088            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

| การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g)     | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | C <sub>e</sub> (mg/L) | q <sub>e</sub> (mg/g) | Langmuir Isotherm |                  | Freundlich Isotherm |                    |
|------------------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                  |               |                        |                  |                       |                       | 1/C <sub>e</sub>  | 1/q <sub>e</sub> | Log C <sub>e</sub>  | Log q <sub>e</sub> |
| 1                | 0.1002        | 46.70                  | 38.70            | 1.54                  | 9.2715                | 0.6494            | 0.1079           | 0.1875              | 0.9671             |
| 2                | 0.1001        | 47.70                  | 37.60            | 1.52                  | 9.0110                | 0.6579            | 0.1110           | 0.1818              | 0.9548             |
| 3                | 0.1001        | 48.05                  | 38.45            | 1.16                  | 9.3132                | 0.8621            | 0.1074           | 0.0645              | 0.9691             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.1001</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>1.41</b>           | <b>9.1985</b>         | <b>0.7231</b>     | <b>0.1087</b>    | <b>0.1446</b>       | <b>0.9637</b>      |
| 1                | 0.3003        | 46.70                  | 38.70            | 1.11                  | 3.1294                | 0.9009            | 0.3196           | 0.0453              | 0.4955             |
| 2                | 0.3004        | 47.70                  | 37.60            | 1.15                  | 3.0335                | 0.8696            | 0.3297           | 0.0607              | 0.4819             |
| 3                | 0.3004        | 48.05                  | 38.45            | 1.07                  | 3.1109                | 0.9346            | 0.3215           | 0.0294              | 0.4929             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.3004</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>1.11</b>           | <b>3.0912</b>         | <b>0.9017</b>     | <b>0.3236</b>    | <b>0.0451</b>       | <b>0.4901</b>      |
| 1                | 0.5004        | 46.70                  | 38.70            | 0.96                  | 1.8855                | 1.0417            | 0.5304           | -0.0177             | 0.2754             |
| 2                | 0.5003        | 47.70                  | 37.60            | 1.01                  | 1.8284                | 0.9901            | 0.5469           | 0.0043              | 0.2621             |
| 3                | 0.5003        | 48.05                  | 38.45            | 0.88                  | 1.8774                | 1.1364            | 0.5327           | -0.0555             | 0.2736             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.5003</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.95</b>           | <b>1.8638</b>         | <b>1.0560</b>     | <b>0.5367</b>    | <b>-0.0230</b>      | <b>0.2703</b>      |
| 1                | 0.7003        | 46.70                  | 38.70            | 0.71                  | 1.2564                | 1.4184            | 0.7373           | -0.1518             | 0.1324             |
| 2                | 0.7003        | 47.70                  | 37.60            | 0.68                  | 1.3182                | 1.4815            | 0.7586           | -0.1707             | 0.1200             |
| 3                | 0.7003        | 48.05                  | 38.45            | 0.70                  | 1.3478                | 1.4388            | 0.7419           | -0.1580             | 0.1296             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.7003</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.69</b>           | <b>1.3408</b>         | <b>1.4463</b>     | <b>0.7459</b>    | <b>-0.1602</b>      | <b>0.1273</b>      |
| 1                | 0.9004        | 46.70                  | 38.70            | 0.34                  | 1.0651                | 2.9412            | 0.9389           | -0.4685             | 0.0274             |
| 2                | 0.9003        | 47.70                  | 37.60            | 0.36                  | 1.0341                | 2.7778            | 0.9670           | -0.4437             | 0.0146             |
| 3                | 0.9003        | 48.05                  | 38.45            | 0.39                  | 1.0570                | 2.5974            | 0.9461           | -0.4145             | 0.0241             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.9003</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.36</b>           | <b>1.0521</b>         | <b>2.7721</b>     | <b>0.9507</b>    | <b>-0.4423</b>      | <b>0.0220</b>      |
| 1                | 1.0020        | 46.70                  | 38.70            | 0.31                  | 0.9578                | 3.2258            | 1.0440           | -0.5086             | -0.0187            |
| 2                | 1.0010        | 47.70                  | 37.60            | 0.21                  | 0.9339                | 4.8780            | 1.0707           | -0.6882             | -0.0297            |
| 3                | 1.0020        | 48.05                  | 38.45            | 0.22                  | 0.9540                | 4.6512            | 1.0483           | -0.6676             | -0.0205            |
| <b>Avg.</b>      | <b>1.0017</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.24</b>           | <b>0.9486</b>         | <b>4.2517</b>     | <b>1.0543</b>    | <b>-0.6215</b>      | <b>-0.0230</b>     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักทองแดงด้วยกากชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g)     | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | C <sub>e</sub> (mg/L) | q <sub>e</sub> (mg/g) | Langmuir Isotherm |                  | Freundlich Isotherm |                    |
|------------------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                  |               |                        |                  |                       |                       | 1/C <sub>e</sub>  | 1/q <sub>e</sub> | Log C <sub>e</sub>  | Log q <sub>e</sub> |
| 1                | 0.1000        | 48.60                  | 40.70            | 2.55                  | 9.5375                | 0.3922            | 0.1048           | 0.4065              | 0.9794             |
| 2                | 0.1000        | 48.50                  | 38.45            | 2.44                  | 9.0025                | 0.4098            | 0.1111           | 0.3874              | 0.9544             |
| 3                | 0.1000        | 49.40                  | 39.05            | 2.48                  | 9.1438                | 0.4040            | 0.1094           | 0.3936              | 0.9611             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.1000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>2.49</b>           | <b>9.2292</b>         | <b>0.4028</b>     | <b>0.1084</b>    | <b>0.3950</b>       | <b>0.9650</b>      |
| 1                | 0.3000        | 48.60                  | 40.70            | 1.85                  | 3.2375                | 0.5405            | 0.3089           | 0.2672              | 0.5102             |
| 2                | 0.3000        | 48.50                  | 38.45            | 1.87                  | 3.0483                | 0.5348            | 0.3280           | 0.2718              | 0.4841             |
| 3                | 0.3000        | 49.40                  | 39.05            | 1.59                  | 3.1221                | 0.6309            | 0.3203           | 0.2000              | 0.4944             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.3000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>1.77</b>           | <b>3.1360</b>         | <b>0.5687</b>     | <b>0.3191</b>    | <b>0.2463</b>       | <b>0.4962</b>      |
| 1                | 0.5000        | 48.60                  | 40.70            | 1.39                  | 1.9658                | 0.7220            | 0.5087           | 0.1414              | 0.2935             |
| 2                | 0.5000        | 48.50                  | 38.45            | 1.20                  | 1.8625                | 0.8333            | 0.5369           | 0.0792              | 0.2701             |
| 3                | 0.5000        | 49.40                  | 39.05            | 1.46                  | 1.8798                | 0.6873            | 0.5320           | 0.1629              | 0.2741             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.5000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>1.35</b>           | <b>1.9027</b>         | <b>0.7475</b>     | <b>0.5259</b>    | <b>0.1278</b>       | <b>0.2792</b>      |
| 1                | 0.7000        | 48.60                  | 40.70            | 0.81                  | 1.4246                | 1.2346            | 0.7019           | -0.0915             | 0.1537             |
| 2                | 0.7000        | 48.50                  | 38.45            | 0.80                  | 1.3448                | 1.2579            | 0.7436           | -0.0996             | 0.1287             |
| 3                | 0.7000        | 49.40                  | 39.05            | 0.79                  | 1.3666                | 1.2739            | 0.7317           | -0.1051             | 0.1356             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.7000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>0.80</b>           | <b>1.3787</b>         | <b>1.2554</b>     | <b>0.7258</b>    | <b>-0.0988</b>      | <b>0.1393</b>      |
| 1                | 0.9000        | 48.60                  | 40.70            | 0.36                  | 1.1207                | 2.8169            | 0.8923           | -0.4498             | 0.0495             |
| 2                | 0.9000        | 48.50                  | 38.45            | 0.33                  | 1.0589                | 3.0303            | 0.9444           | -0.4815             | 0.0249             |
| 3                | 0.9000        | 49.40                  | 39.05            | 0.31                  | 1.0761                | 3.2258            | 0.9293           | -0.5086             | 0.0319             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.9000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>0.33</b>           | <b>1.0852</b>         | <b>3.0243</b>     | <b>0.9220</b>    | <b>-0.4800</b>      | <b>0.0354</b>      |
| 1                | 1.0000        | 48.60                  | 40.70            | 0.33                  | 1.0093                | 3.0303            | 0.9908           | -0.4815             | 0.0040             |
| 2                | 1.0000        | 48.50                  | 38.45            | 0.28                  | 0.9543                | 3.5714            | 1.0479           | -0.5528             | -0.0203            |
| 3                | 1.0000        | 49.40                  | 39.05            | 0.24                  | 0.9703                | 4.1667            | 1.0307           | -0.6198             | -0.0131            |
| <b>Avg.</b>      | <b>1.0000</b> | <b>48.83</b>           | <b>39.40</b>     | <b>0.28</b>           | <b>0.9779</b>         | <b>3.5895</b>     | <b>1.0231</b>    | <b>-0.5514</b>      | <b>-0.0098</b>     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-14 ไอโซเทอร์มของการดูดซับน้ำเสียโลหะหนักนิกเกิลด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

| การทดลองครั้งที่ | วัสดุ (g)     | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | C <sub>e</sub> (mg/L) | q <sub>e</sub> (mg/g) | Langmuir Isotherm |                  | Freundlich Isotherm |                    |
|------------------|---------------|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                  |               |                        |                  |                       |                       | 1/C <sub>e</sub>  | 1/q <sub>e</sub> | Log C <sub>e</sub>  | Log q <sub>e</sub> |
| 1                | 0.1000        | 46.70                  | 38.70            | 2.52                  | 9.0450                | 0.3968            | 0.1106           | 0.4014              | 0.9564             |
| 2                | 0.1000        | 47.70                  | 37.60            | 2.43                  | 8.7925                | 0.4115            | 0.1137           | 0.3856              | 0.9441             |
| 3                | 0.1000        | 48.05                  | 38.45            | 2.50                  | 8.9875                | 0.4000            | 0.1113           | 0.3979              | 0.9536             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.1000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>2.48</b>           | <b>8.9417</b>         | <b>0.4028</b>     | <b>0.1119</b>    | <b>0.3950</b>       | <b>0.9514</b>      |
| 1                | 0.3000        | 46.70                  | 38.70            | 2.05                  | 3.0542                | 0.4878            | 0.3274           | 0.3118              | 0.4849             |
| 2                | 0.3000        | 47.70                  | 37.60            | 1.87                  | 2.9775                | 0.5348            | 0.3359           | 0.2718              | 0.4739             |
| 3                | 0.3000        | 48.05                  | 38.45            | 1.93                  | 3.0433                | 0.5181            | 0.3286           | 0.2856              | 0.4833             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.3000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>1.95</b>           | <b>3.0250</b>         | <b>0.5136</b>     | <b>0.3306</b>    | <b>0.2897</b>       | <b>0.4807</b>      |
| 1                | 0.5000        | 46.70                  | 38.70            | 1.59                  | 1.8558                | 0.6309            | 0.5389           | 0.2000              | 0.2685             |
| 2                | 0.5000        | 47.70                  | 37.60            | 1.65                  | 1.7975                | 0.6061            | 0.5563           | 0.2175              | 0.2547             |
| 3                | 0.5000        | 48.05                  | 38.45            | 1.59                  | 1.8430                | 0.6289            | 0.5426           | 0.2014              | 0.2655             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.5000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>1.61</b>           | <b>1.8321</b>         | <b>0.6220</b>     | <b>0.5459</b>    | <b>0.2063</b>       | <b>0.2629</b>      |
| 1                | 0.7000        | 46.70                  | 38.70            | 1.46                  | 1.3302                | 0.6873            | 0.7518           | 0.1629              | 0.1239             |
| 2                | 0.7000        | 47.70                  | 37.60            | 1.39                  | 1.2934                | 0.7220            | 0.7732           | 0.1414              | 0.1117             |
| 3                | 0.7000        | 48.05                  | 38.45            | 1.20                  | 1.3304                | 0.8333            | 0.7517           | 0.0792              | 0.1240             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.7000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>1.35</b>           | <b>1.3180</b>         | <b>0.7475</b>     | <b>0.7589</b>    | <b>0.1278</b>       | <b>0.1199</b>      |
| 1                | 0.9000        | 46.70                  | 38.70            | 0.30                  | 1.0667                | 3.3557            | 0.9375           | -0.5258             | 0.0281             |
| 2                | 0.9000        | 47.70                  | 37.60            | 0.26                  | 1.0371                | 3.8023            | 0.9642           | -0.5800             | 0.0158             |
| 3                | 0.9000        | 48.05                  | 38.45            | 0.27                  | 1.0606                | 3.7175            | 0.9429           | -0.5702             | 0.0255             |
| <b>Avg.</b>      | <b>0.9000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.28</b>           | <b>1.0548</b>         | <b>3.6252</b>     | <b>0.9482</b>    | <b>-0.5587</b>      | <b>0.0231</b>      |
| 1                | 1.0000        | 46.70                  | 38.70            | 0.24                  | 0.9616                | 4.2553            | 1.0399           | -0.6289             | -0.0170            |
| 2                | 1.0000        | 47.70                  | 37.60            | 0.24                  | 0.9341                | 4.2373            | 1.0705           | -0.6271             | -0.0296            |
| 3                | 1.0000        | 48.05                  | 38.45            | 0.25                  | 0.9551                | 4.0323            | 1.0471           | -0.6055             | -0.0200            |
| <b>Avg.</b>      | <b>1.0000</b> | <b>47.48</b>           | <b>38.25</b>     | <b>0.24</b>           | <b>0.9503</b>         | <b>4.1750</b>     | <b>1.0525</b>    | <b>-0.6205</b>      | <b>-0.0222</b>     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จ.5 ผลของการนำวัสดุในการดูดซับทองแดง และนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่

