

การดูดซับสารละลายของโพลีเมอร์ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลือที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต



นาย วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

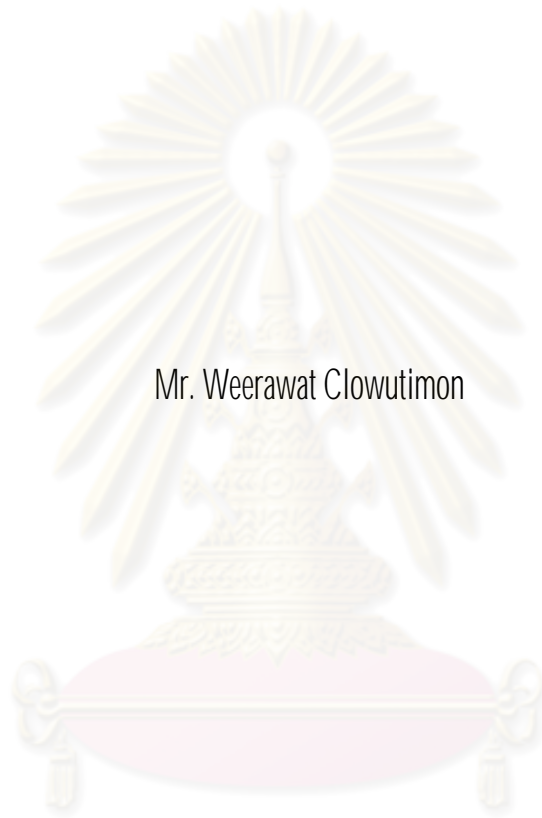
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF CONGO RED BY RICE HUSK SILICA  
MODIFIED WITH COPPER NITRATE



Mr. Weerawat Clowutimon

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับสารละลายของโกลด์ด้วยซิติลจากแผ่นเคลือบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต

โดย

นาย วีระวัฒน์ กลอวุฒิมันตร์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เฉชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยดำเนินการเป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทแบบจบ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(ดร. อภินันท์ สุทธิธารชัช)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เฉชา ฉัตรศิริเวช)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์วรรณ โชติพิฤกษ์)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาสินี เนรมิตคภพวงศ์)

วีระวัฒน์ กลอวุฒิมันตร์ : การดูดซับสารละลายของโกเรดด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรด (ADSORPTION OF CONGO RED BY RICE HUSK SILICA MODIFIED WITH COPPER NITRATE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 102 หน้า.

ตัวดูดซับซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบด้วยวิธีโซโรเจล สมบัติการดูดซับสีของโกเรดของตัวดูดซับซิลิกานี้ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ด้วยการเติมคอปเปอร์ไนเตรดร้อยละ 0.1-1.5 โดยมวลในขั้นตอนสังเคราะห์ตัวดูดซับซิลิกา สมบัติการดูดซับสีของโกเรดถูกทดสอบด้วยการเขย่าตัวดูดซับซิลิกาในสารละลายสีของโกเรดที่มีความเข้มข้น 20-500 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยตรวจวัดความเข้มข้นของสีของโกเรดในสารละลายทุก 15 นาทีใน 2 ชั่วโมงแรก และทุก 30 นาทีในส่วนที่เหลือ

การดูดซับสีของโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ถึงสมดุลดูดซับหลังจากเขย่าตัวดูดซับในสารละลายของโกเรดทุกความเข้มข้นแล้ว 90 นาที อัตราการดูดซับสีของโกเรดสอดคล้อง กับสมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง เสมือน ปริมาณสมดุลดูดซับสีของโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์เพิ่ม ขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับปริมาณคอปเปอร์ที่เติมบนตัวดูดซับซิลิกา แต่การปรับเพิ่มสมบัติการดูดซับสีของโกเรดถูกจำกัดไว้ที่การเติมคอปเปอร์ไนเตรดไม่เกินร้อยละ 0.75 ปริมาณสมดุลดูดซับสีของโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรดเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วน สามารถปรับเพิ่มขึ้นได้เกือบ 4 เท่าของปริมาณสมดุลดูดซับสีของโกเรด ด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่ไม่เติมคอปเปอร์

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิติศ.....*วิโรจน์ กลอวุฒิมันตร์*  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช*  
ปีการศึกษา.....2553...

## 5270511421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / CONGO RED / RICE HUSK SILICA

WEERAWAT CLOWUTIMON : ADSORPTION OF CONGO RED BY RICE HUSK SILICA MODIFIED WITH COPPER NITRATE. ADVISOR : ASSOC.PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 102 pp.

Rice husk silica was synthesized by xerogel method. The Congo Red adsorption property of the silica obtained was modified by adding 0.1-1.5% wt copper nitrate during the synthesis. The adsorption was carried out batchwisely with 20-500 ppm Congo Red solutions at 35oC for 4 hours shaking. The Congo Red concentration remained was measured at 15 min. period for the first 2 hours, then at 30 min. period for the other.

The adsorption of Congo Red on the Cu-modified rice husk silica reached the equilibrium after 90 min. of shaking for all Congo Red concentrations investigated. The rate of adsorption was agreed quite well with pseudo-second order kinetics. The adsorption equilibrium was agreed with Sips' model. The equilibrium amount adsorbed on the Cu-modified rice husk silica was improved quite proportional to the amount Cu added to the silica. However, the improvement was confined at the addition of 0.75% wt copper nitrate on the silica. For the 500 ppm Congo Red solution, the maximum improvement of Congo Red adsorption was almost fourfold equilibrium amount adsorbed of the original rice husk silica.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Chemical Engineering ..... Student's Signature *WEERAWAT clowutimon*  
Field of Study : Chemical Engineering ..... Advisor's Signature *Decha chat*  
Academic Year : 2010 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา นัทรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการให้คำปรึกษา ความเอาใจใส่ และคำแนะนำที่ดีตลอดมา รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้มีเนื้อหาใจความที่สมบูรณ์ถูกต้อง รวมถึง อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรวาช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธาสินี เนรมิตคกพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และความช่วยเหลือในการตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และคณาจารย์ทุกท่านประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดร. เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล และคุณ อรุณ คงแก้ว นักวิทยาศาสตร์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้คำปรึกษา รวมทั้งอำนวยความสะดวก และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย และเพื่อน ๆ พี่น้องทั้งในแลป PSE และในชั้นเรียนที่ช่วยให้คำปรึกษาที่ดีเพื่อให้งานวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายสุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดามารดา พี่น้องและเพื่อน ๆ ที่ช่วยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยพัชยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                       | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                    | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                       | ฉ    |
| สารบัญ.....                                | ช    |
| สารบัญตาราง.....                           | ฌ    |
| สารบัญภาพ.....                             | ญ    |
| บทที่                                      |      |
| 1. บทนำ.....                               | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....    | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....           | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                 | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....         | 3    |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....     | 4    |
| 2.1 แลกบ.....                              | 4    |
| 2.2 สีย้อม.....                            | 5    |
| 2.3 การดูดซับ.....                         | 7    |
| 2.3.1 การดูดซับก๊าซ.....                   | 7    |
| 2.3.2 การดูดซับของเหลว.....                | 9    |
| 2.3.3 ตัวดูดซับ.....                       | 9    |
| 2.3.4 ปัจจัยที่ผลต่อการดูดซับ.....         | 11   |
| 2.3.5 กลไกการดูดซับ.....                   | 12   |
| 2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....              | 12   |
| 2.5 สมการสมดุลการดูดซับ.....               | 13   |
| 2.5.1 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี่.....    | 13   |
| 2.5.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์..... | 14   |
| 2.5.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช.....  | 14   |
| 2.5.4 แบบจำลองสมดุลดูดซับของชิปส์.....     | 14   |
| 2.6 ซิลิกา และการสกัดซิลิกาจากแกลบ.....    | 15   |

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 17   |
| 3. วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 20   |
| 3.1 การเตรียมตัวคูดซัษชิลิกาจากถ้ำแกลบและตัวคูดซัษชิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดย<br>การเติมคอปเปอร์ในเตรต.....                                    | 20   |
| 3.1.1 การเตรียมตัวคูดซัษชิลิกาจากถ้ำแกลบ.....  | 20   |
| 3.1.2 การเตรียมตัวคูดซัษชิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต.....  | 20   |
| 3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของตัวคูดซัษชิลิกาจากถ้ำแกลบและชิลิกาที่<br>ผ่านการปรับปรุง.....  | 21   |
| 3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายคองโกเรด.....  | 21   |
| 3.4 การทดลองคูดซัษชิลิกาสารละลายคองโกเรดด้วยตัวคูดซัษชิลิกาจากถ้ำแกลบและชิลิกาที่<br>ผ่านการปรับปรุง.....                                      | 22   |
| 3.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นที่สมดุล ปริมาณสมดุลคูดซัษชิลิกาเฉพาะ และการหา<br>แบบจำลองสมดุลคูดซัษชิลิกาที่เหมาะสม.....                          | 22   |
| 4. ผลการทดลอง.....   | 23   |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของชิลิกาจากถ้ำแกลบและชิลิกาที่ผ่าน<br>การปรับปรุง.....   | 23   |
| 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวคูดซัษชิลิกาโดยวิธีการเรืองแสง<br>ของรังสีเอ็กซ์.....  | 23   |
| 4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวคูดซัษชิลิกด้วยรังสีอินฟราเรด.....   | 24   |
| 4.2 ผลการทดลองคูดซัษชิลิกาสารละลายคองโกเรดด้วยชิลิกาจากถ้ำแกลบและชิลิกาที่ผ่าน<br>การปรับปรุง.....   | 25   |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมดุลคูดซัษชิลิกาของการคูดซัษชิลิกาสารละลายคองโกเรดด้วยตัว<br>คูดซัษชิลิกาจากถ้ำแกลบและชิลิกาที่ผ่านการปรับปรุง..... | 31   |
| 4.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคอปเปอร์ในตัวคูดซัษชิลิกากับพารามิเตอร์ของ<br>แบบจำลองสมดุลคูดซัษชิลิกาของซิปส์.....                         | 38   |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....   | 42   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 42   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 43   |
| รายการอ้างอิง.....   | 44   |
| ภาคผนวก.....   | 47   |
| ภาคผนวก ก.....   | 48   |



|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ภาคผนวก ข.....                  | 69 |
| ภาคผนวก ค.....                  | 89 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 90 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |   | หน้า |
|----------|---|------|
| 2.1      | องค์ประกอบของเก้าแกลบ.....  | 4    |
| 2.2      | ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....  | 9    |
| 4.1      | ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุขององค์ประกอบของตัวดูดซับโดยการเรียงแสงของรังสีเอ็กซ์ของซิลิกาที่สกัดจากเก้าแกลบและซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน.....                            | 23   |
| 4.2      | น้ำหนักของคอปเปอร์ไอออนในซิลิกา.....  | 23   |
| 4.3      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเก้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ                         | 28   |
| 4.4      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ..... | 29   |
| 4.5      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ..... | 29   |
| 4.6      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ..... | 30   |
| 4.7      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ..... | 30   |
| 4.8      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ..... | 31   |
| 4.9      | พารามิเตอร์และ $R^2$ ของแบบจำลองสมมูลดูดซับแบบแลงเมียร์ ฟรุนดลิช และชิปส์   | 33   |
| 4.10     | ผลการดูดซับสารละลายทองโคเรดด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ .....  | 37   |
| 4.11     | พารามิเตอร์ตามแบบจำลองของชิปส์และปริมาณคอปเปอร์ในซิลิกา.....  | 39   |
| 4.10     | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุด ค่าคงที่ของแบบจำลองและเลขยกกำลังของแบบจำลองของชิปส์กับเปอร์เซ็นต์โดยมวลของคอปเปอร์ในซิลิกา.....                          | 39   |

## สารบัญญภาพ

| ภาพที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1    | การดูดซับในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงทางกายภาพ.....  | 8    |
| 2.2    | กลไกการดูดซับ.....   | 12   |
| 4.1    | ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ.....  | 24   |
| 4.2    | ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการดัดแปลงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรตในอัตราส่วน 0.318 % โดยน้ำหนัก..... | 24   |
| 4.3    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ .....                       | 25   |
| 4.4    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ.....     | 26   |
| 4.5    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ.....     | 26   |
| 4.6    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ.....     | 27   |
| 4.7    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ.....     | 27   |
| 4.8    | ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่าง ๆ.....     | 28   |
| 4.9    | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่สมดุลของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....                | 32   |
| 4.10   | พันธะการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต.....                             | 32   |
| 4.11   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ.....                          | 34   |
| 4.12   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % โดยมวล.....        | 34   |
| 4.13   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยมวล.....        | 35   |

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.14   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมมูลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยมวล..... | 35   |
| 4.15   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมมูลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยมวล..... | 36   |
| 4.16   | การเปรียบเทียบข้อมูลสมมูลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยมวล..... | 36   |
| 4.17   | การเปรียบเทียบสมมูลดูดซับของ โกรดด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ในช่วงความเข้มข้น 0 - 500 ppm.....                           | 38   |
| 4.18   | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุดและปริมาณคอปเปอร์ที่เจือปนในตัวดูดซับซิลิกา.....                      | 40   |
| 4.19   | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของแบบจำลองและปริมาณคอปเปอร์ที่เจือปนในตัวดูดซับซิลิกา.....                                | 40   |
| 4.20   | ความสัมพันธ์ระหว่างเลขยกกำลังของแบบจำลองและปริมาณคอปเปอร์ที่เจือปนอยู่ในตัวดูดซับซิลิกา.....                          | 41   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศ แต่การขยายตัวอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมลพิษจากน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม เนื่องจากมีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในปริมาณมากเมื่อเทียบกับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ปัญหาที่เกิดจากการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัด ส่งผลทำให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติขาดความสวยงาม ยังลดปริมาณของออกซิเจนที่จะเข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และยังคงปริมาณแอสมาติคัลที่ลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้พีชีน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ เมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตายได้

การบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีอยู่ 5 วิธีที่นิยมใช้กัน คือ [1]

1. การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) เป็นวิธีการกำจัดน้ำเสียจากโรงงาน โดยให้พันธะที่มีสีแตกออกกลายเป็นสารไม่มี แต่ข้อเสีย คือ สารใหม่ที่ได้จากการสลายพันธะอาจจะเป็นพิษได้ เนื่องจากในสีย้อมส่วนใหญ่ประกอบด้วย โนโตรเจน คลอรีน หรือ ซัลเฟอร์
2. การบำบัดด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology) โดยกระบวนการ Ultrafiltration Nanofiltration หรือ Reverse Osmosis เป็นกระบวนการที่ประสิทธิภาพสูง สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง แต่มีต้นทุนและอุปกรณ์ที่สูง
3. การตกตะกอน (Coagulation หรือ Flocculation) เป็นการทำให้เกิดตะกอนขุ่นของน้ำที่ทำให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้ง สามารถกำจัดความสกปรกและสีได้อย่างมีประสิทธิภาพและอยู่ในมาตรฐานได้ โดยใช้สารเคมีที่ถูกต้องและในปริมาณที่เหมาะสม
4. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำทิ้ง โดยใช้จุลินทรีย์ คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) น้ำทิ้งที่ผ่านการขบวนการกำจัดนี้จะไม่มีการก่อกำเนิดและผลปฏิกิริยาสุดท้ายจะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ
5. การบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) เป็นเทคนิคการดูดซับ นิยมใช้กันในโรงงานขนาดเล็กและช่วงเวลาสั้น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ โดยสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ทำให้หลุดออกได้ง่าย ทำให้สามารถนำถ่านกัมมันต์เหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การทำให้โมเลกุลของสีที่มีโมเลกุลใหญ่หลุดออกนั้นทำได้ยากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับโรงงานขนาดใหญ่

เมื่อพิจารณาหาเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งขนาดเล็กแล้วจะพบว่า การบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์หรือเทคนิคการดูดซับแล้ว เป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมมากกว่าการบำบัดรูปแบบอื่น และตัวดูดซับที่นำมาใช้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของเสียที่ใช้งานได้

จากอดีตจนถึงปัจจุบันอาชีพเกษตรกรและกสิกรรมเป็นอาชีพที่อยู่คู่กับสังคมไทยมานาน โดยเฉพาะกสิกรรม ที่เป็นอาชีพหลักของคนไทยมาช้านาน ผลผลิตหลักที่ได้จากการกสิกรรมคือ ข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญทั้งการบริโภคภายในประเทศและส่งออกในตลาดโลก จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปี พ.ศ. 2550 ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้ปีละประมาณ 32 ล้านตัน [2] และเมื่อข้าวเปลือกผ่านการสีแล้ว จะได้ผลผลิตเป็นสองส่วนคือข้าวสารและแกลบ ซึ่งปริมาณแกลบนั้นคิดเป็น 15-20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณข้าวเปลือก [3] นั่นคือในแต่ละปีประเทศไทยจะมีปริมาณแกลบที่เหลือจากการสีข้าวเปลือกประมาณ 6.4 ล้านตัน

จากการศึกษาและวิจัยของนักวิจัยหลายท่านพบว่า แกลบนั้นสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตซิลิกาได้คุณภาพดี เนื่องจากเถ้าที่เหลือจากเผาของแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่มากกว่าครึ่งหนึ่ง [4-5] และสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของการดูดซับได้โดยการเติมโลหะบางชนิด เช่น คอปเปอร์ [6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบ และนำมาใช้ในการดูดซับสารละลายสีข้อมองโกเรดสังเคราะห์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของคอปเปอร์ไอออนบนตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบในการดูดซับสารละลายคองโกเรด ( $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6$ )

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

### 1.3.1 การดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ

เติมตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากแกลบ 0.2 กรัม ต่อสารละลายคองโกเรดเข้มข้น 20 - 500 ppm ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างทุก 15 นาทีใน 2 ชั่วโมงแรก และทุก 30 นาทีในช่วงที่ 3 - 4 วัดเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

1.3.2 การดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการตัดแปลงโดยการเติมคอปเปอร์ไอออน

เติมตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต ร้อยละ 0.159 - 1.270 โดยมวล ปริมาณ 0.2 กรัม ต่อสารละลายคองโกเรดเข้มข้น 20 - 500 ppm ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า

ความเร็ว 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างทุก 15 นาทีใน 2 ชั่วโมงแรก และทุก 30 นาทีในชั่วโมงที่ 3 - 4 วัดเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่เหลืองด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบลักษณะการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิติกาและตัวดูดซับซิติกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน

1.4.1 ได้กระบวนการทางเลือกใหม่สำหรับการบำบัดน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรมที่มีค่าใช้จ่ายด้านวัสดุอุปกรณ์และพลังงานต่ำลง

1.4.2 เพิ่มมูลค่าวัตถุดิบและพัฒนาทางเลือกการใช้ประโยชน์วัตถุดิบภายในประเทศเพื่อความยั่งยืนต่อการพัฒนาประเทศ



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แกลบ

แกลบข้าว (Rice Husk) คือ เป็นเปลือกของข้าวที่ได้จากการสีข้าว ปัจจุบันประเทศไทยส่งออกแกลบรายใหญ่ของโลก นอกจากการนำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่าง ๆ แล้ว ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่น ๆ ทำเป็นวัสดุก่อสร้างแล้ว แกลบยังถูกนำไปผลิตเป็นเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำเถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของเถ้าแกลบ คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูงซิลิกาในเถ้าแกลบมีทั้งที่เป็นซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica) [7]

การนำแกลบมาเผานั้นจะได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 16.4 – 18.3 โดยมวล [4] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในเถ้าแกลบนั้นมีปริมาณซิลิกาสูงถึงร้อยละ 86.9 – 97.3 โดยมวล คุณสมบัติของเถ้าแกลบนี้จะแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของเถ้าแกลบ [8]

| องค์ประกอบทางเคมี       | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |
|-------------------------|-----------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 86.9 - 97.3           |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0.58 - 2.50           |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0.00 - 1.75           |
| $\text{MgO}$            | 0.12 - 0.96           |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0.00 - 0.54           |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.20 - 0.85           |
| $\text{SO}_3$           | 0.10 - 1.13           |
| $\text{Cl}_2\text{O}$   | 0.00 - 0.42           |

โดยทั่วไปเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

— เถ้าแกลบดำ เกิดจากการเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $600\text{ }^\circ\text{C}$  ทำให้สารประกอบคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก คือ ประมาณร้อยละ 5 – 30 โดยมวล



— ถ้าแกลบลขาว เกิดจากการเผาแกลบลในช่วงอุณหภูมิ 600 - 800 °C ในที่ที่มีอากาศเพียงพอ แกลบลชนิดนี้จะมีปริมาณซัลฟิวเรียมสูงมาก

การที่จะได้ซัลฟิวเรียมจากแกลบลขาวที่อยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จำเป็นต้องสังเคราะห์ในอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากหากเผาเป็นเวลานานเกินไปจะส่งผลให้ซัลฟิวเรียมอยู่ในรูปของผลึก ซึ่งยากในการบดละเอียดและเนื่องในการทำปฏิกิริยา

## 2.2 สีย้อม

สีย้อม คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีสี นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมเส้นใย [9]

### การแบ่งประเภทของสีย้อม

สีย้อมอาจจะแบ่งประเภทได้ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีหรือตามกระบวนการที่นำไปใช้ แต่สำหรับกระบวนการผลิตสีย้อมจะแบ่งประเภทสีย้อมตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี แต่สำหรับผู้ที่น่าสีย้อมไปใช้นิยามแบ่งประเภทของสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

การแบ่งประเภทของสีย้อมตามการใช้งานยึดหลักพื้นฐานของดัชนีสี (Color index, CI) และนิยามของสีแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับโครงสร้างและกลไกการยึดติดของสีย้อมกับอนุภาคอื่น ๆ ตามการใช้งาน ซึ่งสามารถจำแนกสีย้อมเป็นประเภทที่สำคัญได้ดังนี้

1) สีเอซิด (Acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2) สีไดเรกต์ (Direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกสีง่าย ทนแสง

3) สีเบสิก (Basic or Cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและโยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

4) สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier)

เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

5) สีรีแอทีฟ (Reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง  $70-75^\circ\text{C}$  และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

6) สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีแว็ต (Vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ การย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็น สีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (Anthraquinoid)

8) สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

9) สีอินเกรน (Ingrain dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation dye) เป็นสีที่มีละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

## 2.3 การดูดซับ [10]

การดูดซับ คือ กระบวนการจับโมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซด้วยของแข็ง โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะอยู่บนผิวของตัวถูกดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้สารประกอบที่มีรูพรุนเป็นตัวดูดซับ เพราะว่ามีพื้นที่ผิวภายในการดูดซับมาก เมื่อโมเลกุลของของไหลผ่านเข้าไปในตัวดูดซับจะถูกกักไว้ในรูพรุน ซึ่งกระบวนการดูดซับจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวดูดซับ คุณสมบัติของทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เช่น ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับและขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เป็นต้น การดูดซับของโมเลกุลของสารบนผิวตัวดูดซับอาจจะเกิดจากแรงทางกายภาพหรือแรงจากทางเคมีหรือจากทั้งสองอย่างรวมกัน

### 2.3.1 การดูดซับก๊าซ

การดูดซับก๊าซแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

#### การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีการเกิดพันธะเคมีเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างอะตอมของผิวหน้าตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้เอง โดยการดูดซับอาจจะเกิดซ้อนกันแบบหลายชั้น (Multilayer) องค์ประกอบหลักของการดูดซับทางกายภาพ คือ ธรรมชาติของสาร แรงระหว่างผิวสัมผัส และความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ [10]

การดูดซับทางกายภาพเป็นปรากฏการณ์ชนิดผันกลับได้ และเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ของมวลตัวถูกดูดซับมายังผิวหน้าของตัวดูดซับ

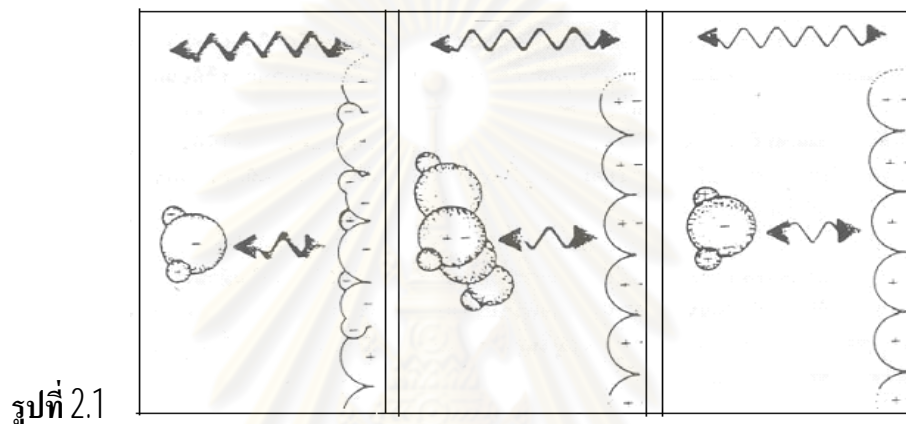
ลักษณะการจับตัวด้วยแรงทางกายภาพแบ่งออกเป็น 3 อย่าง [11] ดังรูปที่ 2.1

- 1) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างเป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
- 2) เกิดจากหลักการที่ว่าโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอน

เคลื่อนที่มาอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกัน เข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อนๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่

3) เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้ามแล้วเกิดแรงดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลมีขั้ว, โมเลกุลไม่มีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว, โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.1

การดูดซับในลักษณะต่างๆ ด้วยแรงทางกายภาพ

#### การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับผิวของตัวถูกดูดซับ มีพันธะเคมีเป็นแรงในการดูดซับ โดยมีค่ามากกว่าแรงในการดูดซับทางกายภาพ ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมาโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างการดูดซับและมีพันธะระหว่างอะตอมที่แข็งแรง โดยมักเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) [12]

การดูดซับทางเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

- 1) การดูดซับทางเคมีที่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activated chemisorptions) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราการดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส ( $k = k_0 e^{-E/RT}$ ) ในลักษณะเดียวกับปฏิกิริยาเคมี
- 2) การดูดซับทางเคมีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Nonactivated chemisorptions) การดูดซับลักษณะนี้อัตราการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ [13]

โดยทั่วไปแล้วการเกิดการดูดซับทางเคมีในช่วงแรกต้น มักจะเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นกับอัตราที่ช้าลงและมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสามารถได้ด้วยตารางที่

## 2.2

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [13-14]

| ลักษณะ                 | การดูดซับทางกายภาพ   | การดูดซับทางเคมี   |
|------------------------|--|--|
| 1. แรงที่กระทำ         | แรงแวนเดอร์วาลส์   | พันธะเคมี เรียกว่า แรงกระตุ้นในการดูดซับ (Activated adsorption)      |
| 2. การดูดซับแบบอิมิตัว | แบบหลายชั้น  | แบบชั้นเดียว   |
| 3. พลังงานกระตุ้น      | ไม่มีพลังงานกระตุ้น  | อาจจะมีหรือไม่มีพลังงานกระตุ้น                                       |
| 4. ช่วงของอุณหภูมิ     | การดูดซับโดยมากจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ | การดูดซับสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับได้ |
| 5. ความร้อนในการดูดซับ | 1 กิโลแคลอรีต่อโมล   | 50-100 กิโลแคลอรีต่อโมล  |

### 2.3.2 การดูดซับของเหลว

ลักษณะโมเลกุลของของเหลวจะอยู่ติดกันอย่างตอด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การดูดซับในของเหลวจึงอาศัยการไหลอย่างต่อเนื่องของโมเลกุลของเหลวเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงดึงดูดของของเหลวในการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนหรือโพรงของตัวดูดซับ ของเหลวแต่ละชนิดนั้นจะมีแรงดึงดูดที่ไม่เท่ากัน การดูดซับในของเหลวเริ่มจากการไหลของเหลวผ่านปากของรูพรุนของตัวดูดซับ และไหลไปสัมผัสกับพื้นผิวด้านในของตัวดูดซับ การดูดซับของเหลวนั้นจะเกิดเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างของเหลวกับตัวดูดซับเท่านั้น พื้นที่ในการสัมผัสจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดที่ทำให้ของเหลวสามารถไหลเข้าสู่รูพรุนได้มากน้อยเพียงใด ดังนั้น ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะและพื้นที่ผิวสัมผัสของการดูดซับของเหลว จึงมักน้อยกว่าการดูดซับก๊าซซึ่งโมเลกุลของก๊าซสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้ทั้งหมด

### 2.3.3 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้ [15]

1) ตัวดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non – polar adsorbent) จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพ ตัวดูดซับที่สำคัญของกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์

2) ตัวดูดซับแบบมีขั้ว (Polar adsorbent) การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลก๊าซและผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พวกออกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth)

3) ตัวดูดซับประเภทที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ตัวดูดซับนี้จะมีผิวหน้าที่สามารถดูดซับทางเคมีได้ โดยทั่วไปตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โคลโลไมต์ ตัวดูดซับ อัลคาไลน์อะลูมินา ซิลิกาเจลกัมมันต์ และแมงกานีสออกไซด์กัมมันต์

ตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ คาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือเรซิน

1. คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon) คือวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (Activation) คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นที่รู้จักกันมานานในแง่ของการใช้เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนเหล่านี้ยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี [16]