การทดลองนำวัสดุดูดซับที่ทำการดูดซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำวัสดุดูดซับเปลือกส้ม และกากชานอ้อยหลังจากที่ได้ดูดซับโลหะในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว นำมาอบให้แห้ง จากนั้นใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร เป็นตัวคายซับที่ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อวัสดุปริมาณ 0.1 กรัม นำไปเขย่า 30 นาที กรองวัสดุออกจากสารละลาย แล้วนำไปวิเคราะห์ AAS หลังจากนั้นนำวัสดุดูดซับไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ จ-15 ผลของการคายซับเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | การดูดซับ (%) | Cu <sup>2+</sup> ก่อนคายซับ (mg/L) | Cu <sup>2+</sup> หลังคายซับ (mg/L) | การคายซับ (%) | Avg. (%) คายซับ |
|----------|------------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------|
| 1        | 47.15                  | 78.47         | 37.00                              | 37.00                              | 100.00        | 98.25±1.53      |
|          | 48.05                  | 80.39         | 38.63                              | 37.55                              | 97.23         |                 |
|          | 47.95                  | 79.46         | 38.10                              | 37.15                              | 97.51         |                 |
| 2        | 47.15                  | 78.15         | 36.85                              | 34.68                              | 94.10         | 94.08±2.26      |
|          | 48.05                  | 78.46         | 37.70                              | 34.61                              | 91.80         |                 |
|          | 47.95                  | 76.64         | 36.75                              | 35.40                              | 96.33         |                 |
| 3        | 47.15                  | 76.83         | 36.23                              | 31.86                              | 87.94         | 85.75±2.50      |
|          | 48.05                  | 76.59         | 36.80                              | 30.55                              | 83.02         |                 |
|          | 47.95                  | 78.26         | 37.53                              | 32.38                              | 86.28         |                 |
| 4        | 47.15                  | 69.57         | 32.80                              | 26.09                              | 79.53         | 78.89±1.62      |
|          | 48.05                  | 70.03         | 33.65                              | 26.95                              | 80.09         |                 |
|          | 47.95                  | 70.28         | 33.70                              | 25.96                              | 77.05         |                 |
| 5        | 47.15                  | 49.73         | 23.45                              | 16.20                              | 69.08         | 69.00±2.74      |
|          | 48.05                  | 50.99         | 24.50                              | 17.57                              | 71.69         |                 |
|          | 47.95                  | 47.08         | 22.58                              | 14.95                              | 66.22         |                 |

ตารางที่ จ-16 ผลของการคายซับเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | การดูดซับ (%) | Ni <sup>2+</sup> ก่อนคายซับ (mg/L) | Ni <sup>2+</sup> หลังคายซับ (mg/L) | การคายซับ (%) | Avg. (%) คายซับ |
|----------|------------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------|
| 1        | 46.70                  | 77.66         | 36.27                              | 36.22                              | 99.88         | 97.70±2.00      |
|          | 47.70                  | 79.84         | 38.08                              | 36.55                              | 95.97         |                 |
|          | 48.05                  | 77.69         | 37.33                              | 36.30                              | 97.24         |                 |
| 2        | 46.70                  | 77.25         | 36.08                              | 33.58                              | 93.08         | 91.88±1.09      |
|          | 47.70                  | 74.26         | 35.42                              | 32.21                              | 90.94         |                 |
|          | 48.05                  | 74.96         | 36.02                              | 33.00                              | 91.62         |                 |
| 3        | 46.70                  | 74.72         | 34.90                              | 30.50                              | 87.39         | 82.39±4.55      |
|          | 47.70                  | 75.68         | 36.10                              | 29.35                              | 81.30         |                 |
|          | 48.05                  | 75.55         | 36.30                              | 28.49                              | 78.49         |                 |
| 4        | 46.70                  | 70.02         | 32.70                              | 25.51                              | 78.02         | 73.97±3.78      |
|          | 47.70                  | 71.28         | 34.00                              | 23.98                              | 70.54         |                 |
|          | 48.05                  | 70.14         | 33.70                              | 24.71                              | 73.33         |                 |
| 5        | 46.70                  | 59.96         | 28.00                              | 14.70                              | 52.50         | 46.30±5.43      |
|          | 47.70                  | 58.60         | 27.95                              | 11.85                              | 42.40         |                 |
|          | 48.05                  | 58.06         | 27.90                              | 12.28                              | 44.01         |                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-17 ผลของการคายซับกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | การดูดซับ (%) | Cu <sup>2+</sup> ก่อนคายซับ (mg/L) | Cu <sup>2+</sup> หลังคายซับ (mg/L) | การคายซับ (%) | Avg. (%) คายซับ |
|----------|------------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------|
| 1        | 47.15                  | 77.03         | 36.32                              | 35.57                              | 97.94         | 96.84±1.56      |
|          | 48.05                  | 77.98         | 37.47                              | 37.38                              | 99.77         |                 |
|          | 47.95                  | 76.78         | 36.82                              | 35.25                              | 95.74         |                 |
| 2        | 47.15                  | 76.01         | 35.61                              | 32.07                              | 90.06         | 87.56±2.27      |
|          | 48.05                  | 72.87         | 36.57                              | 31.82                              | 87.02         |                 |
|          | 47.95                  | 76.08         | 36.15                              | 30.95                              | 85.62         |                 |
| 3        | 47.15                  | 64.33         | 35.84                              | 24.47                              | 68.28         | 67.37±1.23      |
|          | 48.05                  | 62.39         | 35.01                              | 23.10                              | 65.97         |                 |
|          | 47.95                  | 69.68         | 36.48                              | 24.75                              | 67.84         |                 |
| 4        | 47.15                  | 34.78         | 24.75                              | 13.50                              | 54.55         | 59.06±4.00      |
|          | 48.05                  | 36.53         | 24.33                              | 14.71                              | 60.48         |                 |
|          | 47.95                  | 28.55         | 18.74                              | 11.65                              | 62.15         |                 |
| 5        | 47.15                  | 76.01         | 16.40                              | 6.45                               | 39.33         | 43.82±5.42      |
|          | 48.05                  | 72.87         | 17.55                              | 8.75                               | 49.84         |                 |
|          | 47.95                  | 76.08         | 13.69                              | 5.79                               | 42.30         |                 |

ตารางที่ จ-18 ผลของการคายซับกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | การดูดซับ (%) | Ni <sup>2+</sup> ก่อนคายซับ (mg/L) | Ni <sup>2+</sup> หลังคายซับ (mg/L) | การคายซับ (%) | Avg. (%) คายซับ |
|----------|------------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------|
| 1        | 46.70                  | 77.25         | 36.08                              | 36.05                              | 99.92         | 97.77±2.58      |
|          | 47.70                  | 79.41         | 37.88                              | 35.95                              | 94.90         |                 |
|          | 48.05                  | 77.47         | 37.22                              | 36.65                              | 98.48         |                 |
| 2        | 46.70                  | 75.28         | 35.16                              | 31.47                              | 89.50         | 90.68±2.13      |
|          | 47.70                  | 73.10         | 34.87                              | 31.17                              | 89.40         |                 |
|          | 48.05                  | 74.17         | 35.64                              | 33.20                              | 93.14         |                 |
| 3        | 46.70                  | 72.28         | 33.75                              | 25.01                              | 74.10         | 77.99±3.68      |
|          | 47.70                  | 72.24         | 34.46                              | 27.04                              | 78.48         |                 |
|          | 48.05                  | 72.90         | 35.03                              | 28.51                              | 81.40         |                 |
| 4        | 46.70                  | 69.36         | 32.39                              | 19.90                              | 61.45         | 64.58±3.55      |
|          | 47.70                  | 65.86         | 31.42                              | 21.50                              | 68.44         |                 |
|          | 48.05                  | 68.62         | 32.97                              | 21.05                              | 63.85         |                 |
| 5        | 46.70                  | 49.58         | 23.15                              | 7.00                               | 30.23         | 31.77±4.36      |
|          | 47.70                  | 40.02         | 19.09                              | 5.42                               | 28.38         |                 |
|          | 48.05                  | 45.37         | 21.80                              | 8.00                               | 36.68         |                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนำวัสดุดูดซับที่ทำการคายซับไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง และนิกเกิล ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 5 ปริมาณ 25 มิลลิลิตรอีกครั้ง นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ AAS เป็นการศึกษาความสามารถของวัสดุในการนำมาดูดซับใหม่

ตารางที่ จ-19 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับทองแดง

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | นำกลับมาใช้ใหม่ (%) |       |        |              |
|----------|------------------------|------------------|--|---------------------|-------|--------|--------------|
|          |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน       | ตะกอน | ดูดซับ | ดูดซับเฉลี่ย |
| 1        | 47.15                  | 37.85            | 1.00                                   | 97.88               | 19.72 | 78.15  | 77.75±0.97   |
|          | 48.05                  | 39.10            | 1.40                                   | 97.09               | 18.63 | 78.46  |              |
|          | 47.95                  | 38.55            | 1.80                                   | 96.25               | 19.60 | 76.64  |              |
| 2        | 47.15                  | 38.70            | 2.48                                   | 94.75               | 17.92 | 76.83  | 77.22±0.90   |
|          | 48.05                  | 38.45            | 1.65                                   | 96.57               | 19.98 | 76.59  |              |
|          | 47.95                  | 39.70            | 2.18                                   | 95.46               | 17.21 | 78.26  |              |
| 3        | 47.15                  | 38.70            | 5.90                                   | 87.49               | 17.92 | 69.57  | 69.96±0.36   |
|          | 48.05                  | 38.45            | 4.80                                   | 90.01               | 19.98 | 70.03  |              |
|          | 47.95                  | 39.70            | 6.00                                   | 87.49               | 17.21 | 70.28  |              |
| 4        | 47.15                  | 36.45            | 13.00                                  | 72.43               | 22.69 | 49.73  | 49.27±2.00   |
|          | 48.05                  | 37.15            | 12.65                                  | 73.67               | 22.68 | 50.99  |              |
|          | 47.95                  | 36.75            | 14.18                                  | 70.44               | 23.36 | 47.08  |              |
| 5        | 47.15                  | 36.45            | 19.40                                  | 58.85               | 22.69 | 36.16  | 37.82±4.00   |
|          | 48.05                  | 37.15            | 20.38                                  | 57.60               | 22.68 | 34.91  |              |
|          | 47.95                  | 36.75            | 16.43                                  | 65.75               | 23.36 | 42.39  |              |

ตารางที่ จ-20 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพที่ดูดซับนิกเกิล

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | นำกลับมาใช้ใหม่ (%) |       |        |              |
|----------|------------------------|------------------|--|---------------------|-------|--------|--------------|
|          |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน       | ตะกอน | ดูดซับ | ดูดซับเฉลี่ย |
| 1        | 46.70                  | 37.00            | 0.92                                   | 98.02               | 20.77 | 77.25  | 75.49±1.57   |
|          | 47.70                  | 36.50            | 1.08                                   | 97.74               | 23.48 | 74.26  |              |
|          | 48.05                  | 37.15            | 1.13                                   | 97.65               | 22.68 | 74.96  |              |
| 2        | 46.70                  | 37.30            | 2.41                                   | 94.85               | 20.13 | 74.72  | 75.32±0.52   |
|          | 47.70                  | 39.95            | 3.85                                   | 91.93               | 16.25 | 75.68  |              |
|          | 48.05                  | 39.85            | 3.55                                   | 92.61               | 17.07 | 75.55  |              |
| 3        | 46.70                  | 38.25            | 5.55                                   | 88.12               | 18.09 | 70.02  | 70.48±0.70   |
|          | 47.70                  | 39.05            | 5.05                                   | 89.41               | 18.13 | 71.28  |              |
|          | 48.05                  | 39.35            | 5.65                                   | 88.24               | 18.11 | 70.14  |              |
| 4        | 46.70                  | 38.80            | 10.80                                  | 76.87               | 16.92 | 59.96  | 58.87±0.98   |
|          | 47.70                  | 37.05            | 9.10                                   | 80.92               | 22.33 | 58.60  |              |
|          | 48.05                  | 38.10            | 10.20                                  | 78.77               | 20.71 | 58.06  |              |
| 5        | 46.70                  | 38.80            | 21.94                                  | 53.02               | 16.92 | 36.11  | 36.11±1.31   |
|          | 47.70                  | 37.05            | 19.20                                  | 59.75               | 22.33 | 37.42  |              |
|          | 48.05                  | 38.10            | 21.38                                  | 55.52               | 20.71 | 34.81  |              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-21 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของกากขี้เถ้าที่ดูดซับทองแดง

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Cu <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | นำกลับมาใช้ใหม่ (%) |       |        |              |
|----------|------------------------|------------------|--|---------------------|-------|--------|--------------|
|          |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน       | ตะกอน | ดูดซับ | ดูดซับเฉลี่ย |
| 1        | 47.15                  | 37.85            | 1.80                                   | 95.24               | 19.72 | 75.52  | 75.67±0.38   |
|          | 48.05                  | 39.10            | 2.06                                   | 94.73               | 18.63 | 76.11  |              |
|          | 47.95                  | 38.55            | 1.93                                   | 94.99               | 19.60 | 75.39  |              |
| 2        | 47.15                  | 38.70            | 2.35                                   | 93.93               | 17.92 | 76.01  | 74.99±1.83   |
|          | 48.05                  | 38.45            | 2.75                                   | 92.85               | 19.98 | 72.87  |              |
|          | 47.95                  | 39.70            | 2.67                                   | 93.29               | 17.21 | 76.08  |              |
| 3        | 47.15                  | 38.70            | 6.87                                   | 82.25               | 17.92 | 64.33  | 65.47±3.78   |
|          | 48.05                  | 38.45            | 6.78                                   | 82.37               | 19.98 | 62.39  |              |
|          | 47.95                  | 39.70            | 5.21                                   | 86.89               | 17.21 | 69.68  |              |
| 4        | 47.15                  | 36.45            | 15.50                                  | 57.48               | 22.69 | 34.78  | 33.29±4.20   |
|          | 48.05                  | 37.15            | 15.15                                  | 59.22               | 22.68 | 36.53  |              |
|          | 47.95                  | 36.75            | 17.68                                  | 51.90               | 23.36 | 28.55  |              |
| 5        | 47.15                  | 36.45            | 22.05                                  | 39.51               | 22.69 | 16.81  | 15.72±0.96   |
|          | 48.05                  | 37.15            | 23.02                                  | 38.03               | 22.68 | 15.35  |              |
|          | 47.95                  | 36.75            | 22.65                                  | 38.37               | 23.36 | 15.01  |              |

ตารางที่ จ-22 ผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของกากขี้เถ้าที่ดูดซับนิกเกิล

| ครั้งที่ | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ Ni <sup>2+</sup> คงเหลือ (mg/L) | นำกลับมาใช้ใหม่ (%) |       |        |              |
|----------|------------------------|------------------|--|---------------------|-------|--------|--------------|
|          |                        |                  |  | ดูดซับ+ ตะกอน       | ตะกอน | ดูดซับ | ดูดซับเฉลี่ย |
| 1        | 46.70                  | 37.00            | 1.46                                   | 96.05               | 20.77 | 75.28  | 74.18±1.09   |
|          | 47.70                  | 36.50            | 1.25                                   | 96.58               | 23.48 | 73.10  |              |
|          | 48.05                  | 37.15            | 1.17                                   | 96.86               | 22.68 | 74.17  |              |
| 2        | 46.70                  | 37.30            | 2.83                                   | 92.40               | 20.13 | 72.28  | 72.47±0.37   |
|          | 47.70                  | 39.95            | 4.60                                   | 88.49               | 16.25 | 72.24  |              |
|          | 48.05                  | 39.85            | 4.00                                   | 89.96               | 17.07 | 72.90  |              |
| 3        | 46.70                  | 38.25            | 4.80                                   | 87.45               | 18.09 | 69.36  | 67.94±1.84   |
|          | 47.70                  | 39.05            | 6.25                                   | 83.99               | 18.13 | 65.86  |              |
|          | 48.05                  | 39.35            | 5.23                                   | 86.72               | 18.11 | 68.62  |              |
| 4        | 46.70                  | 38.80            | 13.00                                  | 66.49               | 16.92 | 49.58  | 44.99±4.79   |
|          | 47.70                  | 37.05            | 13.95                                  | 62.35               | 22.33 | 40.02  |              |
|          | 48.05                  | 38.10            | 12.93                                  | 66.08               | 20.71 | 45.37  |              |
| 5        | 46.70                  | 38.80            | 27.45                                  | 29.25               | 16.92 | 12.34  | 16.36±4.38   |
|          | 47.70                  | 37.05            | 20.99                                  | 43.36               | 22.33 | 21.03  |              |
|          | 48.05                  | 38.10            | 24.23                                  | 36.42               | 20.71 | 15.71  |              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ จ-23 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

| วัสดุ                            | ปริมาณ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ $Cu^{2+}$ คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----------------------------------|------------|------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|                                  |            |                        |                  |                                 | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| เปลือกส้ม<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ  | 0.1000     | 47.15                  | 37.85            | 0.850                           | 98.20           | 19.72 | 78.47  | 79.44          | 0.9562 |
|                                  | 0.1000     | 48.05                  | 39.10            | 0.475                           | 99.01           | 18.63 | 80.39  |                |        |
|                                  | 0.1000     | 47.95                  | 38.55            | 0.450                           | 99.06           | 19.60 | 79.46  |                |        |
| กากชานอ้อย<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ | 0.1002     | 47.15                  | 37.85            | 1.530                           | 96.76           | 19.72 | 77.03  | 77.26          | 0.6345 |
|                                  | 0.1002     | 48.05                  | 39.10            | 1.630                           | 96.61           | 18.63 | 77.98  |                |        |
|                                  | 0.1002     | 47.95                  | 38.55            | 1.735                           | 96.38           | 19.60 | 76.78  |                |        |

ตารางที่ จ-24 ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

| วัสดุ                            | ปริมาณ (g) | น้ำเสียเริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ $Ni^{2+}$ คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับเฉลี่ย | SD     |
|----------------------------------|------------|------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|-------|--------|----------------|--------|
|                                  |            |                        |                  |                                 | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                |        |
| เปลือกส้ม<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ  | 0.1001     | 46.70                  | 37.15            | 0.885                           | 98.10           | 20.45 | 77.66  | 78.39          | 1.2507 |
|                                  | 0.1001     | 47.70                  | 39.05            | 0.967                           | 97.97           | 18.13 | 79.84  |                |        |
|                                  | 0.1001     | 48.05                  | 38.25            | 0.920                           | 98.09           | 20.40 | 77.69  |                |        |
| กากชานอ้อย<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ | 0.1000     | 46.70                  | 37.15            | 1.073                           | 97.70           | 20.45 | 77.25  | 78.04          | 1.1903 |
|                                  | 0.1000     | 47.70                  | 39.05            | 1.170                           | 97.55           | 18.13 | 79.41  |                |        |
|                                  | 0.1000     | 48.05                  | 38.25            | 1.028                           | 97.86           | 20.40 | 77.47  |                |        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ.7 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ตารางที่ จ-25 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียจากโรงงาน

| วัสดุ                            | ปริมาณ (g) | น้ำเสีย เริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ $Cu^{2+}$ คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับ เฉลี่ย | SD     |
|----------------------------------|------------|-------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|-------|--------|-----------------|--------|
|                                  |            |                         |                  |                                 | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                 |        |
| เปลือกส้ม<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ  | 0.3903     | 161.50                  | 111.50           | 0.67                            | 99.59           | 30.96 | 68.63  | 71.39           | 2.9697 |
|                                  | 0.3903     | 172.50                  | 124.00           | 1.52                            | 99.12           | 28.12 | 71.01  |                 |        |
|                                  | 0.3904     | 117.50                  | 89.00            | 1.43                            | 98.79           | 24.26 | 74.53  |                 |        |
| กากขานอ้อย<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ | 0.8855     | 161.50                  | 111.50           | 1.96                            | 98.79           | 30.96 | 67.83  | 70.74           | 3.1289 |
|                                  | 0.8865     | 172.50                  | 124.00           | 2.66                            | 98.46           | 28.12 | 70.34  |                 |        |
|                                  | 0.8859     | 117.50                  | 89.00            | 2.00                            | 98.30           | 24.26 | 74.05  |                 |        |

ตารางที่ จ-26 ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักนิกเกิลในน้ำเสียจากโรงงาน

| วัสดุ                            | ปริมาณ (g) | น้ำเสีย เริ่มต้น (mg/L) | ชุดควบคุม (mg/L) | ปริมาณ $Ni^{2+}$ คงเหลือ (mg/L) | เปอร์เซ็นต์ (%) |       |        | % ดูดซับ เฉลี่ย | SD     |
|----------------------------------|------------|-------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|-------|--------|-----------------|--------|
|                                  |            |                         |                  |                                 | ดูดซับ+ ตะกอน   | ตะกอน | ดูดซับ |                 |        |
| เปลือกส้ม<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ  | 1.1895     | 250.25                  | 201.25           | 0.78                            | 99.69           | 19.58 | 80.11  | 76.87           | 3.4350 |
|                                  | 1.1890     | 249.88                  | 193.75           | 0.76                            | 99.70           | 22.46 | 77.23  |                 |        |
|                                  | 1.1901     | 251.00                  | 185.00           | 1.10                            | 99.56           | 26.29 | 73.27  |                 |        |
| กากขานอ้อย<br>ปรับปรุง<br>คุณภาพ | 2.0301     | 250.25                  | 201.25           | 6.03                            | 97.59           | 19.58 | 78.01  | 76.12           | 2.4937 |
|                                  | 2.0477     | 249.88                  | 193.75           | 1.18                            | 99.53           | 22.46 | 77.07  |                 |        |
|                                  | 2.0501     | 251.00                  | 185.00           | 1.03                            | 99.59           | 26.29 | 73.30  |                 |        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุชุบด้วยเครื่อง XRF

#### ฉ.1 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในวัสดุชุบด้วยเครื่อง XRF

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF จะทำการวิเคราะห์หลังจากนำวัสดุชุบ ได้แก่ เปลือกส้ม และกากขานอ้อยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH 0.8 M ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$  0.8 M ไปชุบน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของทองแดง และน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของนิกเกิล เพื่อที่จะศึกษาหาปริมาณธาตุองค์ประกอบ และชนิดของธาตุที่มีอยู่ในวัสดุชุบ ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ ฉ-1 แสดงผลการวิเคราะห์วัสดุชุบจากเครื่อง XRF

| ตัวอย่าง                       | ผลการวิเคราะห์  |
|--------------------------------|---|
| OPI                            | O 30.0 %, Mg 1.46 %, P 1.45 %, S 1.22 %, K 1.03 %, Ca 60.0 %, Fe 1.69 %, Cu 1.75 %    |
| OPI + น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง  | O 22.7 %, S 1.55 %, Ca 20.90 %, Fe 1.86 %, Au 3.03 %, Cu 44.8 %                       |
| OPI + น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล | O 27.2 %, S 2.13 %, Ca 30.3 %, Fe 2.67 %, Au 3.03 %, Si 2.42 %, Cu 4.79 %, Ni 25.1 %  |
| OPI + น้ำเสียทองแดงจากโรงงาน   | O 24.6 %, S 1.57 %, Ca 23.8 %, Fe 1.02 %, Cu 48.65 %                                  |
| OPI + น้ำเสียนิกเกิลจากโรงงาน  | O 26.0 %, S 1.94 %, Ca 31.3 %, Fe 1.29 %, Cu 3.16 %, Ni 34.0 %                        |
| SCI                            | O 23.0 %, Zn 2.35 %, Ca 41.2 %, Fe 8.29 %, Au 4.69 %, Cu 9.59 %                       |
| SCI + น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง  | O 17.2 %, Zn 2.06 %, Ca 10.2 %, Pd 11.6 %, Cu 50.24 %                                 |
| SCI + น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล | O 27.6 %, Zn 2.23 %, Ca 8.63 %, Fe 7.06 %, Si 12.6 %, Pd 10.3 %, Cu 8.98 %, Ni 14.4 % |
| SCI + น้ำเสียทองแดงจากโรงงาน   | O 23.0 %, Zn 2.0 %, S 4.51 %, Ca 6.12 %, Fe 5.83 %, Pd 5.82 %, Fe 6.39 %, Cu 43.6 %   |
| SCI + น้ำเสียนิกเกิลจากโรงงาน  | O 20.6 %, Zn 2.90 %, Ca 9.78 %, Fe 6.46 %, Pd 7.09 %, Cu 9.04 %, Ni 40.2 %            |

**หมายเหตุ** OPI คือ เปลือกส้มปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$

SCI คือ กากขานอ้อยปรับปรุงด้วย NaOH ร่วมกับ  $\text{CaCl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการทดลองปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุดูดซับ คือ วัสดุ 10 กรัม : 25 ml NaOH : 25 ml CaCl<sub>2</sub> : 50 ml Ethanol และชายชั้นวัสดุดูดซับในการทดลอง คือ 0.1 กรัม : 25 ml HCl ทำการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ในงานวิจัย ดังนี้