คาร์บอนกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือ มีรูปร่างไม่แน่นอน ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด พื้นที่ผิวจะอยู่ระหว่าง 500 - 2000 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนตั้งแต่ 20 - 2000 อังสตรอม ใช้สำหรับดูดสี กลิ่น หรือสารปนเปื้อนอื่นๆ ความพรุนของคาร์บอนกัมมันต์เป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นทางกายภาพหรือเคมี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (Element crystallinities) เพิ่มขึ้น มีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น สามารถดูดสีและกลิ่นได้มากกว่าถ่านธรรมดา [17]

2. ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นตัวดูดซับที่ได้จากการผสมกรดลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) แล้วนำไปอบแห้ง โดยพื้นที่ผิวเฉลี่ยอยู่ 600-800 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 20-50 อังสตรอม ซึ่งซิลิกาเจลส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อลดความชื้นในแก๊สหรือของเหลว [18]

3. อลูมินาออกไซด์ (Alumina Oxide) หรือ แอกทิเวตอลูมินา (Activated Alumina) เตรียมขึ้นจากอลูมินาหรืออลูมินัมออกไซด์ที่ได้รับการกระตุ้น โดยการเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เพื่อให้เกิดเป็นเม็ดอลูมินัมออกไซด์พรุน โดยปกติแล้วจะไม่ใช้อลูมินัมออกไซด์ในงานด้านการควบคุมมลพิษทางอากาศ แต่จะใช้เพื่อทำให้ก๊าซแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความดันสูง และจะใช้เป็นสารรองรับในปฏิกิริยาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [19]

4. พอลิเมอร์สังเคราะห์หรือเรซิน (Synthetic polymers or resins) ผลิตจากการรวมมอนอเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน แล้วผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยถ้าใช้พอลิเมอร์จำนวน

พวกสารอะโรมาติก คือ สไตรีน (styrene) และไดไวนิลเบนซีน (divinylbenzene) ส่วนใหญ่ใช้จะดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่ขั้วออกจากสารละลาย ส่วนถ้าใช้อะคริลิกเอสเทอร์จะสามารถใช้ดูดซับสารที่มีขั้วออกจากสารละลายได้ [18]

5. ผลึกคัตโมเลกุล (Molecular sieve หรือ zeolite) เป็นผลึกโมเลกุลของอูมิโนซิลิเกตที่มีรูพรุน โดยรูพรุนที่เตรียมได้มีโครงสร้างและลักษณะที่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากตัวดูดซับชนิดอื่น ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์อยู่ในช่วง 3 - 10 อังสตรอม ซีโอไลต์นิยมใช้ดูดซับความชื้นและแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [18]

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1. ลักษณะของตัวดูดซับ

คุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ ประกอบด้วย พื้นที่ผิวสัมผัสและโครงสร้างของรูพรุน โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับก็มีส่วนช่วยในการดูดซับ เพราะถ้าหากขนาดของโมเลกุลไม่สามารถถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้ ประสิทธิภาพของการดูดซับก็จะต่ำลง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และสำหรับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นถ้ามีขนาดเล็กลง อัตราการดูดซับจึงเป็นแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ แต่สำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากๆ การดูดซับจะขึ้นกับขนาดของรูพรุนมากกว่าขนาดของตัวดูดซับ [20]

#### 2. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความสามารถในการละลาย ความมีขั้วของโมเลกุล น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล [20]

2.1 ความสามารถในการละลาย เมื่อความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับจำเป็นต้องให้ตัวถูกละลายแยกตัวออกจากตัวทำละลายแล้วไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น หากใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารที่ละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นการยากต่อการดูดซับ แต่หากเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย สารที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายจะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดี นอกจากนี้การแยกสารที่ละลายน้ำได้ยากอาจจะทำโดยการตกตะกอน ซึ่งไม่เกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ

2.2 ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพขั้วเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายสำหรับกรณีที่มีโมเลกุลของสารตัวทำละลายมีความเป็นขั้วสูงกว่าความเป็นขั้วที่ผิวของตัวดูดซับ

2.3 มวลและขนาดของโมเลกุล เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย เพราะเมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายมักจะลดลง

### 3. อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการลดปริมาณสมดุลดูดซับ [20]

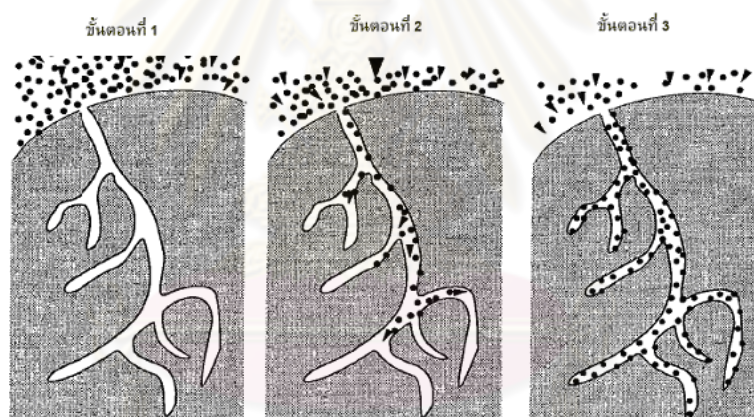
### 4. เวลา

เวลาเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะต้องนานเพียงพอที่จะทำให้ตัวดูดซับทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องมีการทำการศึกษา ก่อนในระดับปฏิบัติการจริง [21]

#### 2.3.5 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.2 [22]

- 1) โมเลกุลของตัวดูดซับจะไปบริเวณผิวรอบนอก
- 2) โมเลกุลของตัวดูดซับแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ
- 3) เกิดการดูดซับบนผิวรูพรุน ด้วยแรงทางกายภาพหรือแรงทางเคมี



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ

#### 2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการดูดซับกับเวลา โดยปกติแล้ว อัตราเร็วของการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเริ่มต้นของการดูดซับ และอัตราเร็วจะลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งสมการที่นิยามใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ได้แก่ จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 (First order kinetic) จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน (Pseudo second order kinetic) [23]

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.1 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $1/q_t$  และ  $1/t$  ได้ตามสมการที่ 2.2



$$q_t = \frac{q_e k_1 t}{1 + k_1 t} \quad 2.1$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e} \frac{1}{t} + \frac{1}{q_e} \quad 2.2$$

เมื่อ  $q_t$  และ  $q_e$  คือ ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ และปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลตามลำดับ  $k_1$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ และ  $t$  คือระยะเวลาของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 เสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.3 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $\ln(q_e)$  ได้ตามสมการที่ 2.4

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad 2.3$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad 2.4$$

จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.5 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  ได้ตามสมการที่ 2.6

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad 2.5$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad 2.6$$

เมื่อ  $k_2$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

## 2.5 แบบจำลองสมดุลดูดซับ (Adsorption isotherm models)

สมดุลดูดซับเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความดันของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (Equilibrium concentration) กับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ (Specific equilibrium amount adsorbed) สำหรับที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งแบบจำลองสมดุลดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบาย ได้แก่ แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แลงเมียร์ ฟรอนคลิช ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองแต่ละชนิดเป็นดังนี้ [24]

### 2.5.1 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี

แบบจำลองนี้ ค่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะจะแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โดยมีสมการเป็น

$$q = K_H C \quad 2.7$$

โดยที่  $K_H$  คือ ค่าคงที่ของสมดุลดูดซับของเฮนรี แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรีนี้เหมาะสมใช้อธิบายกับระบบที่มีความเข้มข้นเจือจางเท่านั้น

### 2.5.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์

แบบจำลองสมมูลดูดซับแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานของการดูดซับ คือ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) สมการแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์ มีสมการเป็น

$$q = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C} \quad 2.8$$

โดยที่  $K_L$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์ และ  $q_{\max}$  คือ ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุดซึ่งอาจใช้กำหนดขีดจำกัดของการดูดซับแบบชั้นเดียว สมการแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์สามารถแปลงให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $1/q$  และ  $1/C$  ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{1}{q} = \left( \frac{1}{q_{\max} K_L} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad 2.9$$

### 2.5.3 แบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนคลิช

แบบจำลองนี้ ค่าปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ ( $q$ ) แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับที่สมดุลยกกำลังค่าคงที่ ( $C^n$ ) จึงเขียนสมการได้เป็น

$$q = K_F C^n \quad 2.10$$

โดยที่  $K_F$  และ  $n$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนคลิช สมการแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนคลิชสามารถแปลงเป็นสมการเชิงเส้นระหว่าง  $\ln q$  กับ  $\ln C$  ดังสมการที่ 2.11

$$\ln q = \ln K_H + n \ln C \quad 2.11$$

นอกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบข้างต้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีค่าคงที่ไม่เกิน 2 ตัว แล้วยังมีแบบจำลองลักษณะอื่น ๆ ที่มีค่าคงที่ของแบบจำลองมากกว่า 2 ตัว เช่น แบบจำลองชิปส์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีค่าคงที่ของแบบจำลอง 3 ตัว เป็นต้น

### 2.5.4 แบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์

แบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์ เป็นแบบจำลองที่นำลักษณะของแบบจำลองของแลงเมียร์และ ฟรุนคลิชมาผสมกัน โดยสมการแบบจำลองสมมูลดูดซับเป็นดังสมการที่ 2.12

$$q = q_{\max} \left( \frac{K_S C}{1 + K_S C} \right)^n \quad 2.12$$

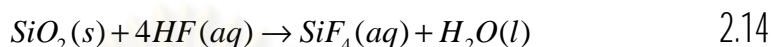
โดยที่  $q_{\max}$  คือ ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุด  $K_S$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับ และ  $n$  คือ เลขยกกำลังของแบบจำลองสมมูลดูดซับ แบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์สามารถแปลงให้อยู่สมการเชิงเส้นระหว่าง  $\frac{1}{q^{1/n}}$  และ  $\frac{1}{C}$  ตามสมการที่ 2.13 เมื่อเลขยกกำลังนั้นทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะจากการทดลองและปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะจากแบบจำลองมีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{1}{q^n} = \left( \frac{1}{q_{\max}^n K_s} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}^n} \quad 2.13$$

เมื่อ  $\min_n \sum (q_{cal} - q_{exp})^2$

## 2.6 ซิลิกา และการสกัดซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) เป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นของแข็งสีขาวมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.0 - 2.6 จุดหลอมเหลวประมาณ 1710 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก ไม่ละลายในกรด ยกเว้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ดังสมการ [25]



และละลายในสารละลายด่างได้เป็นสารละลายซิลิเกต (Silicate) ดังสมการ

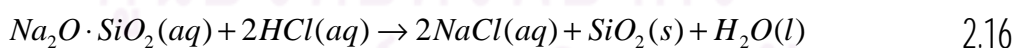


ซิลิกาที่พบในแกลบมี 2 รูปแบบ คือ

1. ซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous) ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากมีพื้นที่ผิวของกลุ่มไฮดรอกซิลซิลินอล (Hydroxyl silanol group,  $SiH_3OH$ ) คงอยู่เมื่อให้ความร้อนถึง 400 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ
2. ซิลิกาแบบผลึก (Crystalline) ก่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิในการเผา แต่ที่อุณหภูมิสูงซิลิกาจะเปลี่ยนรูปจากแบบอสัณฐานเป็นผลึกของควอตซ์ (Quartz) คริสโตบาไลต์ (Christobalite) และทรินิไมท์ (Tridymite) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งโดยทั่วไปไม่ทำปฏิกิริยากับกรด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งสามารถทำให้ซิลิกาแตกตัวเป็นฟลูออโรซิลิเกต (Fluorosilicate,  $SiF_4$ )

### การสกัดซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาสามารถผลิตได้จากการต้มสกัดแกลบ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $Na_2O \cdot SiO_2$  หรือ  $Na_2SiO_3$ ) และการตกตะกอนให้เป็นซิลิกา โดยการปรับ pH ของสารละลายให้ได้น้อยกว่า 10 ซึ่งสามารถใช้กรดไฮโดรคลอริกเกิดปฏิกิริยา ตามสมการ



หรืออาจจะใช้กรดชนิดอื่น ๆ ในการตกตะกอน เช่น กรดซัลฟูริก ตามสมการ



ซิลิกาหรือซิลิกาเจลที่สกัดได้จากแกลบสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต [26] คือ

1. อะควาเจล (Aquagel) โดยรูพรุนของซิลิกาจะเต็มไปด้วยน้ำ
2. เซโรเจล (Xerogel) น้ำที่อยู่ในรูพรุนจะถูกกำจัดโดยการระเหย

### 3. แอโรเจล (Aerogel) ตัวทำละลายที่อยู่ในรูปของซิลิกาจะถูกกำจัดออกโดยวิธีการสกัดแบบซูเปอร์คริติคอล (Supercritical extraction)

เนื่องจากคุณสมบัติของปริมาณรูพรุนที่มากของซิลิกา จึงทำให้ซิลิกาเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการเป็นตัวรองรับสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซับ หรือวัสดุสำหรับบรรจุในคอลัมน์โครมาโตกราฟี แต่อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนที่พบในซิลิกาเจลจากเถ้าแกลบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการนำซิลิกาชนิดไปใช้งาน เนื่องจากสิ่งเจือปนดังกล่าวมีผลต่อปฏิกิริยา และมีผลต่อการดูดซับของซิลิกา

#### ขั้นตอนการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ในการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบสามารถสรุปขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพเถ้าแกลบ การต้มสกัดซิลิกา และการตกตะกอนซิลิกา โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

##### 1. การปรับสภาพของเถ้าแกลบ

การปรับสภาพของเถ้าแกลบโดยการล้างด้วยสารละลายกรดมีความจำเป็นต่อคุณภาพของซิลิกาที่ได้ โดยกรดจะทำหน้าที่ในการกำจัดแร่ธาตุและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากเถ้าแกลบ โดยทั่วไปจะแช่เถ้าแกลบในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นสูง เช่น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นต้น สภาพเหล่านี้สามารถละลายสิ่งเจือปนในเถ้าออกมาได้ดี

##### 2. การต้มสกัดซิลิกา

หลังจากการปรับสภาพเถ้าแกลบแล้ว ต้องทำการล้างเถ้าแกลบด้วยน้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีสภาพเป็นกลางแล้วจึงนำมาต้มกับสารละลายต่าง สารละลายต่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ [26] การต้มสกัด จะสามารถผลิตซิลิกาได้ประมาณร้อยละ 91 การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถเพิ่มสัดส่วนการผลิตได้มากนัก ถ้าใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1 โมลาร์ จะไม่สามารถสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบได้ อุณหภูมิสำหรับการต้มสกัดอยู่ที่ประมาณ 80 - 95 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองเถ้าออกด้วยกระดาษกรองและล้างเถ้าที่เหลือด้วยน้ำร้อน และปล่อยสารละลายให้เย็น การเพิ่มระยะเวลาของการต้มสกัดให้ยาวนานขึ้นไม่ช่วยเพิ่มปริมาณของซิลิกาได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

##### 3. การตกตะกอนซิลิกา

การตกตะกอนของซิลิกานั้น ขึ้นกับ การปรับสภาพ pH ของสารละลายที่สกัดได้ หรือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต การเติมกรดหรือสารละลายอื่น ๆ ลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจนมี pH ต่ำกว่า 10 ซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะก่อตัวเป็นคอลลอยด์และตกตะกอนออกมาในที่สุด โดยสามารถแบ่งวิธีการตกตะกอนได้ 2 วิธี ดังนี้

##### 3.1 การตกตะกอนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการนี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้เป็นซิลิกาออกมา โดยการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันน้อยกว่า 1.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปัจจัยที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีคุณภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งนิยมควบคุมให้อยู่ในช่วง 4.5 - 6.5 เปอร์เซ็นต์ หากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าสูงเกินไปจะทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยาก [25]

### 3.2 การตกตะกอนด้วยกรด

การตกตะกอนด้วยกรดเป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไป กรดที่นิยมใช้ คือ กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 M โดยไทเทรตกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่สกัดได้ และเมื่อ pH ของสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าต่ำกว่า 10 แล้วซิลิกาจะเริ่มมีการตกตะกอนออกมาเป็นชั้นเจล และเมื่อตกตะกอนซิลิกาตาม pH ที่ต้องการแล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 18 ชั่วโมงเพื่อให้ชั้นเจลเกิดการตะกอนอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงล้างเจลด้วยน้ำกลั่นและแยกเจลออกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อกำจัดไอออนที่ตกค้าง และนำเจลไปอบให้แห้งจะเป็นซิลิกาแบบซีโรเจล (Xerogel) และหากนำซิลิกานี้มาล้างน้ำแล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง จะได้เป็นซิลิกาบริสุทธิ์แบบอสัณฐาน (Amorphous) [26]

### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Jame และ R.S. Rao [4] ได้ศึกษาองค์ประกอบของแกลบ พบว่าแกลบประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน คือ เถ้าแกลบ 20 % เซลลูโลส (Cellulose) 38 % ลิกนิน (Lignin) 22 % เพนโทส (Pentose) 18% และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ 2 %

F. Adam [5] ได้ศึกษาองค์ประกอบของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบ พบว่าเถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide,  $\text{SiO}_2$ ) มากกว่า 94 %

Proctor และ Shultz [26-27] ได้ศึกษากระบวนการสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าแกลบ สามารถสกัดซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ถึง 93 % และความชื้น 2.6 % ปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่สกัดได้คือ pH ของสารละลายเริ่มต้น โดยที่ pH 7 ได้ความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูงกว่าที่ pH 4 และชนิดของสารละลายกรดที่ใช้ในกระบวนการ กระบวนการสกัดซิลิกาด้วยกรดซิตริก (Citric acid) และกรดออกซาลิก (Oxalic acid) จะมีปริมาณโซเดียมในซิลิกาน้อยกว่ากระบวนการสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก

สันติ รัตนวิรัตน์ [28] ได้ทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับการผลิตซิลิกาจากเถ้าแกลบ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเถ้าแกลบ คือ การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และยังพบอีกว่าการแช่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 นอโมล เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตซิลิกาบริสุทธิ์ เนื่องจากสามารถทำให้สารไฮโดรคาร์บอนสลายตัวได้หมดเมื่อนำไปเผา

Adam และ Chua [29] ได้ศึกษาการดูดซับกรดปาล์มเมติกด้วยซอร์บ์เจลที่สกัดจากถั่วเขียว และมีการตัดแปลงด้วยอะลูมิเนียม พบว่า ซิลิกาที่ตรึงโลหะอะลูมิเนียมแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงสามารถดูดซับกรดปาล์มเมติกได้ดีกว่าซิลิกาที่ตรึงโลหะอะลูมิเนียมโดยไม่เผา เนื่องจากการเผาดังกล่าวเป็นการเผาไล่หมูในเตาซึ่งเป็นหมูฟังก์ชันแสดงความเป็นขั้วลบ จึงทำให้สามารถดึงดูดซับได้มากขึ้น และการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองสมมูลแบบแลงเมียร์

พรสวรรค์ และคณะ [6] ได้ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สังเคราะห์จากถั่วเขียว พบว่า ซิลิกาที่มีส่วนผสมของโลหะสามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้เพิ่มขึ้น โดยตัวดูดซับซิลิกาที่มีส่วนผสมของโลหะคอปเปอร์สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียม เหล็ก และนิกเกิล

Namasivayam และ Kavitha [30] ได้ศึกษาการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากถั่วเขียว โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ระยะเวลาในการกวนผสม โดยระยะเวลาที่เข้าสู่สมมูลดูดซับ คือ 10 นาที จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามรูปแบบของจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน สมดุลดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมมูลแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่าสมมูลดูดซับแบบฟรุนดลิช การดูดซับเกิดในสารละลายที่เป็นกรดได้ดีกว่าในสารละลายที่เป็นด่าง การเพิ่มอุณหภูมิสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการกระตุ้นหมูฟังก์ชันบางหมูบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ เป็นการเพิ่มแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสีเชื่อมกับผิวตัวดูดซับ

Gao และคณะ [31] ได้ศึกษาการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยเคลเซียมเบนโตไนต์ โดยปัจจัยทำการศึกษาคือ ระยะเวลาในการกวนผสม พบว่าเข้าสู่สมมูลดูดซับภายในเวลา 180 นาที pH ที่เหมาะสมกับการดูดซับ คือ pH 5 และเมื่อเพิ่ม pH ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายคองโกเรด เพิ่มความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน สมดุลดูดซับสามารถอธิบายด้วยสมมูลดูดซับแบบฟรุนดลิชได้ดีกว่าแบบแลงเมียร์

Woo และคณะ [32] ได้ศึกษาการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยไคโตซานไฮโดรเจลที่ผ่านการเติมสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ คือ ไตรตอน X-100 (Triton X-100) และสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ คือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับของไคโตซานไฮโดรเจลได้ และการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบพบว่าการเติมในช่วงความเข้มข้นต่ำสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้ แต่การเติมในช่วงความเข้มข้นสูงจะลดความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากเกิดแรงผลักระหว่างประจุบนผิวของตัวดูดซับ และประจุบนโมเลกุลของสีเชื่อมคองโกเรด

Wang และคณะ [33] ได้ศึกษาแรงกระทำระหว่างคองโกเรตและคอปเปอร์ไอออนในสาร  
กระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานไฮโดรเจล พบว่าการเติมไอออนคอปเปอร์ลงไปโดยสารละลาย  
คองโกเรตทำให้ความสามารถในการดูดซับคองโกเรตของไคโตซานไฮโดรเจลมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม  
ปริมาณของคอปเปอร์ไอออน เนื่องจากคอปเปอร์ไอออนและคองโกเรตเกิดเป็นสารประกอบ  
เชิงซ้อน และไคโตซานไฮโดรเจลมีค่าการเลือกเฉพาะต่อคอปเปอร์ไอออนอิสระมากกว่าคอปเปอร์  
และคองโกเรตที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบและตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต

3.1.1 การเตรียมดูดซับซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบ

3.1.1.1 ชั่งแกลบ 90 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร 750 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ที่มีแกลบ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.1.1.2 ล้างแกลบที่ผ่านการต้มด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH = 7

3.1.1.3 นำแกลบไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.1.4 ชั่งแกลบ 20 กรัมใส่ขามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.1.1.5 ชั่งถั่วแกลบ 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ บั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.1.6 กรองสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ และล้างถั่วที่เหลือบนกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนปริมาณ 100 มิลลิลิตร

3.1.1.7 ปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่ง pH 7 และปล่อยให้ไว้นาน 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเป็นเจล

3.1.1.8 เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนบดให้เจลแตกตัว นำไปกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ และล้างเจลด้วยน้ำกลั่นอีก 100 มิลลิลิตร

3.1.1.9 นำเจลไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.1.1.10 บดซิลิกาที่ผ่านการอบแห้งให้มีขนาด 125-177 ไมโครเมตร (ระหว่าง Mesh No. 80 และ Mesh No. 120)

3.1.1.11 นำซิลิกาที่ผ่านการบดไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.1.2 การเตรียมตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต

3.1.2.1 ชั่งแกลบ 90 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร 750 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ที่มีแกลบ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.1.2.2 ล้างแกลบที่ผ่านการต้มด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH = 7



3.1.2.3 นำเกลือไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.2.4 ชั่งเกลือ 20 กรัมใส่ขามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.1.2.5 ชั่งเอาเกลือ 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.2.6 กรองสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองสูญญากาศ และล้างเอาที่เหลือนบนกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.1.2.7 ละลาย  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  1 มิลลิโมล ในกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมน้ำในสารละลายที่ได้จากการกรอง

3.1.2.8 ปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่ง pH 7 และปล่อยให้ไว้นาน 6 วัน เพื่อให้เกิดเป็นเจล

3.1.2.9 เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนบดให้เจลแตกตัว นำไปกรองด้วยชุดกรองสูญญากาศ และล้างเจลด้วยน้ำกลั่นอีก 100 มิลลิลิตร

3.1.2.10 นำเจลไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.1.2.11 บดซิลิกาที่ผ่านการอบแห้งให้มีขนาด 125-177 ไมโครเมตร (ระหว่าง Mesh No. 80 และ Mesh No. 120)

3.1.1.12 นำซิลิกาที่ผ่านการบดไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้เป็นซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน 0.635 % โดยน้ำหนัก

3.1.2.13 ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนปริมาณของ  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  เป็น 0.25 0.5 0.75 และ 2 มิลลิโมล ซึ่งน้ำหนักของคอปเปอร์ไอออนคิดเป็น 0.159 0.318 0.476 และ 1.270 % โดยน้ำหนัก

3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเอาเกลือและซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ไอออนในเตา

3.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence, XRFs)

3.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายทองแดง

3.3.1 เตรียมสารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 60 และ 70 ppm

3.3.2 วัดค่าการดูดแสงของสารละลายที่เตรียมไว้ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

3.3.3 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด

3.4 การทดลองดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบและซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ไนเตรต

3.4.1 ชั่งตัวดูดซับซิลิกา 0.2 กรัมใส่ขวดสีชาจำนวน 12 ขวด เติมสารละลายคองโกเรดเข้มข้น 20 ppm ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

3.4.2 เก็บตัวอย่างทุก 15 นาทีใน 2 ชั่วโมงแรก และทุก 30 นาทีในชั่วโมงที่ 3-4 นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปแยกตัวดูดซับออกโดยการเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที นำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

3.4.3 ทำการทดลอง 3.4.1 – 3.4.2 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดเป็น 30 50 100 150 200 300 และ 500 ppm

3.4.4 ทำการทดลอง 3.4.1 – 3.4.3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับเป็นซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ไอออนที่น้ำหนักต่าง ๆ

3.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ และการหาแบบจำลองสมดุลดูดซับที่เหมาะสม

3.5.1 กำหนดค่าความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ และปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ

3.5.2 หากความสัมพันธ์ของข้อมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 1 และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 2 เสมือน และเลือกแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสม

3.5.3 หากความสัมพันธ์สมดุลดูดซับของสารละลายคองโกเรดด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ ฟรุนดลิช และชิปส์ และเลือกแบบจำลองสมดุลดูดซับที่เหมาะสม

3.5.4 หากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของคอปเปอร์ไนซิลิกากับพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสม

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของซิลิกาและซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุง

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในรูปออกไซด์ของตัวดูดซับโดยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์

จากการตรวจวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวดูดซับ โดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือและซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน ได้ปริมาณองค์ประกอบในรูปออกไซด์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในรูปออกไซด์ของตัวดูดซับโดยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือและซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน

| องค์ประกอบ<br>ในรูปออกไซด์     | ซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 0  | 0.159 | 0.318 | 0.476 | 0.635 | 1.270 |
| Na <sub>2</sub> O              | 21.34  | 20.48 | 26.61 | 19.12 | 12.73 | 20.04 |
| SiO <sub>2</sub>               | 77.81  | 78.13 | 71.94 | 79.65 | 85.63 | 77.00 |
| SO <sub>3</sub>                | 0.25   | 0.29  | 0.25  | -     | -     | 0.29  |
| CaO                            | 0.18   | 0.31  | 0.29  | 0.27  | 0.20  | 0.28  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.19   | 0.24  | 0.21  | 0.14  | 0.15  | 0.17  |
| NiO                            | 0.09   | 0.21  | 0.17  | 0.10  | 0.22  | 0.27  |
| CuO                            | 0.14   | 0.34  | 0.53  | 0.72  | 1.07  | 1.95  |

จากตารางพบว่าซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือมีสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์อยู่ 0.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคิดเป็นคอปเปอร์ไอออน 0.112 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำน้ำหนักดังกล่าวไปหักออกจากร้อยละของคอปเปอร์ไอออนในซิลิกาที่ผ่านการเติมคอปเปอร์แล้วจะได้น้ำหนักของคอปเปอร์ไอออนดังตารางที่ 4.2

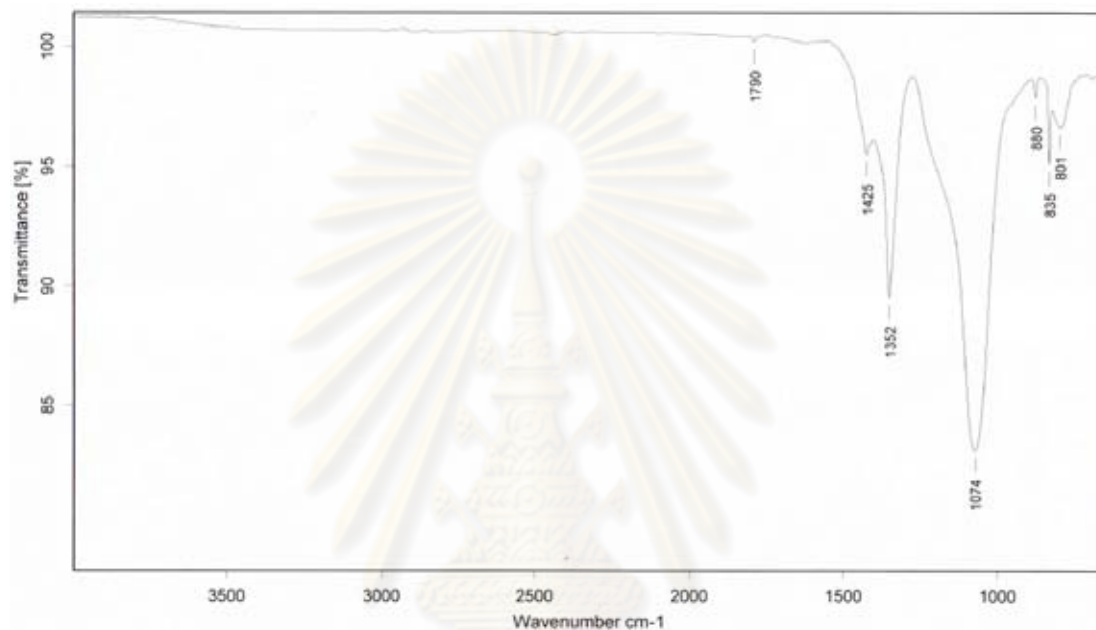
ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของคอปเปอร์ไอออนในซิลิกา

|                                      | ซิลิกาเติมคอปเปอร์ไอออน |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                      | 0 %                     | 0.159 % | 0.318 % | 0.476 % | 0.635 % | 1.270 % |
| เปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ไอออนที่ตรวจพบ | 0.112                   | 0.272   | 0.423   | 0.575   | 0.855   | 1.558   |
| เปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ไอออนที่เติม   | 0                       | 0.160   | 0.312   | 0.463   | 0.742   | 1.445   |