#### 1. การคำนวณค่าใช้จ่ายสารเคมี

##### ตัวอย่างการคำนวณ

1) NaOH (MW = 40 g/mole) ราคา (AR Grade) 335 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.3350 บาท/กรัม  
ราคา (Commercial Grade) 685 บาท/ 25 กิโลกรัม หรือ 0.0274 บาท/กรัม ต้องการเตรียม NaOH 0.8 mol/L หมายความว่าต้องใช้ NaOH ปริมาณ 32 กรัมต่อน้ำ 1 L

ราคา NaOH (AR Grade) 1 L = (32 กรัม × 0.3350 บาท) = 10.72 บาท

ถ้าใช้ NaOH 0.25 ml ปรับปรุงคุณภาพวัสดุ = (10.72 บาท × 0.25 ml) / 1,000 ml  
= 0.0027 บาท

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ NaOH 25 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.003 บาท

ราคา NaOH (Commercial Grade) 1 L = (32 กรัม × 0.0274 บาท) = 0.88 บาท

ถ้าใช้ NaOH 0.25 ml ปรับปรุงคุณภาพวัสดุ = (0.88 บาท × 0.25 ml) / 1,000 ml  
= 0.0002 บาท

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ NaOH 25 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.0002 บาท

2) CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (MW = 147.01 g/mole) ราคา (AR Grade) 580 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.58 บาท/กรัม  
ราคา (Commercial Grade) 510 บาท/ 25 กิโลกรัม หรือ 0.0204 บาท/กรัม ต้องการเตรียม CaCl<sub>2</sub> 0.8 mol/L หมายความว่าต้องใช้ CaCl<sub>2</sub> ปริมาณ 88.8 กรัมต่อน้ำ 1 L

ราคา CaCl<sub>2</sub> (AR Grade) 1 L = (88.8 กรัม × 0.58 บาท) = 51.50 บาท

ถ้าใช้ CaCl<sub>2</sub> 0.25 ml ปรับปรุงคุณภาพวัสดุ = (51.50 บาท × 0.25 ml) / 1,000 ml  
= 0.0129 บาท

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ CaCl<sub>2</sub> 25 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.013 บาท

ราคา CaCl<sub>2</sub> (Commercial Grade) 1 L = (88.8 กรัม × 0.0204 บาท) = 0.013 บาท

ถ้าใช้ CaCl<sub>2</sub> 0.25 ml ปรับปรุงคุณภาพวัสดุ = (1.81 บาท × 0.25 ml) / 1,000 ml  
= 0.0005 บาท

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ CaCl<sub>2</sub> 25 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.001 บาท

3) Ethanol (MW = 46.07 g/mole) ราคา (AR Grade) 900 บาท/ 2.5 L หรือ 360 บาท/L  
ราคา (Commercial Grade) 990 บาท/ 20 L หรือ 49.50 บาท/L

ราคา Ethanol (AR Grade) 0.50 ml = (360 บาท × 0.50 ml) / 1,000 ml

= 0.18 บาท

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ Ethanol 50 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.18 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ราคา Ethanol (Commercial Grade) } 0.50 \text{ ml} &= (49.50 \text{ บาท} \times 50 \text{ ml}) / 1,000 \text{ ml} \\ &= 0.248 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ Ethanol 50 ml ต่อครั้ง ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.25 บาท

4) HCl (37%) (MW = 36.46 g/mole) ราคา (AR Grade) 350 บาท/ 2.5 L หรือ 140 บาท/L ราคา (Commercial Grade) 375 บาท/ 25 L หรือ 15 บาท/L ต้องการเตรียม HCl 0.05 mol/L หมายความว่าต้องใช้ HCl ปริมาณ 4.1449 ml ต่อ น้ำ 1 L

$$\text{ราคา HCl (AR Grade)} = (4.1449 \text{ ml} \times 140 \text{ บาท}) / 1,000 \text{ ml} = 0.58 \text{ บาท}$$

$$\text{ถ้าใช้ HCl 25 ml คายซั้ววัสดุ} = (0.58 \text{ บาท} \times 25 \text{ ml}) / 1,000 \text{ ml} = 0.02 \text{ บาท}$$

ดังนั้น คายซั้ววัสดุด้วย HCl ปริมาณ 25 ml คิดเป็นเงิน 0.02 บาท

$$\text{ราคา HCl (Commercial Grade)} = (4.1449 \text{ ml} \times 15 \text{ บาท}) / 1,000 \text{ ml} = 0.06 \text{ บาท}$$

$$\text{ถ้าใช้ HCl 25 ml คายซั้ววัสดุ} = (0.06 \text{ บาท} \times 25 \text{ ml}) / 1,000 \text{ ml} = 0.002 \text{ บาท}$$

ดังนั้น คายซั้ววัสดุด้วย HCl ปริมาณ 25 ml คิดเป็นเงิน 0.002 บาท

## 2. คำนวณราคาวัสดุดูดซับ

สรุปราคาซื้อขายวัสดุ ดังนี้ - ราคาจากขานอ้อย - 400 บาท/ตัน

ในการทดลองเตรียมวัสดุดูดซับ 10 กรัม จะคิดเป็นจำนวนเงินที่ต้องจ่ายค่าวัสดุ

$$\begin{aligned} 1) \text{ จากขานอ้อย } 10 \text{ กรัม คิดเป็นเงิน} &= (400 \text{ บาท} \times 10 \text{ กรัม}) / 1,000,000 \text{ กรัม} \\ &= 0.004 \text{ บาท} \end{aligned}$$

## 3. วิเคราะห์ค่าไฟฟ้าต่อระยะเวลาในการดูดซับ

1) จากการนำวัสดุดูดซับไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า รุ่น Orbital Shaker กำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 150 วัตต์ เขย่าสาร 1 ชั่วโมง (กำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ = 1,000 วัตต์) คำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} &= (\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} / 1,000) \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า} \\ &= (150 \text{ วัตต์} / 1,000) \times 1 \\ &= 0.15 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลา (ชั่วโมง)} \\ &= 0.15 \text{ กิโลวัตต์} \times 1 \text{ ชั่วโมง} = 0.15 \text{ หน่วย} \end{aligned}$$

- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.76 บาท

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.15 \text{ หน่วย} \times 2.76 \text{ บาท} = 0.4140 \text{ บาท}$$

- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดกลาง (ประเภทที่ 3) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.72 บาท

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.15 \text{ หน่วย} \times 2.72 \text{ บาท} = 0.4080 \text{ บาท}$$

- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดใหญ่ (ประเภทที่ 4) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.72 บาท

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.15 \text{ หน่วย} \times 2.72 \text{ บาท} = 0.4080 \text{ บาท}$$

2) อบวัสดุหลังจากปรับปรุง ด้วยเตาอบ Fisher Scientific รุ่น 637G Oven มีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 1,300 วัตต์ อบวัสดุใช้เวลา 24 ชั่วโมง

$$\text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} = (1,300 \text{ วัตต์} / 1,000) \times 1 = 1.30 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} = 1.3 \text{ กิโลวัตต์} \times 24 \text{ ชั่วโมง} = 31.20 \text{ หน่วย}$$

- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.76 บาท

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 31.20 \text{ หน่วย} \times 2.76 \text{ บาท} = 86.11 \text{ บาท}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดกลาง (ประเภทที่ 3) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.72 บาท  
ค่าไฟฟ้า = 31.20 หน่วย × 2.72 บาท = 84.86 บาท
- อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับกิจการขนาดใหญ่ (ประเภทที่ 4) ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.72 บาท  
ค่าไฟฟ้า = 31.20 หน่วย × 2.72 บาท = 84.86 บาท

#### 4. การคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลอง

โดยวิเคราะห์จากปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการล้างวัสดุหลังจากปรับสภาพต่อ 1 วัสดุ อัตราค่าน้ำประปา จากการประปานครหลวงกำหนดไว้ที่ 9.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (1,000 ลิตร) แสดงว่า น้ำ 1 ลิตร =  $(9.50 \text{ บาท} \times 1 \text{ ลิตร}) / 1,000 \text{ ลิตร} = 0.0095 \text{ บาท}$

ในการทดลองจริง ปริมาณน้ำที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ และคายซับวัสดุต่อ 1 วัสดุ คือ อัตราการใช้ล้างหลังจากปรับปรุงแล้วมีปริมาณ 2.5 ลิตร เมื่อดูดซับแล้วทำการคายซับจะใช้น้ำล้างวัสดุ 0.25 ลิตร ต่อวัสดุ 0.1 กรัม ดังนั้น ใช้น้ำทั้งหมด 2.75 ลิตร  
ต้องเสียน้ำประปา =  $(0.0095 \text{ บาท} \times 2.75 \text{ ลิตร}) / 1 \text{ ลิตร} = 0.03 \text{ บาท}$

#### หมายเหตุ

1. ราคาสารเคมี จาก Thai-Pure Science Company, ณ วันที่ 12 ตุลาคม 2558
2. อัตราค่าไฟฟ้า ข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง
3. อัตราค่าน้ำ ข้อมูลจากการประปานครหลวง
4. ราคากากขี้เถ้า ข้อมูลจาก [www.enmahatg.ac.th/thai/news/envi\\_news\\_fullv2.php](http://www.enmahatg.ac.th/thai/news/envi_news_fullv2.php)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1 การวิเคราะห์สถิติโดยใช้ One way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากรตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป

1.1 การเปรียบเทียบค่าการปรับสภาพของกากชานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub>

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: ยีสเซลล์

| (I) การปรับสภาพ           | (J) การปรับสภาพ           | Mean Difference (I-J)     | Std. Error | Sig.    | 95% Confidence Interval |             |          |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|---------|-------------------------|-------------|----------|
|                           |                           |                           |            |         | Lower Bound             | Upper Bound |          |
| Tukey HSD                 | SC no modified            | SC NaOH .05 M             | -28.2000*  | 2.37768 | .000                    | -36.3188    | -20.0812 |
|                           |                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | -33.5233*  | 2.37768 | .000                    | -41.6421    | -25.4046 |
|                           |                           | SC NaOH 0.8 M             | -34.1600*  | 2.37768 | .000                    | -42.2788    | -26.0412 |
|                           |                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -39.9400*  | 2.37768 | .000                    | -47.0588    | -30.8212 |
|                           |                           | SC NaOH 1 M               | -36.4100*  | 2.37768 | .000                    | -44.5288    | -28.2912 |
|                           |                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -39.4133*  | 2.37768 | .000                    | -47.6321    | -31.2946 |
| SC NaOH .05 M             | SC no modified            | 28.2000*                  | 2.37768    | .000    | 20.0812                 | 36.3188     |          |
|                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | -5.3233                   | 2.37768    | .395    | -13.4421                | 2.7954      |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M             | -5.9600                   | 2.37768    | .428    | -14.0788                | 2.1588      |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -10.7400*                 | 2.37768    | .007    | -18.8588                | -2.6212     |          |
|                           | SC NaOH 1 M               | -8.2100*                  | 2.37768    | .047    | -16.3288                | -.0912      |          |
|                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -11.2133*                 | 2.37768    | .005    | -19.3321                | -3.0946     |          |
| SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | SC no modified            | 33.5233*                  | 2.37768    | .000    | 25.4046                 | 41.6421     |          |
|                           | SC NaOH .05 M             | 5.3233                    | 2.37768    | .335    | -2.7954                 | 13.4421     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M             | -8.867                    | 2.37768    | 1.000   | -8.7554                 | 7.4821      |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -5.4167                   | 2.37768    | .318    | -18.6364                | 2.7021      |          |
|                           | SC NaOH 1 M               | -2.8867                   | 2.37768    | .878    | -11.0054                | 5.2321      |          |
|                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -5.8900                   | 2.37768    | .239    | -14.0088                | 2.2288      |          |
| SC NaOH 0.8 M             | SC no modified            | 34.1600*                  | 2.37768    | .000    | 26.0412                 | 42.2788     |          |
|                           | SC NaOH .05 M             | 5.0600                    | 2.37768    | .228    | -2.1588                 | 14.0788     |          |
|                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 8.357                     | 2.37768    | 1.000   | -7.4821                 | 8.7664      |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -4.7800                   | 2.37768    | .454    | -12.8988                | 3.3388      |          |
|                           | SC NaOH 1 M               | -2.2500                   | 2.37768    | .968    | -10.3688                | 5.8688      |          |
|                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -5.2533                   | 2.37768    | .349    | -13.3721                | 2.8664      |          |
| SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | SC no modified            | 39.9400*                  | 2.37768    | .000    | 30.8212                 | 47.0688     |          |
|                           | SC NaOH .05 M             | 10.7400*                  | 2.37768    | .007    | 2.6212                  | 18.8588     |          |
|                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 5.4167                    | 2.37768    | .318    | -2.7021                 | 13.6364     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M             | 4.7800                    | 2.37768    | .450    | -3.3388                 | 12.8988     |          |
|                           | SC NaOH 1 M               | 2.5300                    | 2.37768    | .929    | -5.5888                 | 10.6488     |          |
|                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -4.733                    | 2.37768    | 1.000   | -8.5921                 | 7.6454      |          |
| SC NaOH 1 M               | SC no modified            | 36.4100*                  | 2.37768    | .000    | 28.2912                 | 44.5288     |          |
|                           | SC NaOH .05 M             | 8.2100*                   | 2.37768    | .047    | -.0912                  | 16.3288     |          |
|                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 2.8867                    | 2.37768    | .878    | -5.2321                 | 11.0054     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M             | 2.2500                    | 2.37768    | .968    | -5.8688                 | 10.3688     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -2.5300                   | 2.37768    | .929    | -10.6488                | 5.5888      |          |
|                           | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -3.0033                   | 2.37768    | .857    | -11.1221                | 5.1154      |          |
| SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | SC no modified            | 39.4133*                  | 2.37768    | .000    | 31.2946                 | 47.5321     |          |
|                           | SC NaOH .05 M             | 11.2133*                  | 2.37768    | .006    | 3.0946                  | 19.3321     |          |
|                           | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 5.8900                    | 2.37768    | .239    | -2.2288                 | 14.0088     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M             | 5.2533                    | 2.37768    | .349    | -2.8664                 | 13.3721     |          |
|                           | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | .4733                     | 2.37768    | 1.000   | -7.6454                 | 6.5921      |          |
|                           | SC NaOH 1 M               | 3.0033                    | 2.37768    | .857    | -5.1154                 | 11.1221     |          |

รูปที่ ข-1 ความแตกต่างระหว่างค่าการปรับสภาพของกากชานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> ที่นำไปดูดซับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ผลทดลอง

| (I) การปรับสภาพ           | (J) เปรียบเทียบสภาพ | Mean Difference (I-J)     | Std. Error | Sig.   | 95% Confidence Interval |             |          |
|---------------------------|---------------------|---------------------------|------------|--------|-------------------------|-------------|----------|
|                           |                     |                           |            |        | Lower Bound             | Upper Bound |          |
| Tukey HSD                 | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | -23.8667*  | .97119 | .000                    | -27.1829    | -20.5505 |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | -25.3467*  | .97119 | .000                    | -28.6629    | -22.0305 |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | -30.7367*  | .97119 | .000                    | -34.0529    | -27.4205 |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -32.8267*  | .97119 | .000                    | -36.1429    | -29.5105 |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | -31.6367*  | .97119 | .000                    | -34.9529    | -28.3205 |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -33.2433*  | .97119 | .000                    | -36.5595    | -29.9271 |
| SC NaOH .05 M             | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 23.8667*   | .97119 | .000                    | 20.5505     | 27.1829  |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | -1.4800    | .97119 | .728                    | -4.7962     | 1.8362   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | -6.8700*   | .97119 | .000                    | -10.1862    | -3.5538  |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -8.9600*   | .97119 | .000                    | -12.2762    | -5.6438  |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | -7.7700*   | .97119 | .000                    | -11.0862    | -4.4538  |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -9.3767*   | .97119 | .000                    | -12.8929    | -6.0605  |
| SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 25.3467*   | .97119 | .000                    | 22.0305     | 28.6629  |
|                           |                     | SC NaOH .05 M             | 1.4800     | .97119 | .728                    | -1.8362     | 4.7962   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | -6.3900*   | .97119 | .001                    | -8.7062     | -2.0738  |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -7.4800*   | .97119 | .000                    | -10.7962    | -4.1638  |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | -8.2900*   | .97119 | .000                    | -9.6062     | -2.9738  |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -7.8967*   | .97119 | .000                    | -11.2129    | -4.5805  |
| SC NaOH 0.8 M             | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 30.7367*   | .97119 | .000                    | 27.4205     | 34.0529  |
|                           |                     | SC NaOH .05 M             | 6.8700*    | .97119 | .000                    | 3.5538      | 10.1862  |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 5.3900*    | .97119 | .001                    | 2.0738      | 8.7062   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -2.0900    | .97119 | .377                    | -5.4062     | 1.2262   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | -9.0000    | .97119 | .982                    | -4.2162     | 2.4162   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -2.5067    | .97119 | .204                    | -5.8229     | .8095    |
| SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 32.8267*   | .97119 | .000                    | 29.5105     | 36.1429  |
|                           |                     | SC NaOH .05 M             | 8.9600*    | .97119 | .000                    | 5.6438      | 12.2762  |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 7.4800*    | .97119 | .000                    | 4.1638      | 10.7962  |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | 2.0900     | .97119 | .377                    | -1.2262     | 5.4062   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | 1.1900     | .97119 | .873                    | -2.1262     | 4.5062   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -4.167     | .97119 | .999                    | -3.7329     | 2.8995   |
| SC NaOH 1 M               | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 31.6367*   | .97119 | .000                    | 28.3205     | 34.9529  |
|                           |                     | SC NaOH .05 M             | 7.7700*    | .97119 | .000                    | 4.4538      | 11.0862  |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 6.2900*    | .97119 | .000                    | 2.9738      | 9.6062   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | .9000      | .97119 | .962                    | -2.4162     | 4.2162   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | -1.1900    | .97119 | .873                    | -4.5062     | 2.1262   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | -1.6067    | .97119 | .653                    | -4.9229     | 1.7095   |
| SC NaOH 1 M+CaCl2 1 M     | SC no modified      | SC NaOH .05 M             | 33.2433*   | .97119 | .000                    | 29.9271     | 36.5595  |
|                           |                     | SC NaOH .05 M             | 9.3767*    | .97119 | .000                    | 6.0605      | 12.6929  |
|                           |                     | SC NaOH 0.5 M+CaCl2 0.5 M | 7.8967*    | .97119 | .000                    | 4.5805      | 11.2129  |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M             | 2.5067     | .97119 | .204                    | -8.095      | 5.8229   |
|                           |                     | SC NaOH 0.8 M+CaCl2 0.8 M | .4167      | .97119 | .999                    | -2.8995     | 3.7329   |
|                           |                     | SC NaOH 1 M               | 1.6067     | .97119 | .653                    | -1.7095     | 4.9229   |

รูปที่ ซ-2 ความแตกต่างระหว่างค่าการปรับสภาพของกากชานอ้อยด้วย NaOH และ CaCl<sub>2</sub> ที่นำไปดูดซับนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐานกำหนดให้  $H_0$  กากขานอ้อยปรับสภาพมีประสิทธิภาพดูดซับไม่แตกต่างกัน  
 $H_1$  กากขานอ้อยปรับสภาพมีประสิทธิภาพดูดซับแตกต่างกัน

จากรูปที่ ซ-1 จะพบว่า การคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าการปรับสภาพของกากขานอ้อยด้วยด้วย NaOH 0.5 M -NaOH 1 M + CaCl<sub>2</sub> 1 M มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียทองแดงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากค่า Sig. มีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับ  $H_0$  ปฏิเสธ  $H_1$  ส่วน รูปที่ ซ-2 ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียนิกเกิลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เช่นกัน

## 1.2 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา

| (I) TIMES | (J) TIMES | Mean Difference (I-J) |            | Sig.    | 95% Confidence Interval |             |          |
|-----------|-----------|-----------------------|------------|---------|-------------------------|-------------|----------|
|           |           |                       | Std. Error |         | Lower Bound             | Upper Bound |          |
| Tukey HSD | 20 min    | 40 min                | -20.8833*  | 2.37278 | .000                    | -28.8533    | -12.9133 |
|           |           | 60 min                | -27.6400*  | 2.37278 | .000                    | -35.6100    | -19.6700 |
|           |           | 80 min                | -27.1100*  | 2.37278 | .000                    | -35.0800    | -19.1400 |
|           |           | 100 min               | -27.5767*  | 2.37278 | .000                    | -35.5467    | -19.6067 |
|           |           | 120 min               | -27.2567*  | 2.37278 | .000                    | -35.2267    | -19.2867 |
|           | 40 min    | 20 min                | 20.8833*   | 2.37278 | .000                    | 12.9133     | 28.8533  |
|           |           | 60 min                | -6.7567    | 2.37278 | .116                    | -14.7267    | 1.2133   |
|           |           | 80 min                | -6.2267    | 2.37278 | .164                    | -14.1967    | 1.7433   |
|           |           | 100 min               | -6.6933    | 2.37278 | .121                    | -14.6633    | 1.2767   |
|           |           | 120 min               | -6.3733    | 2.37278 | .149                    | -14.3433    | 1.5967   |
|           | 60 min    | 20 min                | 27.6400*   | 2.37278 | .000                    | 19.6700     | 35.6100  |
|           |           | 40 min                | 6.7567     | 2.37278 | .116                    | -1.2133     | 14.7267  |
|           |           | 80 min                | -.5300     | 2.37278 | 1.000                   | -7.4400     | 8.5000   |
|           |           | 100 min               | -.0633     | 2.37278 | 1.000                   | -7.9067     | 8.0333   |
|           |           | 120 min               | -.3833     | 2.37278 | 1.000                   | -7.5867     | 8.3533   |
|           | 80 min    | 20 min                | 27.1100*   | 2.37278 | .000                    | 19.1400     | 35.0800  |
|           |           | 40 min                | 6.2267     | 2.37278 | .164                    | -1.7433     | 14.1967  |
|           |           | 60 min                | -.5300     | 2.37278 | 1.000                   | -8.5000     | 7.4400   |
|           |           | 100 min               | -.4667     | 2.37278 | 1.000                   | -8.4367     | 7.5033   |
|           |           | 120 min               | -.1467     | 2.37278 | 1.000                   | -8.1167     | 7.8233   |
|           | 100 min   | 20 min                | 27.5767*   | 2.37278 | .000                    | 19.6067     | 35.5467  |
|           |           | 40 min                | 6.6933     | 2.37278 | .121                    | -1.2767     | 14.6633  |
|           |           | 60 min                | -.0633     | 2.37278 | 1.000                   | -8.0333     | 7.9067   |
|           |           | 80 min                | .4667      | 2.37278 | 1.000                   | -7.5033     | 8.4367   |
|           |           | 120 min               | .3200      | 2.37278 | 1.000                   | -7.6500     | 8.2900   |
|           | 120 min   | 20 min                | 27.2567*   | 2.37278 | .000                    | 19.2867     | 35.2267  |
|           |           | 40 min                | 6.3733     | 2.37278 | .149                    | -1.5967     | 14.3433  |
|           |           | 60 min                | -.3833     | 2.37278 | 1.000                   | -8.3533     | 7.5867   |
|           |           | 80 min                | .1467      | 2.37278 | 1.000                   | -7.8233     | 8.1167   |
|           |           | 100 min               | -.3200     | 2.37278 | 1.000                   | -8.2900     | 7.6500   |

### รูปที่ ซ-3 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับทองแดงด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ผลทดสอบ

|           | (I) TIMES | (J) TIMES | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig.    | 95% Confidence Interval |             |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------|------------|---------|-------------------------|-------------|
|           |           |           |                       |            |         | Lower Bound             | Upper Bound |
| Tukey HSD | 20 min    | 40 min    | -11.6800*             | 1.82071    | .000    | -17.7956                | -5.5644     |
|           |           | 60 min    | -16.2767*             | 1.82071    | .000    | -22.3923                | -10.1610    |
|           |           | 80 min    | -15.9700*             | 1.82071    | .000    | -22.0856                | -9.8544     |
|           |           | 100 min   | -15.8900*             | 1.82071    | .000    | -22.0056                | -9.7744     |
|           |           | 120 min   | -16.2633*             | 1.82071    | .000    | -22.3790                | -10.1477    |
|           | 40 min    | 20 min    | 11.6800*              | 1.82071    | .000    | 5.5644                  | 17.7956     |
|           |           | 60 min    | -4.5967               | 1.82071    | .191    | -10.7123                | 1.5190      |
|           |           | 80 min    | -4.2900               | 1.82071    | .245    | -10.4056                | 1.8256      |
|           |           | 100 min   | -4.2100               | 1.82071    | .261    | -10.3256                | 1.9056      |
|           |           | 120 min   | -4.5833               | 1.82071    | .193    | -10.6990                | 1.5323      |
|           | 60 min    | 20 min    | 16.2767*              | 1.82071    | .000    | 10.1610                 | 22.3923     |
|           |           | 40 min    | 4.5967                | 1.82071    | .191    | -1.5190                 | 10.7123     |
|           |           | 80 min    | .3067                 | 1.82071    | 1.000   | -6.8090                 | 6.4223      |
|           |           | 100 min   | .3867                 | 1.82071    | 1.000   | -5.7290                 | 6.5023      |
|           |           | 120 min   | -.0133                | 1.82071    | 1.000   | -6.1023                 | 6.1290      |
| 80 min    | 20 min    | 15.9700*  | 1.82071               | .000       | 9.8544  | 22.0856                 |             |
|           | 40 min    | 4.2900    | 1.82071               | .245       | -1.8256 | 10.4056                 |             |
|           | 60 min    | -.3067    | 1.82071               | 1.000      | -6.4223 | 5.8090                  |             |
|           | 100 min   | .0800     | 1.82071               | 1.000      | -6.0356 | 6.1956                  |             |
|           | 120 min   | -.2933    | 1.82071               | 1.000      | -6.4090 | 5.8223                  |             |
| 100 min   | 20 min    | 15.8900*  | 1.82071               | .000       | 9.7744  | 22.0056                 |             |
|           | 40 min    | 4.2100    | 1.82071               | .261       | -1.9056 | 10.3256                 |             |
|           | 60 min    | -.3867    | 1.82071               | 1.000      | -6.5023 | 5.7290                  |             |
|           | 80 min    | -.0800    | 1.82071               | 1.000      | -6.1956 | 6.0356                  |             |
|           | 120 min   | -.3733    | 1.82071               | 1.000      | -6.4890 | 5.7423                  |             |
| 120 min   | 20 min    | 16.2633*  | 1.82071               | .000       | 10.1477 | 22.3790                 |             |
|           | 40 min    | 4.5833    | 1.82071               | .193       | -1.5323 | 10.6990                 |             |
|           | 60 min    | -.0133    | 1.82071               | 1.000      | -6.1290 | 6.1023                  |             |
|           | 80 min    | .2933     | 1.82071               | 1.000      | -5.8223 | 6.4090                  |             |
|           | 100 min   | .3733     | 1.82071               | 1.000      | -5.7423 | 6.4890                  |             |