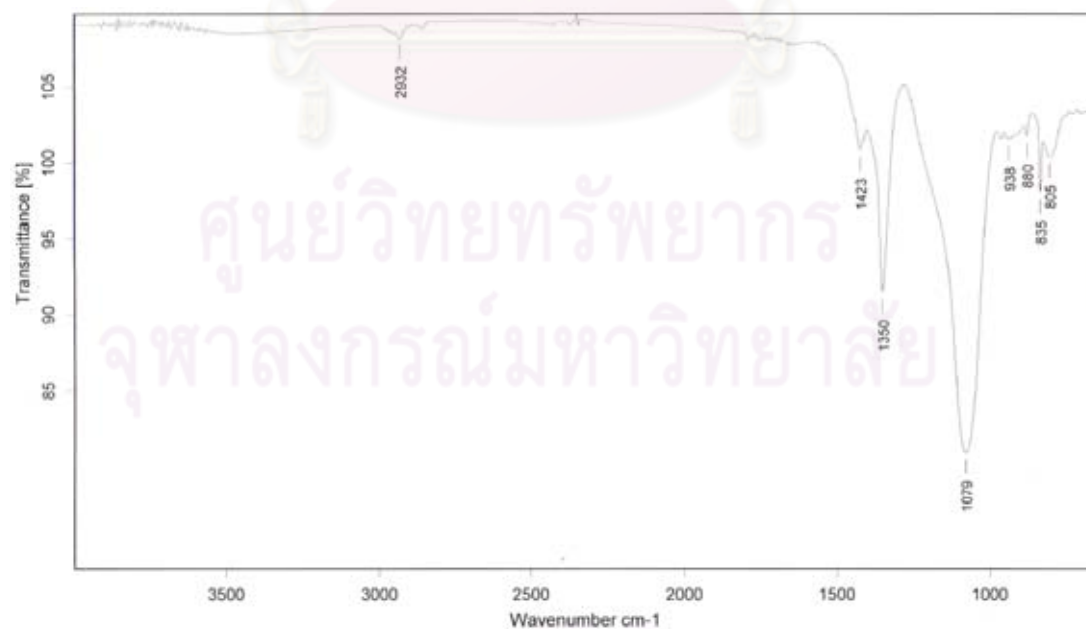
จากตารางที่ 4.2 พบว่า ปริมาณของคอปเปอร์ที่ตรวจพบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมคอปเปอร์ไอออนเพิ่มขึ้น แสดงว่าการตกตะกอนร่วมระหว่างซิลิกาเจลและคอปเปอร์ในช่วงปริมาณดังกล่าวเกิดขึ้นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเติมคอปเปอร์ในเตรตในปริมาณที่มากขึ้น

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยรังสีอินฟราเรด

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถาเถา และซิลิกาที่ผ่านการดัดแปลงโดยการเติมคอปเปอร์ ได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.1 - 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถาเถา

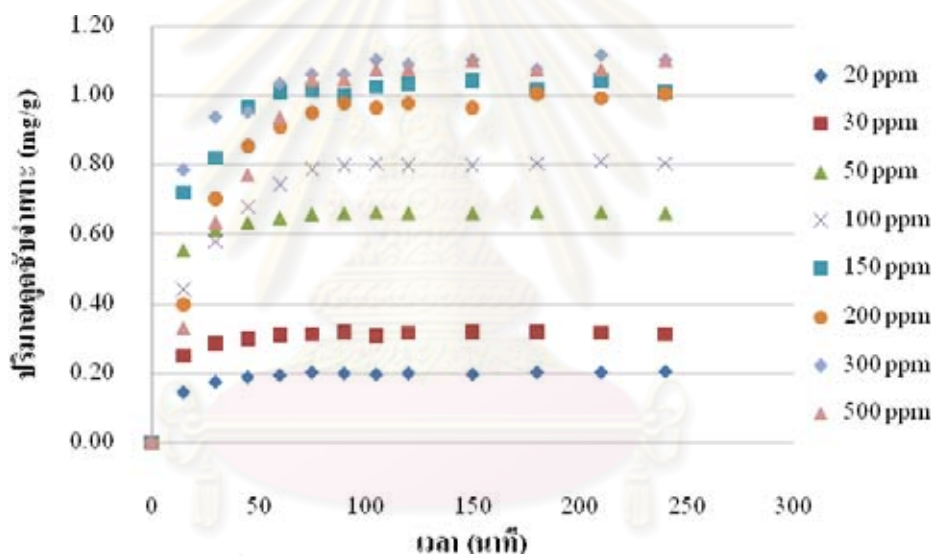


รูปที่ 4.2 ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในอัตราส่วน 0.318 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.1 - 4.2 พบว่า ผลการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับมีซิลิกอนออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสามารถตรวจวัดได้ที่ความยาวคลื่น  $1074 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับซิลิกาที่สกัดจาก ถ้ำเกลือ และ  $1079 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุง และสำหรับตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการ ปรับปรุงอื่น ๆ ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ใน อัตราส่วน 0.318 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยการ กระเจิงโดยรังสีเอ็กซ์

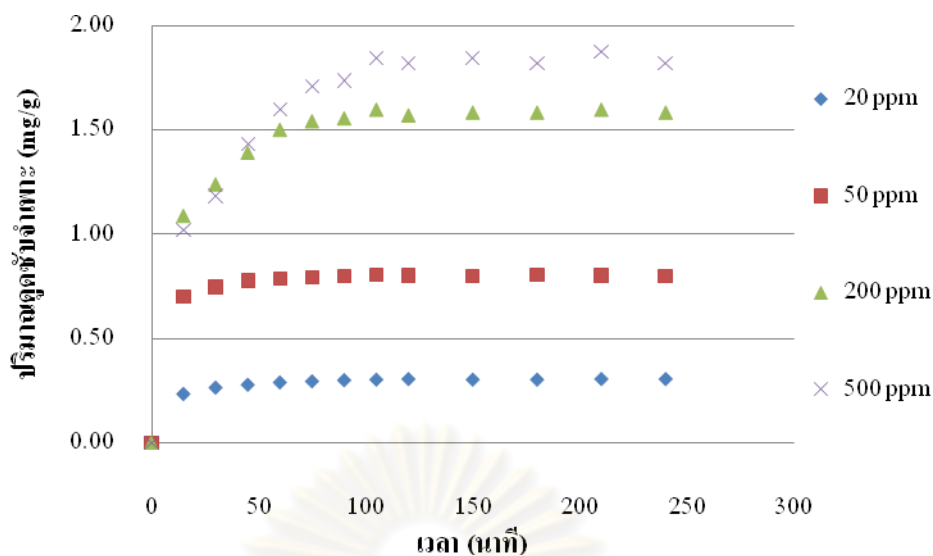
## 4.2 ผลการทดลองดูดซับสารละลายทองโคเรดด้วยซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือและซิลิกาที่ผ่าน การปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต

จากการทดลองดูดซับสารละลายทองโคเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ด้วยซิลิกาที่สกัด จากถ้ำเกลือและซิลิกาที่ผ่านการเติมคอปเปอร์ไอออนในอัตราส่วนต่าง ๆ สามารถสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดูดซับจำเพาะกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.3 - 4.8

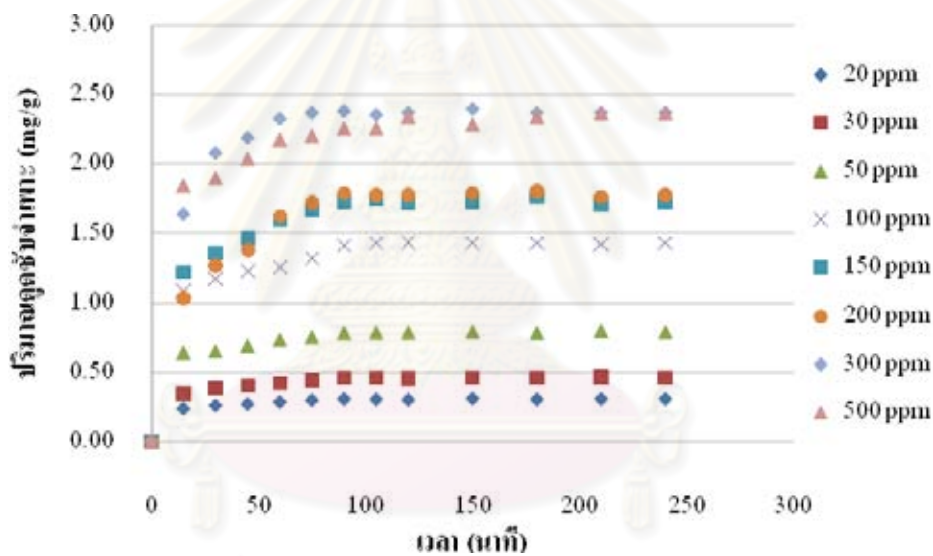


รูปที่ 4.3 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือที่ความเข้มข้น เริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

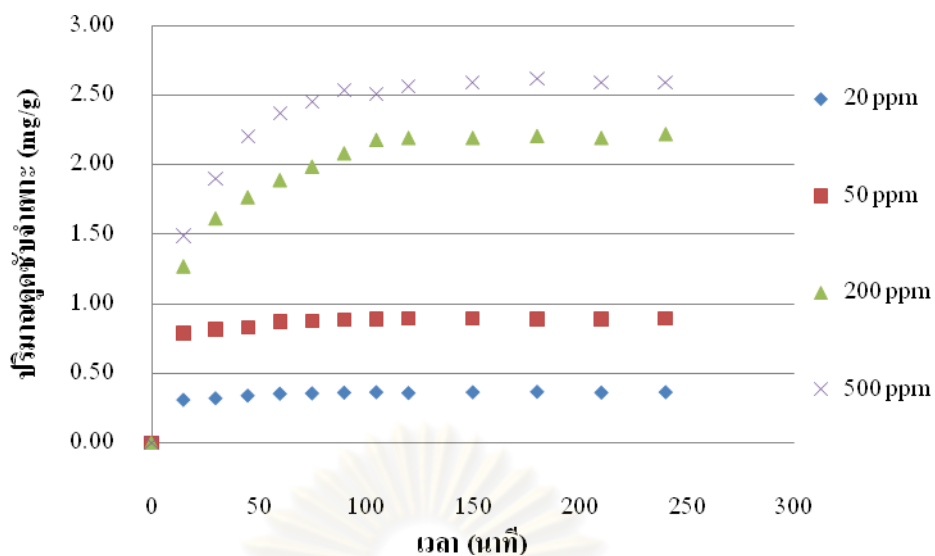


รูปที่ 4.4 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.159 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

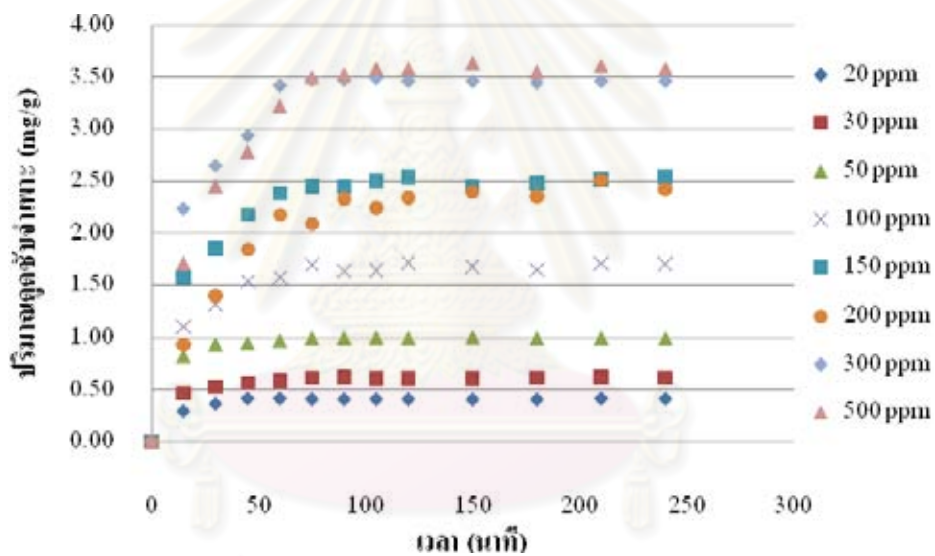


รูปที่ 4.5 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

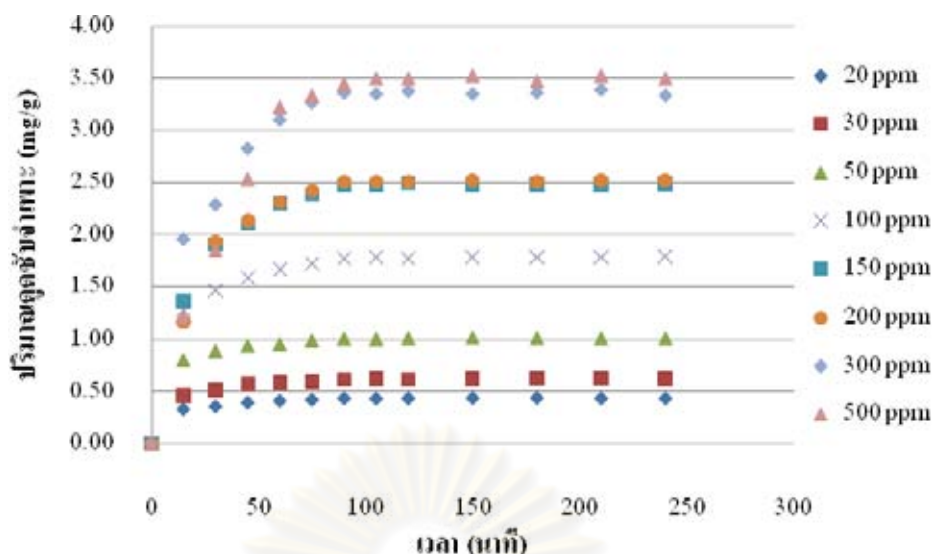


รูปที่ 4.6 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.476 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm



รูปที่ 4.7 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.635 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ ของซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

จากรูปที่ 4.3 - 4.8 พบว่าปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาการดูดซับ และเข้าสู่สมดุลดูดซับภายใน 90 นาที และเมื่อวิเคราะห์ผลการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบและซิลิกาที่ผ่านการเติมคอปเปอร์ไอออนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 1 และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 2 เสมือน ได้ผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 4.3 - 4.10

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.2066                                   | 0.2136              | 6.65  | 0.9691 | 0.0294   | 0.2095                     | 0.95  | 0.9995 | 0.0013   |
| 30                        | 0.3196                                   | 0.3281              | 4.47  | 0.9630 | 0.0331   | 0.3210                     | 1.23  | 0.9995 | 0.0031   |
| 50                        | 0.6639                                   | 0.6796              | 3.31  | 0.9822 | 0.0356   | 0.6705                     | 0.70  | 0.9999 | 0.0025   |
| 100                       | 0.8099                                   | 0.9007              | 15.50 | 0.9799 | 0.04142  | 0.8498                     | 0.12  | 0.9982 | 0.0239   |
| 150                       | 1.0413                                   | 1.0894              | 7.80  | 0.9370 | 0.1037   | 1.0491                     | 0.22  | 0.9984 | 0.0279   |
| 200                       | 1.0055                                   | 1.2452              | 29.11 | 0.9451 | 2.3740   | 1.0745                     | 0.07  | 0.9960 | 0.0813   |
| 300                       | 1.1157                                   | 1.1435              | 6.90  | 0.9734 | 0.0950   | 1.1367                     | 0.14  | 0.9992 | 0.0045   |
| 500                       | 1.1019                                   | 1.5738              | 52.82 | 0.9639 | 8.3150   | 1.2365                     | 0.03  | 0.9872 | 0.0868   |



ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซัลฟิดาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.3058                                   | 0.3145              | 5.25  | 0.9889 | 0.0438   | 0.3125                     | 0.71  | 0.9998 | 0.0006   |
| 50                        | 0.8044                                   | 0.8156              | 2.43  | 0.9763 | 0.0207   | 0.8083                     | 0.77  | 0.9999 | 0.0018   |
| 200                       | 1.5978                                   | 1.6753              | 8.45  | 0.9646 | 0.5761   | 1.6458                     | 0.09  | 0.9993 | 0.0153   |
| 500                       | 1.7631                                   | 1.9264              | 17.02 | 0.9514 | 1.5648   | 1.8932                     | 0.04  | 0.9965 | 0.0603   |

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซัลฟิดาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.3113                                   | 0.3162              | 5.17  | 0.9382 | 0.0443   | 0.3165                     | 0.63  | 0.9995 | 0.0015   |
| 30                        | 0.4656                                   | 0.4761              | 5.94  | 0.9555 | 0.0866   | 0.4758                     | 0.37  | 0.9995 | 0.0021   |
| 50                        | 0.7989                                   | 0.8032              | 4.53  | 0.8265 | 0.0936   | 0.8157                     | 0.22  | 0.9994 | 0.0081   |
| 100                       | 1.4270                                   | 1.4533              | 5.74  | 0.8792 | 0.2623   | 1.4788                     | 0.10  | 0.9989 | 0.0159   |
| 150                       | 1.7438                                   | 1.8109              | 7.95  | 0.9368 | 0.5719   | 1.7946                     | 0.08  | 0.9986 | 0.0198   |
| 200                       | 1.8044                                   | 1.9455              | 13.83 | 0.9553 | 1.5735   | 1.8843                     | 0.05  | 0.9969 | 0.0477   |
| 300                       | 2.3691                                   | 2.5329              | 7.66  | 0.9572 | 0.7106   | 2.4248                     | 0.11  | 0.9994 | 0.0635   |
| 500                       | 2.3691                                   | 2.3696              | 5.00  | 0.8650 | 0.3305   | 2.4402                     | 0.06  | 0.9996 | 0.0252   |

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซัลฟิดาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.3691                                   | 0.3721              | 3.25  | 0.9121 | 0.0199   | 0.3721                     | 0.87  | 0.9998 | 0.0010   |
| 50                        | 0.8926                                   | 0.9024              | 2.42  | 0.8985 | 0.0236   | 0.9031                     | 0.47  | 0.9999 | 0.0018   |
| 200                       | 2.0166                                   | 2.2351              | 14.97 | 0.9903 | 1.1970   | 2.2183                     | 0.03  | 0.9987 | 0.1548   |
| 500                       | 2.5895                                   | 2.8313              | 13.54 | 0.9896 | 1.1401   | 2.7344                     | 0.04  | 0.9991 | 1.1361   |

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซัลฟิดาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.4215                                   | 0.4439              | 6.47  | 0.8876 | 0.0938   | 0.4242                     | 0.88  | 0.9994 | 0.0146   |
| 30                        | 0.6198                                   | 0.6393              | 5.42  | 0.9706 | 0.0952   | 0.6303                     | 0.39  | 0.9997 | 0.0036   |
| 50                        | 1.0083                                   | 1.0382              | 3.49  | 0.9612 | 0.0686   | 1.0139                     | 0.53  | 0.9998 | 0.0076   |
| 100                       | 1.7080                                   | 1.8038              | 9.48  | 0.9656 | 0.7479   | 1.7540                     | 0.08  | 0.9987 | 0.0217   |
| 150                       | 2.5372                                   | 2.7005              | 10.99 | 0.9585 | 1.4665   | 2.6226                     | 0.05  | 0.9986 | 0.0587   |
| 200                       | 2.4242                                   | 2.9709              | 31.93 | 0.9817 | 8.5366   | 2.7078                     | 0.02  | 0.9950 | 0.1576   |
| 300                       | 3.4573                                   | 3.7383              | 10.35 | 0.9439 | 1.8840   | 3.5829                     | 0.05  | 0.9982 | 0.1572   |
| 500                       | 3.6088                                   | 4.1771              | 28.28 | 0.9816 | 6.5501   | 3.8565                     | 0.02  | 0.9963 | 0.1497   |

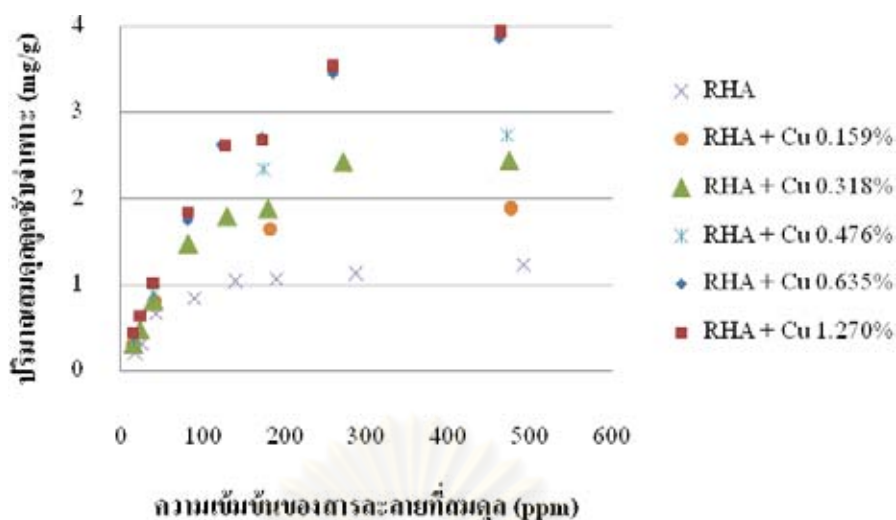
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์และ  $R^2$  ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 และอันดับ 2 เสมือนของตัวดูดซับซัลฟิดาที่เติมคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยมวล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 20-500 ppm

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) | ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ $q_{exp}$ (mg/g) | จลนพลศาสตร์อันดับ 1 |       |        |          | จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน |       |        |          |
|---------------------------|--|---------------------|-------|--------|----------|----------------------------|-------|--------|----------|
|                           |  | $q_e$               | $k_1$ | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_e$                      | $k_2$ | $R^2$  | $\chi^2$ |
| 20                        | 0.4408                                   | 0.4544              | 5.87  | 0.9484 | 0.0807   | 0.4516                     | 0.44  | 0.9995 | 0.0026   |
| 30                        | 0.6226                                   | 0.6465              | 6.25  | 0.9701 | 0.1273   | 0.6427                     | 0.28  | 0.9997 | 0.0023   |
| 50                        | 1.0110                                   | 1.0384              | 4.63  | 0.9814 | 0.1125   | 1.0306                     | 0.25  | 0.9998 | 0.0023   |
| 100                       | 1.7796                                   | 1.8643              | 7.09  | 0.9799 | 0.4637   | 1.8462                     | 0.09  | 0.9996 | 0.0082   |
| 150                       | 2.4793                                   | 2.7770              | 14.93 | 0.9799 | 2.4519   | 2.6102                     | 0.04  | 0.9985 | 0.0563   |
| 200                       | 2.5207                                   | 2.9842              | 21.39 | 0.9518 | 4.6253   | 2.6709                     | 0.04  | 0.9974 | 0.2080   |
| 300                       | 3.3747                                   | 3.6914              | 13.96 | 0.9484 | 3.0193   | 3.5423                     | 0.03  | 0.9970 | 0.1210   |
| 500                       | 3.5262                                   | 4.7170              | 42.68 | 0.9707 | 20.678   | 3.9604                     | 0.01  | 0.9872 | 0.2923   |

จากตารางที่ 4.3 - 4.8 พบว่า จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 2 เสมือนมีค่าความแม่นยำของแบบจำลองสูงกว่าจลนพลศาสตร์อันดับ 1 นอกจากนี้ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะที่คำนวณจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะที่คำนวณจากจลนพลศาสตร์อันดับ 1 เพราะฉะนั้นแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน จึงเหมาะสมในการใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับมากกว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1

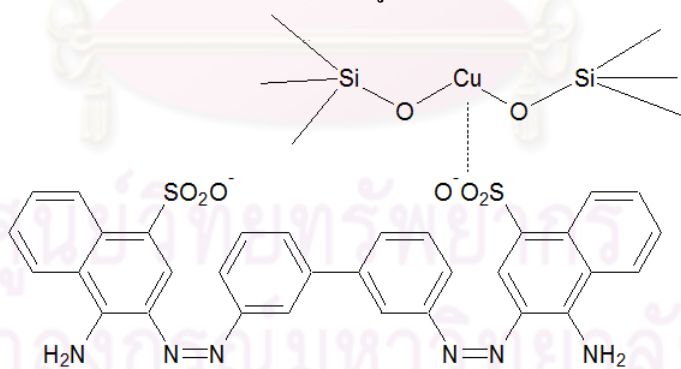
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมดุลดูดซับของการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับซัลฟิดาที่สกัดจากถั่วแกลบและซัลฟิดาที่ผ่านปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต

เมื่อนำค่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่สมดุลดูดซับจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์สมดุลดูดซับ ได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลลุดซึบจำเพาะและความเข้มข้นของสารละลายของโกเรตที่ลุดของตัวลุดซึบชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่า การเพิ่มปริมาณคอปเปอร์ไอออนสามารถเพิ่มปริมาณลุดซึบจำเพาะได้ เนื่องจากการเติมคอปเปอร์ไอออนทำให้ตัวลุดซึบซิติลิกามีความเป็นขั้วบวกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างคอปเปอร์ไอออนซึ่งมีขั้วบวกบนพื้นผิวของซิติลิกและหมู่ซัลโฟเนตซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีประจุลบบนโมเลกุลของลีย้อมคองโกเรต ดังรูปที่ 4.10 แต่ปริมาณคอปเปอร์ไอออนในซิติลิกมากกว่า 0.855 % โดยมวล ไม่ส่งผลต่อสมบัติการลุดซึบของซิติลิก เนื่องจากที่ปริมาณน้ำหนักร้อยของคอปเปอร์ไอออนนี้ ลีย้อมคองโกเรตได้ถูกลุดซึบเต็มพื้นผิวของตัวลุดซึบแล้ว ดังนั้นการเพิ่มแรงทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณลุดซึบจำเพาะได้

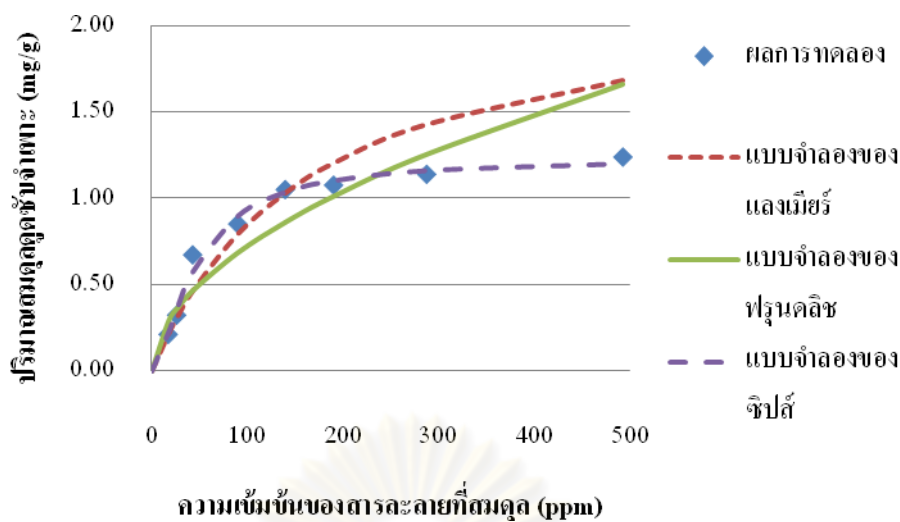


รูปที่ 4.10 พันธะของการลุดซึบสารละลายคองโกเรตด้วยตัวลุดซึบซิติลิกที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเติมคอปเปอร์ในเตรต