## รูปที่ ๔-4 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้มปรับปรุงคุณภาพ

สมมติฐานกำหนดให้  $H_0$  เวลา 60 นาที - 120 นาที ไม่แตกต่างกัน $H_1$  เวลา 60 นาที - 120 นาที แตกต่างกัน

จากรูปที่ ๔-3 และรูปที่ ๔-4 พบว่า ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับที่ 60-120 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากค่า Sig. มีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับ  $H_0$  ปฏิเสธ  $H_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ผลทดสอบ

|           | (I) TIMES | (J) TIMES | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig.    | 95% Confidence Interval |             |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------|------------|---------|-------------------------|-------------|
|           |           |           |                       |            |         | Lower Bound             | Upper Bound |
| Tukey HSD | 20 min    | 40 min    | -16.3733*             | 1.35426    | .000    | -20.9222                | -11.8245    |
|           |           | 60 min    | -23.3100*             | 1.35426    | .000    | -27.8588                | -18.7612    |
|           |           | 80 min    | -24.1067*             | 1.35426    | .000    | -28.6555                | -19.5578    |
|           |           | 100 min   | -23.1500*             | 1.35426    | .000    | -27.6988                | -18.6012    |
|           |           | 120 min   | -23.9100*             | 1.35426    | .000    | -28.4588                | -19.3612    |
|           | 40 min    | 20 min    | 16.3733*              | 1.35426    | .000    | 11.8245                 | 20.9222     |
|           |           | 60 min    | -6.9367*              | 1.35426    | .003    | -11.4855                | -2.3878     |
|           |           | 80 min    | -7.7333*              | 1.35426    | .001    | -12.2822                | -3.1845     |
|           |           | 100 min   | -6.7767*              | 1.35426    | .003    | -11.3255                | -2.2278     |
|           |           | 120 min   | -7.5367*              | 1.35426    | .001    | -12.0855                | -2.9878     |
|           | 60 min    | 20 min    | 23.3100*              | 1.35426    | .000    | 18.7612                 | 27.8588     |
|           |           | 40 min    | 6.9367*               | 1.35426    | .003    | 2.3878                  | 11.4855     |
|           |           | 80 min    | -7.967                | 1.35426    | .990    | -5.3455                 | 3.7522      |
|           |           | 100 min   | .1600                 | 1.35426    | 1.000   | -4.3888                 | 4.7088      |
|           |           | 120 min   | -6.000                | 1.35426    | .997    | -5.1488                 | 3.9488      |
|           | 80 min    | 20 min    | 24.1067*              | 1.35426    | .000    | 19.5578                 | 28.6555     |
|           |           | 40 min    | 7.7333*               | 1.35426    | .001    | 3.1845                  | 12.2822     |
|           |           | 60 min    | 7.967                 | 1.35426    | .990    | -3.7522                 | 5.3455      |
|           |           | 100 min   | 9.567                 | 1.35426    | .978    | -3.5922                 | 5.5055      |
|           |           | 120 min   | 1.967                 | 1.35426    | 1.000   | -4.3522                 | 4.7455      |
| 100 min   | 20 min    | 23.1500*  | 1.35426               | .000       | 18.6012 | 27.6988                 |             |
|           | 40 min    | 6.7767*   | 1.35426               | .003       | 2.2278  | 11.3255                 |             |
|           | 60 min    | -.1600    | 1.35426               | 1.000      | -4.7088 | 4.3888                  |             |
|           | 80 min    | -.9567    | 1.35426               | .978       | -5.5055 | 3.5922                  |             |
|           | 120 min   | -.7600    | 1.35426               | .992       | -5.3088 | 3.7888                  |             |
| 120 min   | 20 min    | 23.9100*  | 1.35426               | .000       | 19.3612 | 28.4588                 |             |
|           | 40 min    | 7.5367*   | 1.35426               | .001       | 2.9878  | 12.0855                 |             |
|           | 60 min    | .6000     | 1.35426               | .997       | -3.9488 | 5.1488                  |             |
|           | 80 min    | -.1967    | 1.35426               | 1.000      | -4.7455 | 4.3522                  |             |
|           | 100 min   | .7600     | 1.35426               | .992       | -3.7888 | 5.3088                  |             |

รูปที่ ซ-5 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูซ้ำของแดงด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ผลทดลอง

|           | (I) TIMES | (J) TIMES | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig.     | 95% Confidence Interval |             |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------|------------|----------|-------------------------|-------------|
|           |           |           |                       |            |          | Lower Bound             | Upper Bound |
| Tukey HSD | 20 min    | 40 min    | -16.2167*             | 3.42502    | .005     | -27.7210                | -4.7123     |
|           |           | 60 min    | -18.4433*             | 3.42502    | .002     | -29.9477                | -6.9390     |
|           |           | 80 min    | -18.4800*             | 3.42502    | .002     | -29.9844                | -6.9756     |
|           |           | 100 min   | -18.4133*             | 3.42502    | .002     | -29.9177                | -6.9090     |
|           |           | 120 min   | -18.5000*             | 3.42502    | .002     | -30.0044                | -6.9956     |
|           | 40 min    | 20 min    | 16.2167*              | 3.42502    | .005     | 4.7123                  | 27.7210     |
|           |           | 60 min    | -2.2267               | 3.42502    | .984     | -13.7310                | 9.2777      |
|           |           | 80 min    | -2.2633               | 3.42502    | .983     | -13.7677                | 9.2410      |
|           |           | 100 min   | -2.1967               | 3.42502    | .985     | -13.7010                | 9.3077      |
|           |           | 120 min   | -2.2833               | 3.42502    | .983     | -13.7877                | 9.2210      |
|           | 60 min    | 20 min    | 18.4433*              | 3.42502    | .002     | 6.9390                  | 29.9477     |
|           |           | 40 min    | 2.2267                | 3.42502    | .984     | -9.2777                 | 13.7310     |
|           |           | 80 min    | -.0367                | 3.42502    | 1.000    | -11.5410                | 11.4677     |
|           |           | 100 min   | -.0300                | 3.42502    | 1.000    | -11.4744                | 11.5344     |
|           |           | 120 min   | -.0567                | 3.42502    | 1.000    | -11.5610                | 11.4477     |
|           | 80 min    | 20 min    | 16.4800*              | 3.42502    | .002     | 6.9756                  | 29.9844     |
|           |           | 40 min    | 2.2633                | 3.42502    | .983     | -9.2410                 | 13.7677     |
|           |           | 60 min    | -.0867                | 3.42502    | 1.000    | -11.4877                | 11.5410     |
|           |           | 100 min   | -.0667                | 3.42502    | 1.000    | -11.4377                | 11.5710     |
|           |           | 120 min   | -.0200                | 3.42502    | 1.000    | -11.5244                | 11.4844     |
| 100 min   | 20 min    | 18.4133*  | 3.42502               | .002       | 6.9090   | 29.9177                 |             |
|           | 40 min    | 2.1967    | 3.42502               | .985       | -9.3077  | 13.7010                 |             |
|           | 60 min    | -.0300    | 3.42502               | 1.000      | -11.5344 | 11.4744                 |             |
|           | 80 min    | -.0667    | 3.42502               | 1.000      | -11.5710 | 11.4377                 |             |
|           | 120 min   | -.0867    | 3.42502               | 1.000      | -11.5910 | 11.4177                 |             |
| 120 min   | 20 min    | 18.5000*  | 3.42502               | .002       | 6.9956   | 30.0044                 |             |
|           | 40 min    | 2.2833    | 3.42502               | .983       | -9.2210  | 13.7877                 |             |
|           | 60 min    | -.0567    | 3.42502               | 1.000      | -11.4477 | 11.5610                 |             |
|           | 80 min    | -.0200    | 3.42502               | 1.000      | -11.4844 | 11.5244                 |             |
|           | 100 min   | -.0867    | 3.42502               | 1.000      | -11.4177 | 11.5910                 |             |

รูปที่ ซ-6 ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับนิกเกิลด้วยกากขานอ้อยปรับปรุงคุณภาพ

สมมติฐานกำหนดให้  $H_0$  เวลา 60 นาที - 120 นาที ไม่แตกต่างกัน

$H_1$  เวลา 60 นาที - 120 นาที แตกต่างกัน

จากรูปที่ ซ-5 และรูปที่ ซ-6 พบว่า ความแตกต่างระหว่างระยะเวลาการดูดซับที่เวลา 60 นาที - 120 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากค่า Sig. มีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับ  $H_0$  ปฏิเสธ  $H_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

#### มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 13 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 มีใจความสำคัญดังแสดงในตารางมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

| ดัชนีคุณภาพน้ำ                                     | ค่ามาตรฐาน  | วิธีวิเคราะห์  |
|--|---|--|
| 1. ค่าความเป็นกรด และ<br>ด่าง (pH value)           | 5.5-9.0   | pH Meter   |
| 2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ<br>Total Dissolved Solids) | ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจ<br>แตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรับรอน้ำ<br>ทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่<br>คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน<br>5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความ<br>เค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ<br>ลดลงทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีความมากกว่าค่าทีดี<br>เอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย หรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน<br>5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร | ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ<br>103 ± 105 °C เป็นเวลา 1<br>ชั่วโมง |
| 3. สารแขวนลอย                                      | ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่าง<br>แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ<br>ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของ<br>ระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุม<br>มลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร  | กรองผ่านกระดาษกรองใย<br>แก้ว (Glass Fiber Filter<br>Disc)  |
| 4. อุณหภูมิ<br>(Temperature)                       | ไม่เกิน 40 °C   | เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำ<br>การเก็บตัวอย่างน้ำ          |
| 5. สีหรือกลิ่น                                     | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ   | ไม่ได้กำหนด  |
| 6. ซัลไฟด์ (Sulfide as<br>H <sub>2</sub> S)        | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร  | Titrate  |
| 7. ไซยาไนต์ (Cyanide as<br>HCN)                    | ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร  | กลั่น และ ตามด้วยวิธี<br>Pyridine Barbituric Acid          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฅ-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

| ดัชนีคุณภาพน้ำ  | ค่ามาตรฐาน   | วิธีวิเคราะห์   |
|---|--|---|
| 8. น้ำมัน และ ไขมัน (Fat Oil and Grease, FOG)               | - ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ตาที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร | สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหา น้ำหนักของน้ำมัน และ ไขมัน |
| 9. พอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)                             | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   | Spectrophotometry                                       |
| 10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)                                | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   | กลั่น และ ตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine                 |
| 11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)                             | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   | Iodometric Method                                       |
| 12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัด ศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide) | ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่ กำหนด   | Gas-Chromatography                                      |
| 13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)             | ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ แยกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร              | Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน     |
| 14. ค่าทีเคเอ็น (TKN : Total Kjeldahl Nitrogen)             | - ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร          | Kjeldahl  |
| 15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)                | - ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ อาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร          | Potassium Dichromate Digestion                          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฅ-1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

| ดัชนีคุณภาพน้ำ                                       | ค่ามาตรฐาน                     | วิธีวิเคราะห์  |
|--|--------------------------------|--|
| 16. โลหะหนัก (Heavy Metal)                           |                                |  |
| 16.1. สังกะสี  | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   | Atomic Absorption Spectrophotometer ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductivity Coupled Plasma : ICP |
| 16.2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) | ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร  |  |
| 16.3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)    | ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร  |  |
| 16.4. ทองแดง   | ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |  |
| 16.5. แคดเมียม                                       | ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร  |  |
| 16.6. แบเรียม  | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |  |
| 16.7. ตะกั่ว   | ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |  |
| 16.8. นิกเกิล  | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |  |
| 16.9. แมงกานีส                                       | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร   |  |
| 16.10. อาร์เซนิก                                     | ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร  |  |
| 16.11. เซเลเนียม                                     | ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร  |  |
| 16.12. พรอท  | ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร |  |

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 13 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### หลักการและเทคนิคของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

#### 1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (AAS) (ชนัญชิตา, 2556)

##### 1.1 หลักการ

เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer ; AAS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุที่สามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณ เป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว มีความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพไวสูง และ เป็นเทคนิคที่เฉพาะ เพราะสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนน้อยๆ ในน้ำเสียได้ และ ไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างนำก่อนการวิเคราะห์ ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่สูงมากนักในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โดยทั่วไปมักจะนิยมใช้กัน ทั้งนี้เครื่อง AAS สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ถึง 67 ธาตุ

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS เมื่อนำน้ำตัวอย่างที่เตรียมในรูปของสารละลายดูดเข้าไปในเปลวไฟ Air-Acetylene ของเครื่อง AAS พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สภาวะพื้น อะตอมที่สภาวะพื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สภาวะกระตุ้น การดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก (Hollow Cathode Lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง จะขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ซึ่งธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีค่าการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน และ ธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ในการวัดตัวอย่างค่าการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่เตรียม ค่าความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่างสามารถหาได้โดยการวัด และ นำไปเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

##### 1.2 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง AAS

องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่อง AAS มี 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1) แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เพื่อให้การวัดมีความไว (sensitivity) มากที่สุด หลอดไฟกำเนิดแสงที่ดีควรปล่อยคลื่นแสงจำเพาะที่มีความเข้มและแคบมาก ออกมาอย่างสม่ำเสมอ ส่วนใหญ่เป็น hollow cathode lamp (HCL) และ electrodeless discharge lamp (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

2) ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ (Atomizer unit) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (free atom) โดยใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือใช้กระแสไฟฟ้า

3) ส่วนแยกแสง (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ อาจเป็นแผ่นกรองแสง (filter) เกรตติง (grating) หรือปริซึม (prism)

4) ส่วนวัดสัญญาณ (Detector) ส่วนใหญ่เป็นหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

5) ส่วนประมวลผลและอ่านผล (Data system) ทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนวัดสัญญาณให้เป็นข้อมูลสื่อให้ผู้เข้าใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไวสาหรับการใชงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ

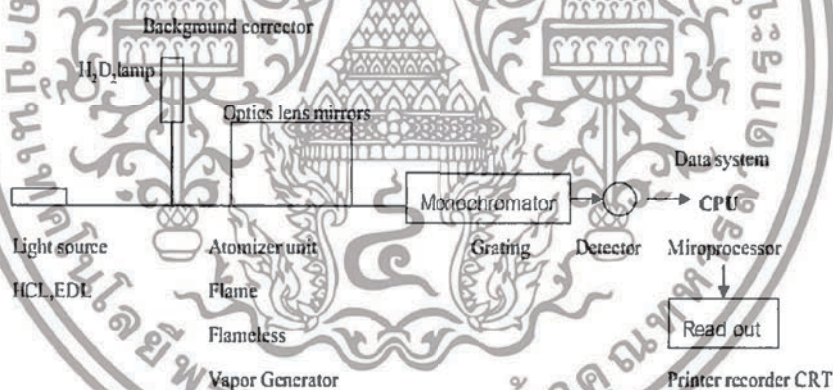
เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ

1) ใช้ Flame Atomization Technique เทคนิคนี้จะใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสม

2) ใช้ Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electro thermal atomizer หรือ graphite furnace) โดยสามารถโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผามีค่าต่างๆ กัน และใช้เวลาต่างๆ กันได้

3) ใช้ Hydride Generation Technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค 1) และ 2) ไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีที่ทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As Se Te Ge Bi และ Sb

4) ใช้ Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ เช่น การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะ



รูปที่ ๑-1 แผนภาพองค์ประกอบของเครื่อง AAS (ชนิดซีตา, 2556)

### 1.4 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization)

กระบวนการนี้สารตัวอย่างจะต้องเป็นสารละลายที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีสารแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรือสารอินทรีย์ก็ได้ กระบวนการ Atomization มี 5 ขั้นตอนคือ

1) Nebulization เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ (mist) ด้วยเครื่องเรียกว่า nebulizer

2) Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายรวมกันเป็นหยดสารละลายโดยไม่สามารถจะลอยอยู่ในอากาศได้ จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายเกิดผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (fuel) และออกซิแดนซ์ใน spray chamber ของ nebulizer

4) Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กนั้นถูกกำจัดไปทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ

5) Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยที่พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะไปทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์เป็นโมเลกุลและเป็นอะตอมเสรีบางครั้งอาจเกิดการกระตุ้นหรือเกิดการไอออไนเซชันต่อไปได้



### 1.5 ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS

1) เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS  
2) พิจารณาว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไรและเลือกวิธีการที่เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

3) จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ควมคุม ซึ่งจะมี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้วเปรียบเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกให้ได้ โดย

ก. เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่อง และ เลือกกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

ข. จัดเครื่องให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ เช่น ใช้ Flame หรือ Flameless Atomization การปรับอัตราการใช้ของออกซิแดนซ์ อากาศ และ เชื้อเพลิง เป็นต้น

ค. จัดความกว้างของช่องแสงเข้าออกจากโมนโครเมเตอร์ (slit width) ให้เหมาะสม

4) เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects)

แม้ว่าเครื่อง AAS จะเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมาก ทั้งแหล่งกำเนิด และ การดูดกลืนแสง แต่ก็มีโอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่เข้ามารบกวนได้ ทำให้ค่า Absorbance วัดได้มากหรือน้อยกว่าปกติ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดได้ ดังนั้น ผู้วิเคราะห์ควรศึกษาว่าสารตัวอย่างเป็นอะไร จะละลายด้วยอะไร มีองค์ประกอบอะไรบ้าง และ จะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะไร ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยที่สุด โดยสิ่งรบกวนสามารถจำแนกได้ ดังนี้

- Physical effects เป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ไปเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลายที่เข้าไปใน nebulizer หรือขนาดของหยดสารละลาย (drop size) ได้แก่ volatility ของตัวสารละลาย surface tension, viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือ ทำให้สารละลายเจือจางลง หรือเติม organic solvents หรือเตรียมสารละลายให้มี matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง

- Chemical effects ได้แก่ แอนไอออน เช่น ฟอสเฟต ซัลเฟต อะลูมิเนียม ซิลิเกตหรือแอนไอออนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบางตัว ทำให้ผลการหาปริมาณของพวก alkaline earth metals ได้น้อยกว่าปกติ เมื่อใช้ air-CH flame หรือ flame temperature ต่ำ เพราะมีการเกิดสารประกอบที่อยู่ตัวบางชนิดเรียกว่า refractory compound จึงทำให้การแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์มีน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

## 1.7 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS นั้นอาจทำได้หลายวิธี โดยแต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดี และ ข้อเสีย อีกทั้งการใช้งานที่แตกต่างกัน และ อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการทำให้สารเกิด atomization ไม่มีวิธีไหนเลยที่จัดว่าดีที่สุด ดังนั้น ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการ โดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลายๆ อย่าง เช่น ความรวดเร็วของการวิเคราะห์ ความยากง่าย ความเข้มข้นสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารที่จะวิเคราะห์ ตลอดทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถอำนวยความสะดวกแก่เทคนิคมีหลักการทั่วไป ดังนี้

1. Flame Techniques เทคนิคนี้ใช้ Flame ทำให้เกิด atomization โดยทั่วไปแล้วเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สารตัวอย่างควรจะต้องมีลักษณะ ดังนี้

- สารตัวอย่างต้องเป็นสารละลายหรือของเหลว
- สารตัวอย่างควรมีสารที่เป็นของแข็งละลายอยู่ไม่เกิน 5 % มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเกิด atomization
- สารตัวอย่างควรจะสลายตัวได้ดีด้วยความร้อน
- ควรมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
- สารละลายตัวอย่างจะต้องมีอย่างน้อย 1 ml

เทคนิคนี้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญมากนัก ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่อยู่ที่การเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นสารละลาย มีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง

2. Graphite Furnace เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ สารตัวอย่างควรที่จะมีลักษณะ ดังนี้

- สารตัวอย่างอาจเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือของแข็งละลายในของเหลว ซึ่งถ้าละลายเป็นเนื้อเดียวกันก็ยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารตัวอย่างต้องสลายตัวด้วยความร้อน และ ทำให้สารเจือปนกับสารที่จะวิเคราะห์ แยกออกจากกันได้

- สารตัวอย่างต้องมีช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม
- สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะต้องเปรียบเทียบกันได้
- ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ต้องใช้อาจเป็น 0.5 ไมโครลิตร

เทคนิคนี้ให้ความแม่นยำและ sensitivity ในการวิเคราะห์ดี แต่ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร อัตราค่าวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ต้องใช้ graphite tube และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

3. Vapor Generation Techniques เทคนิคนี้จำเป็นต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะ ดังนี้

- สารตัวอย่างจำเป็นต้องย่อยให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรดและมี oxidation state ที่เหมาะสม

- ใช้วิเคราะห์ได้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น
- ควรจะต้องปราศจากสิ่งรบกวนทางเคมี
- ช่วงความเข้มข้นจะต้องพอเหมาะ
- เป็นเทคนิคที่ให้ sensitivity สูงสำหรับธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้
- ค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับสารเคมีและเวลาที่ใช้

## 2. การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และ รูพรุน (สุพะไชย์, 2555)

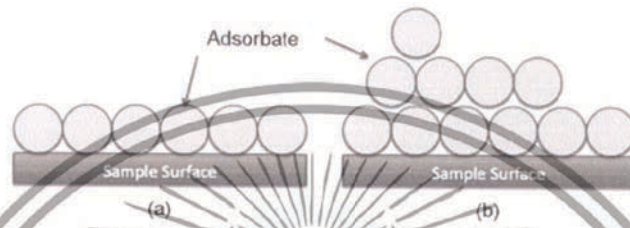
ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวเส้นผ่านศูนย์กลาง และ รูพรุนของสาร วิธีการที่ใช้มากที่สุดในการหาพื้นที่ผิวจะใช้เทคนิค BET  $N_2$ -adsorption ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะใช้วิธีการ out gas ซึ่งเป็นการไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  การศึกษาขนาดรูพรุน และ BET surface area อาศัยหลักการของสารตัวอย่างที่ต้องการวัดนั้นสามารถดูดก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซบางชนิดบริเวณผิวหน้า และสามารถแทรกซึมเข้าไปทั่วบริเวณของรูพรุนได้ ซึ่งเทคนิคที่เลือกใช้นี้เป็นเทคนิคที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นสารดูดซับ โดยการทดสอบจะแสดงผลเป็น adsorption isotherm ดังนั้น เทคนิค BET  $N_2$ -adsorption คือ เทคนิคการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้น

บรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ ญ-3 พบว่า แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ ญ-4



รูปที่ ๓- การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้า และ ภายในรูพรุนของวัสดุ (สุพะไชย์, 2555)



รูปที่ ๓-4 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ (สุพะไชย์, 2555)

ดังนั้น เครื่อง BET  $N_2$  Adsorption เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรของรูพรุน และ ขนาดของรูพรุน ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเตรียมสารตัวอย่าง ใช้สำหรับกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ โดยการทำให้ระเหยออกไปในสภาวะแก๊สที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำกับส่วนวิเคราะห์เป็นส่วนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยทาง โดยใช้การดูดซับไนโตรเจนซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

## 2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET  $N_2$  Adsorption มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ Degas Sample และ Analysis ซึ่งตัวอย่างที่สามารถทำการวิเคราะห์จะต้องเป็นของแข็ง และสามารถแบ่งขนาดให้มีขนาดพอเหมาะกับการใช้ของเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ เช่น catalyst, ash, membrane เป็นต้น



รูปที่ ๓-5 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ปริมาตรรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบด้วยเครื่อง BET  $N_2$ -Adsorption วิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ปริมาตรรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ ญ-5 จะใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้น และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสอง เป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่ บรรจุไนโตรเจนเหลว เพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาใน เซลล์ ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความ ดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความ ดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ ( $P_0$ ) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) และปริมาณ ของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีก เช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดัน ภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ( $P/P_0 \approx 1$ ) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จาก ข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์ และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้เครื่อง BET  $N_2$ -Adsorption ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและ ปริมาตรของรูพรุน