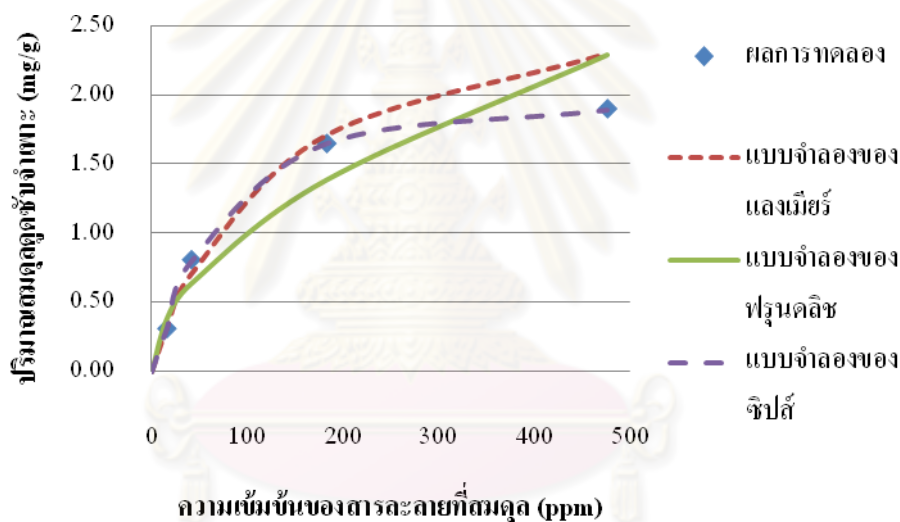
เมื่อทดสอบสมมูลลุดซึบด้วยแบบจำลองสมมูลลุดซึบของแลงเมียร์ ฟรุนดลิช และซีปส์ สามารถสรุปค่าคงที่ของแบบจำลอง ค่า  $R^2$  และค่า ไควสแควร์ของแบบจำลองต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์และ  $R^2$  แบบจำลองสมมูลดูดซับแบบแลงเมียร์ ฟรุนคลิช และชิปส์

| ชนิดของตัวดูดซับ           | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอปเปอร์ในตัวดูดซับ | แบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์ |        |        |          | แบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนคลิช |        |        |          | แบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์ |        |      |        |          |
|----------------------------|---|---------------------------------|--------|--------|----------|--------------------------------|--------|--------|----------|-----------------------------|--------|------|--------|----------|
|                            |   | $q_{max}$                       | $K_L$  | $R^2$  | $\chi^2$ | $K_F$                          | $n$    | $R^2$  | $\chi^2$ | $q_{max}$                   | $K_S$  | $n$  | $R^2$  | $\chi^2$ |
| ชิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบ   | 0.112                                       | 2.2376                          | 0.0061 | 0.9596 | 0.2796   | 0.0660                         | 0.5200 | 0.8510 | 0.3172   | 1.2313                      | 0.0212 | 1.52 | 0.9842 | 0.0280   |
| ชิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไอออน | 0.272                                       | 2.9248                          | 0.0077 | 0.9906 | 0.0861   | 0.0909                         | 0.5233 | 0.9193 | 0.1736   | 2.0106                      | 0.0175 | 1.31 | 0.9999 | 0.0002   |
|                            | 0.423                                       | 4.9261                          | 0.0042 | 0.9918 | 0.3406   | 0.0683                         | 0.6319 | 0.9654 | 0.3172   | 2.7124                      | 0.0128 | 1.31 | 0.9893 | 0.0258   |
|                            | 0.575                                       | 4.8948                          | 0.0050 | 0.9947 | 0.1533   | 0.0824                         | 0.6030 | 0.9370 | 0.2904   | 3.0210                      | 0.0126 | 1.27 | 0.9999 | 0.0091   |
|                            | 0.855                                       | 6.7980                          | 0.0042 | 0.9988 | 0.1508   | 0.0768                         | 0.6824 | 0.9629 | 0.4938   | 4.5711                      | 0.0089 | 1.22 | 0.9923 | 0.0397   |
|                            | 1.558                                       | 6.2893                          | 0.0048 | 0.9990 | 0.0708   | 0.0810                         | 0.6735 | 0.9273 | 0.4198   | 4.8800                      | 0.0080 | 1.14 | 0.9925 | 0.0330   |

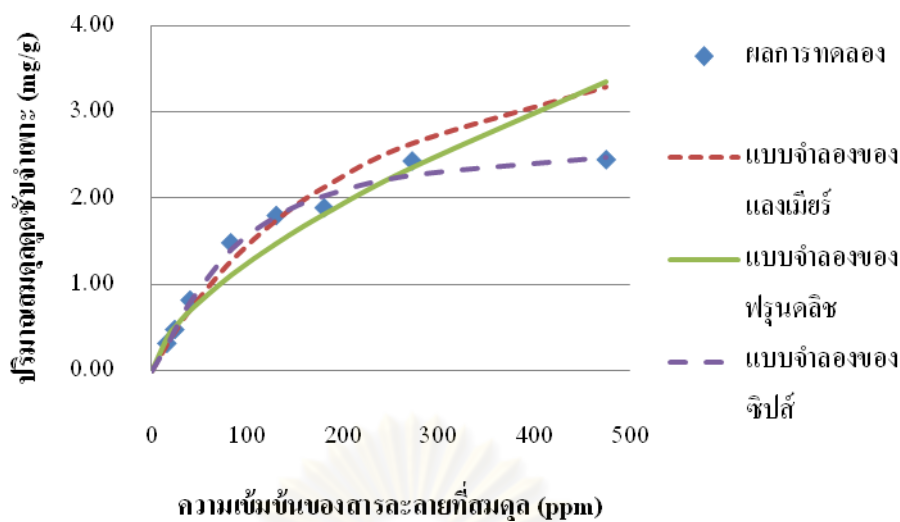


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ

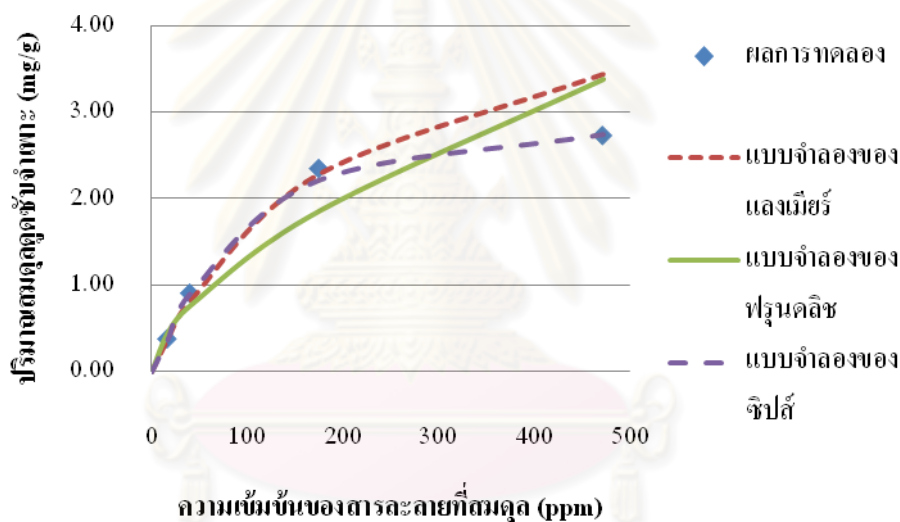


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.159 % โดยมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

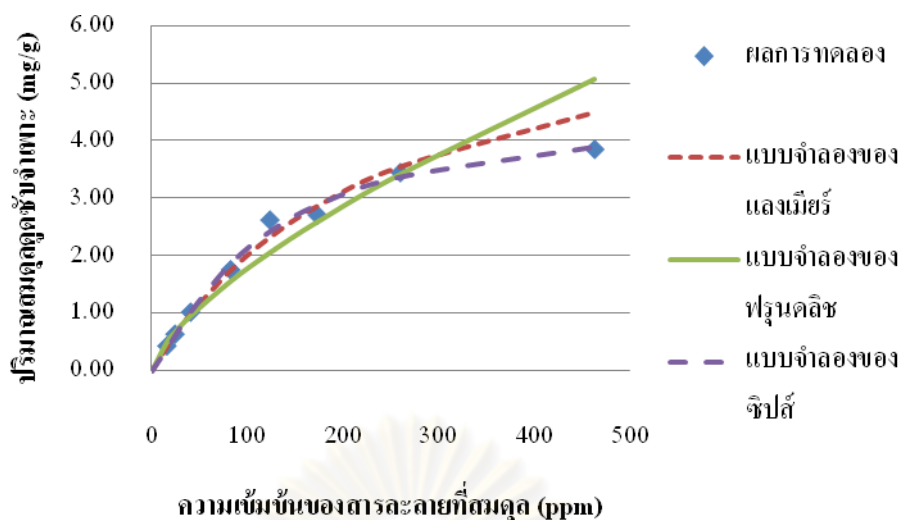


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % โดยมวล

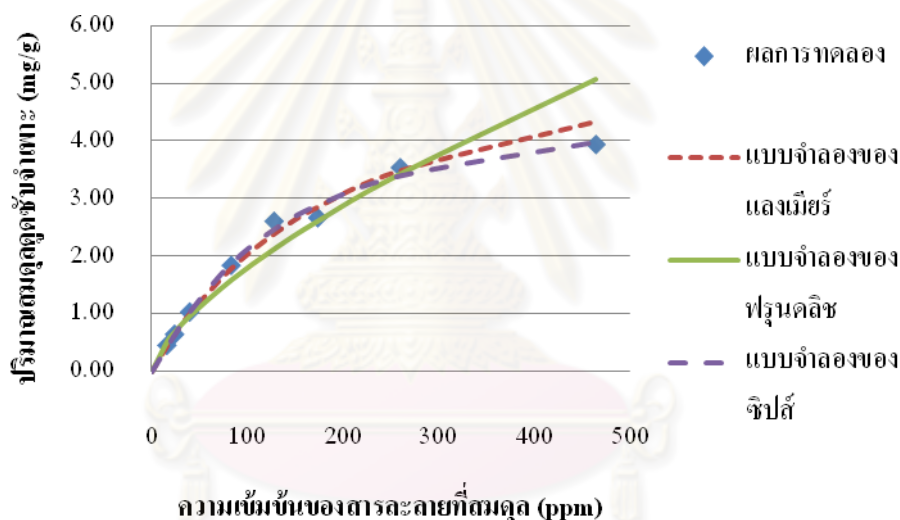


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.476 % โดยมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบข้อมูลสมมูลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 0.635 % โดยมวล



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบข้อมูลสมมูลดูดซับกับแบบจำลองดูดซับทั้ง 3 แบบ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรต 1.270 % โดยน้ำมวล

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.11 - 4.16 พบว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์นั้น มีความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนคลิช ดังนั้นแบบจำลองสมมูลดูดซับของชิปส์จึงเหมาะสมในการอธิบายการดูดซับสารละลายของโคเรคบนตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือและซิลิกาที่เติมคอปเปอร์ไนเตรตในอัตราส่วนต่าง ๆ มากกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนคลิช



เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่ได้กับการทดลองดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.10

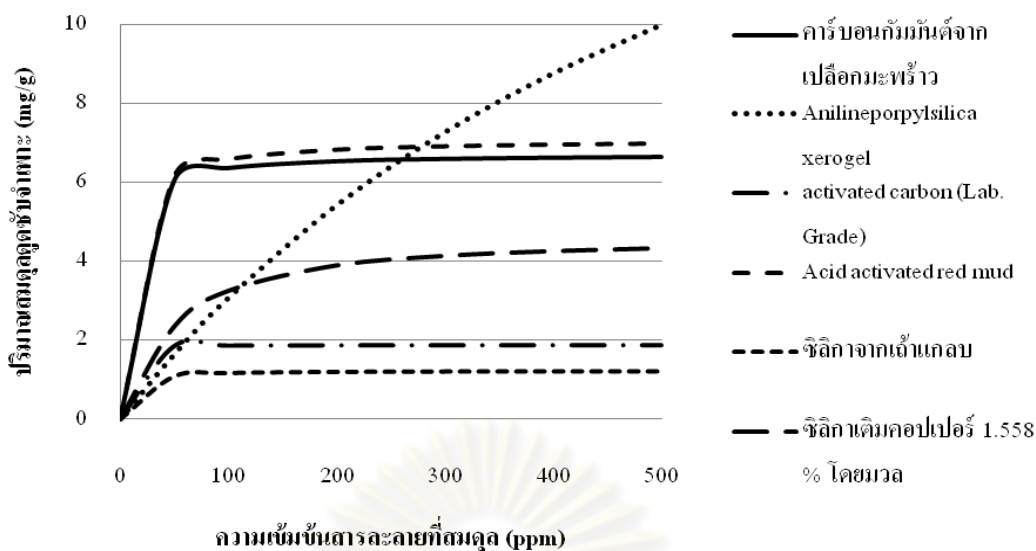
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

| ชนิดของตัวดูดซับ   | สมการสมมูลดูดซับ   |
|--|--|
| คาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว [30]                           | $q_e = \frac{(6.72)(0.18)(C_e)}{1 + (0.18)(C_e)}$                        |
| Ca-bentonite [31]  | $q_e = 26.91C_e^{3.23}$  |
| Anilinepropylsilica xerogel [34]                               | $q_e = \frac{(22.62)(0.00155)(C_e)^{1.003}}{1 + (0.00155)(C_e)^{1.003}}$ |
| คาร์บอนกัมมันต์ (เกรดห้องปฏิบัติการ) [35]                      | $q_e = \frac{(1.875)(1.378)(C_e)}{1 + (1.378)(C_e)}$                     |
| Chitosan beads [36]  | $q_e = \frac{(93.71)(0.257)(C_e)}{1 + (0.257)(C_e)}$                     |
| Acid activated red mud [37]                                    | $q_e = \frac{(7.087)(0.1301)(C_e)}{1 + (0.1301)(C_e)}$                   |
| ซิลิกาจากเถ้าแกลบ  | $q_e = \frac{(1.2313)(0.0212C_e)^{1.52}}{1 + (0.0212C_e)^{1.52}}$        |
| ซิลิกาจากเถ้าแกลบที่มีคอปเปอร์ไอออน 0.855<br>เปอร์เซ็นต์โดยมวล | $q_e = \frac{(4.5711)(0.0080C_e)^{1.22}}{1 + (0.0080C_e)^{1.22}}$        |

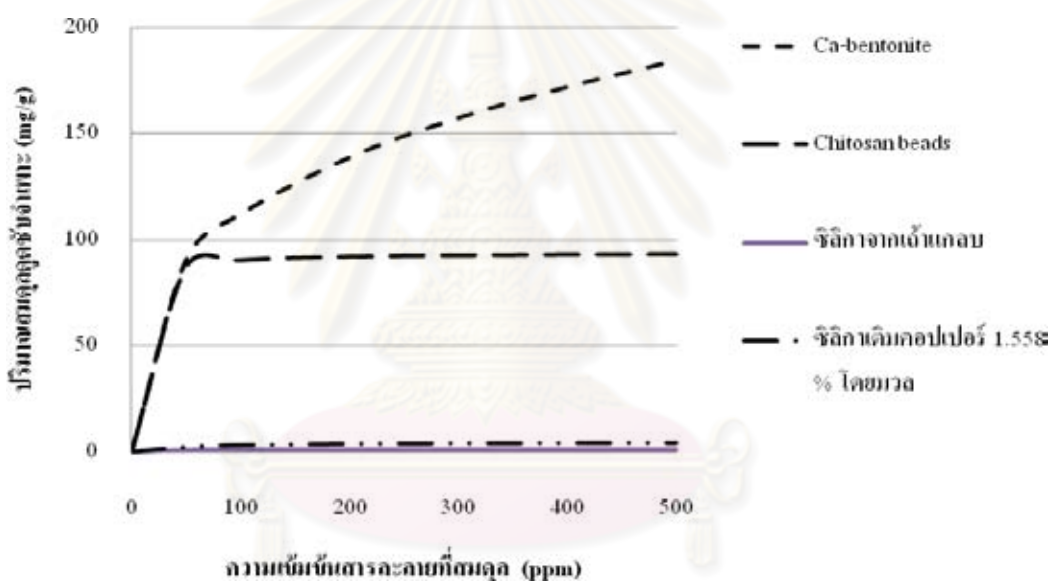
โดยที่  $q_e$  มีหน่วยเป็น mg/g และ  $C_e$  มีหน่วยเป็น ppm

จากตารางที่ 4.10 เมื่อนำสมการสมมูลดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้น 0 - 500 ppm ได้เป็นดังรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.17 พบว่าปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบและซิลิกาที่เติมคอปเปอร์มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการดูดซับสารละลายคองโกเรดด้วยตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติการดูดซับของตัวดูดซับซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยคอปเปอร์ในเตรตสามารถเพิ่มปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของพรสวรรค์ และคณะ [6] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติการดูดซับของตัวดูดซับซิลิกาจากเถ้าขาน้อยด้วยโลหะชนิดต่าง ๆ สำหรับการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ และยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Donia และคณะ [38] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติการดูดซับของตัวดูดซับซิลิกาด้วยสารประกอบเอมีนเพื่อใช้ในการดูดซับสีข้อมกรชนิดต่าง ๆ



ก.)