### 3. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (นงภัท, 2555)

#### 3.1 หลักการ

FTIR Spectroscopy เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษา เกี่ยวกับโมเลกุลของสาร การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การทำคุณภาพวิเคราะห์อินฟราเรด นิยมใช้เป็น เทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น การหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ การทำปริมาณ วิเคราะห์ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ในการวิเคราะห์นั้น สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในสถานะที่เป็นของเหลว และ ของแข็ง กรณีที่ตัวอย่างเป็นของเหลวสามารถ นำมาใส่เซลล์สำหรับของเหลวได้เลย กรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็งโดยไม่มีสารอื่นผสมอยู่จำเป็นจะต้อง ทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมาก ๆ เพื่อให้แสงผ่านได้

เครื่องมือ FTIR ทำการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด โดยอยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ  $12,800-10\text{ cm}^{-1}$  สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555) ในการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนในช่วงคลื่นอินฟราเรดแตกต่างกัน โดยช่วง ความยาวคลื่น  $4,000 - 1,500$  จะเป็นช่วงบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น  $-OH$ ,  $C=O$ ,  $N-H_3$ ,  $CH_3$  เป็นต้น และในช่วงความยาวคลื่น  $1,500 - 4,000$  เป็นช่วง The Fingerprint Region ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัวเนื่องจากมีพีคเกิดซ้อนข้างเยอะ ดังนั้น การ วิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ค่อนข้างยาก การทำเทคนิคนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับ ด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ จะช่วยในการจำแนกพอลิเมอร์ และ ในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพง รวมไปถึงชนิดของตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุก ชนิด ดังนั้น จึงนิยมที่จะใช้เทคนิคนี้ในการตรวจวิเคราะห์หาโครงสร้าง และ องค์ประกอบของโมเลกุล ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่ และ อีกครั้งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จากนั้นลำรังสีก็จะสะท้อนจากกระจก กลับมารวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น และ จากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่าง ในที่สุด ก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัดผลต่างระยะทาง ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทาง สัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของส่วน Interferometer ยาวเท่ากัน ลำ รังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากันมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่า มากที่สุด

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ โดยรังสีอินฟราเรดจะอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation ช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

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

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ช่วง Middle IR เนื่องจาก รังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะ ในโมเลกุลเกิดการสั่น และ การหมุนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะ ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับค่าการสั่นของโมเลกุลของสาร นั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำ เทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง และ ชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่ง เรียกว่า Infrared spectrum (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2555)

การใช้เครื่อง FTIR วิเคราะห์ตัวอย่างจะใช้เวลาน้อย และ ไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยม นำมาใช้เพื่อการตรวจสอบในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ชนิด ของสารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างสารสกัดจากพืช ตัวอย่างโพลีเมอร์ เป็นต้น

#### 4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

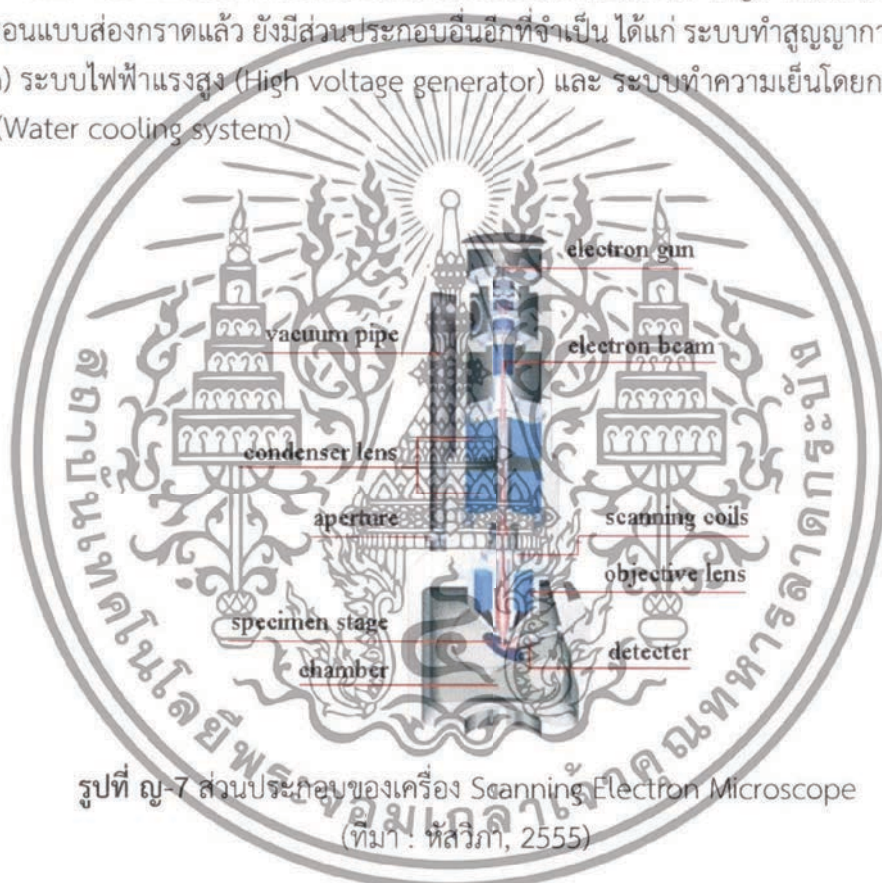
##### 4.1 หลักการ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) เป็น กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของสารตัวอย่าง ตรวจสอบให้ได้ ของลักษณะผิว ปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพที่ปรากฏ บนแผ่นฟิล์มได้ตามกำลังขยายที่ต้องการ ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ภาพ โครงสร้างที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ อีกทั้ง วิธีการใช้งานมีความรวดเร็วและใช้งานง่าย (ทิวาสวัสดิ์, 2553) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า สามารถแจกแจง รายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งาน ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน (มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM (วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)

โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่อง ภายในจะกลวง เรียกว่า คอลลิมน์ และส่วนที่เป็นตัวควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมด เรียกว่า ส่วนคอนโซลทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัด เนื่องจากอยู่ภายนอกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คอลลิมน์มีส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างหรือวัสดุที่ใช้ศึกษาจะวางอยู่ในช่องตัวอย่างบริเวณฐานคอลลิมน์ อุปกรณ์รับสัญญาณที่จะเกิดขึ้นหลังจากที่อิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างมีการจัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกัน ส่วนภายในคอนโซลจะเป็นแผงควบคุมไฟฟ้า ควบคุมระบบสัญญาณ และระบบถ่ายภาพ ได้ถูกจัดไว้อย่างเป็นระบบ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายในส่วนของคอนโซลนั่นเอง นอกเหนือจากคอลลิมน์ และส่วนคอนโซลที่เป็นส่วนสำคัญสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นอีกที่จำเป็น ได้แก่ ระบบทำสุญญากาศ (Vacuum system) ระบบไฟฟ้าแรงสูง (High voltage generator) และ ระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (Water cooling system)



รูปที่ ๗-7 ส่วนประกอบของเครื่อง Scanning Electron Microscope (ที่มา: ทัศนวิภา, 2555)

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีดังต่อไปนี้

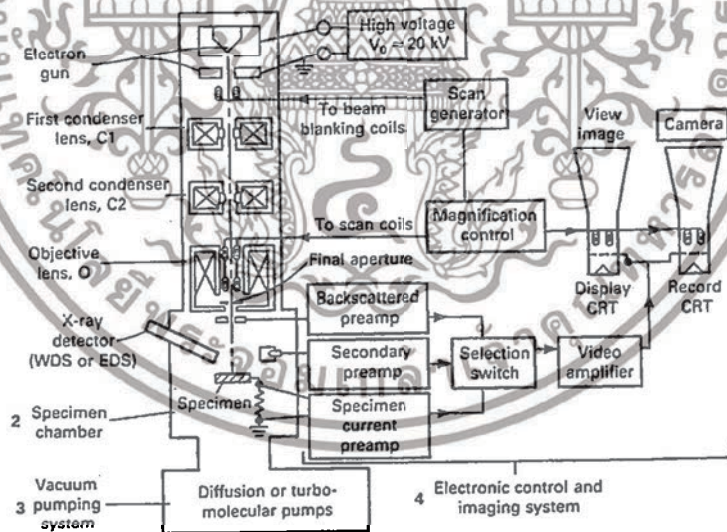
- 1) แหล่งกำเนิดแสง (Electron gun) จะอยู่ด้านปลายบนสุดของคอลลิมน์ ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูง แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วย ลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัว V เรียกว่า filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) โดยมีรูอยู่ปลายกรวย เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ filament ลวดตัว V ก็จะมีความร้อนสูง ประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศ ภายในคอลลิมน์ มีประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนด คือ ลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electron gun โดยมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอกของ electron gun เพื่อปรับ electron gun ให้อยู่ในแนวตรง

2) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (electron magnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกัน โดยจะทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุด จากนั้นลำแสงดังกล่าวจะไปตกกระทบบนผิวของตัวอย่าง และ จะใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาว ทองเหลือง มีรูปขนาดต่างกัน และสามารถเปลี่ยนขนาดได้ตามที่ต้องการ ตัว aperture จะถูกจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ ตัว aperture เหล่านี้จะทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตรที่สุด และกำหนดขนาด ปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆ บนผิวของตัวอย่าง เพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ ส่วนขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กระดไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งควบคุมด้วยระบบไฟฟ้าและควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (CRT) ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3) ช่องตัวอย่าง (Specimen chamber) เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้าย ส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่าง คือ ฐานวางตัวอย่างและปั๊มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆ เพื่อเลื่อนฐานให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้ถึง 6 ทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบ และคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า Goniometer stage



รูปที่ ๘ ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Fred, 1998)

4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector and scintillator) มีลักษณะเป็นแท่งแก้วใสตรงปลายมลทำมาจากพลาสติกที่ฉาบผิวด้วยอะลูมิเนียม และส่วนปลายของแท่งแก้วจะล้อมด้วย ระบายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ บวกที่มีขนาด 30-250 โวลต์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอน ทูติยภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging photographic devices) เป็นตัวเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับในรูปแบบภาพ และ ภาพที่ปรากฏบนจอ CRT พร้อมทั้งจะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพที่ประกอบไปด้วยท่อนำแสง และเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นแสงไฟฟ้า เริ่มจากประจุอิเล็กตรอนที่ถูกจี้และรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใส่ประเภทท่อนำแสง ในลักษณะของแสง โดยแสงที่ผ่านท่อนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) จะทำการเปลี่ยนแสงชนิด photons ไปเป็นอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน Console unit

## 5. เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

X-ray Fluorescence (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และ เชิงปริมาณ (quantitative) ตั้งแต่ธาตุเบอริเรียม (Be) จนถึงธาตุยูเรเนียม (U) ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุแบบหลายๆ ธาตุไปพร้อมๆกัน หรือแบบทีละธาตุ โดยตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์จะไม่โดนทำลาย (non-destructive analysis) สามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น

### 5.1 หลักการทั่วไปของเครื่อง XRF

การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยที่ลำรังสีเอกซ์จากเครื่องจะถูกส่งไปยังชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ในชิ้นงานทดสอบแล้วเกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์จากธาตุเหล่านั้นขึ้นมา ซึ่งจะถูกแยกตามความยาวคลื่นโดย Crystals ชนิดต่างๆ ก่อนเข้าไปตรวจวัดโดย ชุดตรวจจับรังสี (Detector) ซึ่งภายในห้องสุญญากาศสามารถเลือกใช้แบบสุญญากาศ (Vacuum) หรือ Helium โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการทำงานและประมวลผลภายในตัวเองโดยอัตโนมัติ

เครื่อง XRF มีด้วยกัน 2 แบบ คือ Wavelength Dispersive XRF (WDXRF) และ Energy Dispersive XRF (EDXRF) ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็วและไม่จำเป็นต้องใช้ Standard ในการทดสอบ ข้อเสียของ XRF แบบ EDXRF ก็คือความสามารถในการวิเคราะห์ ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จะทำได้ยาก โดยเฉพาะธาตุในกลุ่ม Light Element หากมีปริมาณน้อยๆ ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้ง หากตัวอย่างนั้นไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นของแข็ง เพื่อทดสอบในสภาพ Low pressure ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีของอากาศ ภายในห้องใส่ตัวอย่าง ซึ่งมีผลให้ Intensity ของ X-ray ที่ได้ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวอัญชลี นันต์  
 วัน เดือน ปีเกิด 14 มีนาคม พ.ศ. 2529  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 13 หมู่ที่ 1 ตำบลเสริมขวา อำเภอเสริมงาม จังหวัดลำปาง 52210  
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2551 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาการจัดการทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม คณะเทคโนโลยีการเกษตร เกรตเฉลี่ย 2.88  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 พ.ศ. 2558 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ เกรตเฉลี่ย 3.31  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ผลงานวิชาการ การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและนิกเกิล โดยใช้เปลือกส้มเขียวหวาน ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ  $\text{CaCl}_2$  การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 7” ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2558 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้