ข.)

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบสมมูลดูดซับของไอออนด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ในช่วงความเข้มข้น 0-500 ppm ก.) ปริมาณสมมูลดูดซับน้อยกว่า 20 mg/g ข.) ปริมาณสมมูลดูดซับมากกว่า 20 mg/g

#### 4.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคอปเปอร์ในตัวดูดซับซิลิกากับพารามิเตอร์ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของซีปส์

เมื่อพิจารณาปริมาณคอปเปอร์ในซิลิกาในช่วง 0.122 - 0.855 เปอร์เซ็นต์โดยมวลกับพารามิเตอร์ตามแบบจำลองสมมูลดูดซับของซีปส์ พบว่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองนั้นแปรผันตามปริมาณคอปเปอร์ในตัวดูดซับซิลิกาที่ใช้ในการดูดซับ ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ของแบบจำลองของชิปส์และปริมาณคอปเปอร์ในชิลิกา

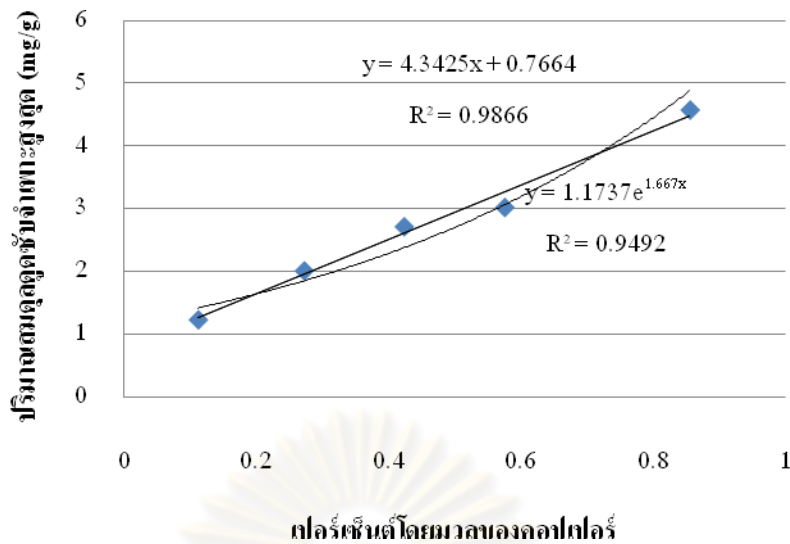
| ปริมาณคอปเปอร์ในชิลิกา<br>(เปอร์เซ็นต์โดยมวล) | พารามิเตอร์ |        |      |
|---|-------------|--------|------|
|   | $q_{\max}$  | $K_S$  | $n$  |
| 0.112   | 1.2313      | 0.0212 | 1.52 |
| 0.272   | 2.0106      | 0.0175 | 1.31 |
| 0.423   | 2.7124      | 0.0128 | 1.31 |
| 0.575   | 3.0210      | 0.0126 | 1.27 |
| 0.855   | 4.5711      | 0.0089 | 1.22 |

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.11 ทดสอบความสัมพันธ์ด้วยสมการเชิงเส้นและสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลได้ผลดังตารางที่ 4.12

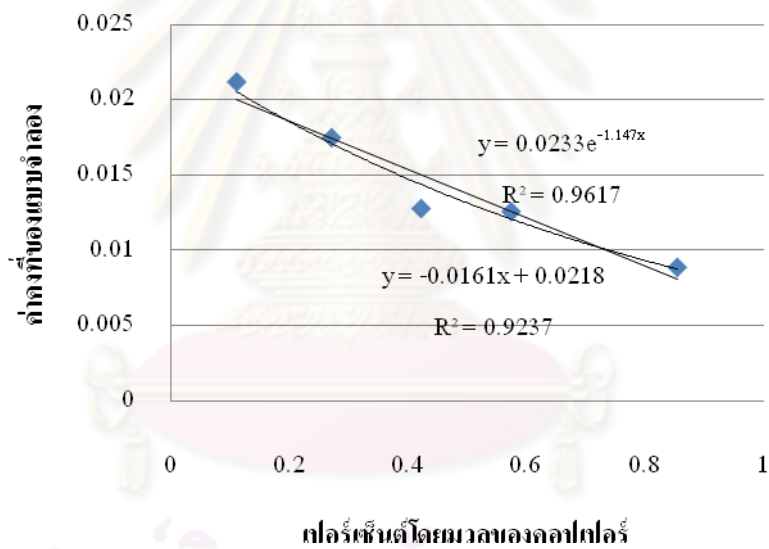
ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุด ค่าคงที่ของแบบจำลอง และเลขยกกำลังแบบจำลองตามแบบจำลองของชิปส์กับเปอร์เซ็นต์โดยมวลคอปเปอร์ในชิลิกา

| พารามิเตอร์                                      | ชนิดของสมการ<br>ความสัมพันธ์ | สมการ                   | $R^2$  | $\chi^2$ |
|--|------------------------------|-------------------------|--------|----------|
| ปริมาณสมมูลดูดซับ<br>จำเพาะสูงสุด ( $q_{\max}$ ) | สมการเชิงเส้น                | $y = 4.3425x + 0.7644$  | 0.9866 | 0.0280   |
|  | สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล        | $y = 1.1737e^{1.677x}$  | 0.9492 | 0.1040   |
| ค่าคงที่ของ<br>แบบจำลอง ( $K_S$ )                | สมการเชิงเส้น                | $y = -0.0161x + 0.0218$ | 0.9237 | 0.0005   |
|  | สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล        | $y = 0.0233e^{-1.147x}$ | 0.9617 | 0.0002   |
| เลขยกกำลังของ<br>แบบจำลอง ( $n$ )                | สมการเชิงเส้น                | $y = -0.3440x + 1.4799$ | 0.7349 | 0.0100   |
|  | สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล        | $y = 1.4813e^{-0.243x}$ | 0.7592 | 0.0093   |

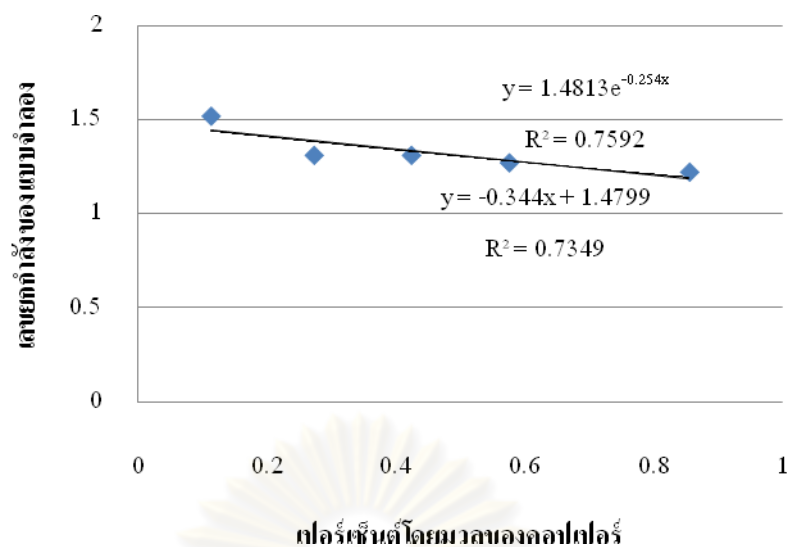
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุคุดซ้บจำเพาะสูงสุดและปริมาณคอปเปอร์ใน ตัวคุดซ้บซึลิกา



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของแบบจำลองและปริมาณคอปเปอร์ใน ตัวคุดซ้บซึลิกา



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขยกกำลังของแบบจำลองและปริมาณคอปเปอร์ในตัวดูดซับซิลิกา

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.18 - 4.20 พบว่า ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุดกับเปอร์เซ็นต์โดยมวลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นได้ดีกว่าสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของสมการเชิงเส้นมีค่าต่ำกว่าสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล ในขณะที่ค่าคงที่ของแบบจำลองและเลขยกกำลังของแบบจำลองสามารถอธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์เอ็กซ์โปเนนเชียลได้ดีกว่าสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การสกัดซัลฟิติกที่สกัดจากเถาเถาของมืองค์ประกอบหลัก คือ ซัลฟิโคนออกไซด์ และเมื่อตัดแปลงโดยการเติมคอปเปอร์ไนเตรตโดยวิธีการตกตะกอนร่วม แล้วองค์ประกอบในซัลฟิติกมีปริมาณของคอปเปอร์เพิ่มขึ้น ตามน้ำหนักของคอปเปอร์ที่เติม
2. การดูดซับสารละลายของโคเรดด้วยตัวดูดซับซัลฟิติกที่สกัดจากเถาเถา และซัลฟิติกที่ผ่านการปรับปรุงเข้าสู่สมมูลการดูดซับที่เวลา 90 นาที และสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือนได้ดีกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 1
3. สมมูลการดูดซับสารละลายของโคเรดด้วยตัวดูดซับซัลฟิติกที่สกัดจากเถาเถา และซัลฟิติกที่ผ่านการปรับปรุงสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมมูลดูดซับของซิปส์ได้ดีกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช
4. ปริมาณคอปเปอร์ที่เจือปนในตัวดูดซับซัลฟิติกที่มากกว่า 0.855 % โดยมวล ไม่ส่งผลต่อสมบัติการดูดซับสารละลายของโคเรดของตัวดูดซับซัลฟิติก
5. พารามิเตอร์ตามแบบจำลองสมมูลดูดซับของซิปส์ แปรผันตามปริมาณของคอปเปอร์ที่เจือปนอยู่ในตัวดูดซับซัลฟิติกในช่วงน้ำหนักของคอปเปอร์ 0.112 - 0.855 % โดยมวล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสารละลายของโกรดด้วยตัวดูดซับซิลิกาในระบบแบบกะ ซึ่งยังไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ในอุตสาหกรรม จึงควรมีการพัฒนาเป็นระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมในการประยุกต์กับอุตสาหกรรม

2. งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษากระบวนการล้างและการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับซิลิกา ดังนั้นจึงควรมีการศึกษากระบวนการล้างและการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ เพื่อเป็นการลดต้นทุน หากนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

3. ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะสูงสุดของตัวดูดซับซิลิกายังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น จึงควรศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติการดูดซับของตัวดูดซับซิลิกา เพื่อให้ได้ปริมาณดูดซับจำเพาะที่สูงขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] พัชรียา ฉัตรเท, (2540). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อม. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 46 ฉบับที่ 44
- [2] กรมวิชาการเกษตร [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.doa.go.th> [2553, มีนาคม 30]
- [3] R. V. Krishnarao, J. Subrahmanyam and T.J. Kumar, **Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash**, J. Euro. Ceram. Soc., Vol.21, 2001, p.99-104
- [4] J. James, M.S. Rao (1986), Am. Ceram. Soc. Bull. Vol. 65, 1177.
- [5] F. Adam, The preparation and Adsorption Studies on Silica from Rice Husk Ash, MS thesis, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, 1991.
- [6] พิณเทพ เศรษฐโกภิน, พุทธชาติ จันทร์เมือง, พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และสุธาสิณี เนรมิตตคพงศ์. **การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถาขานอ้อย**, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ฉบับที่ 1, 2553: 43-48
- [7] แกลบข้าว [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/> [2553, เมษายน 4]
- [8] F. Ciesielczyk, A. Krysztafkiewicz and T. Jesionowsk. (2007). **Magnesium silicates – adsorbents of organic compounds**, Applied Surface Science, vol. 253 (20), p.8435-8442
- [9] Mohammad F. Ali, Bassam M. El Ali, James G. Speight.(2005). Handbook of Industry Chemistry Organic Chemicals., McGraw Hill.
- [10] จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, (2547). **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์**, กรุงเทพฯ ฯ, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [11] Frank L. Slejko, (1985). Adsorption Technology: A Step-by-Step Approach to process Evaluation and Applications, New York: Marcel Dekker.
- [12] Charles, N., Satterfield, (1991). Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2<sup>nd</sup> ed., New York: McGraw Hill Book Company, pp. 31-50.
- [13] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ, (2547). **ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี**, กรุงเทพฯ ฯ, สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),
- [14] Vasanth Kumer., Subanandam , Ramamurthi. and Sivanesan .2004. Solid Liquid Adsorption for Wastewater Treatment (Online). : <http://www.eco-web.com/cgi-local/index.html>



- [15] กรมวิทยาศาสตร์บริการ, การศึกษาเรื่องการทำคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการ  
กระตุ้นด้วยไอน้ำ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, 2523: 65-  
73.
- [16] มานัด แก้วถาวร, ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการ  
ผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537.
- [17] ศักดิ์จิตรา ต้นสมบุร์ ลัดดา ยาวีร์ชน และ ชลธา ไกรวัตนุสรณ์, การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จาก  
ขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538: 15-18.
- [18] Christie J. Geankoplis., Transport Process and Separation Process Principles 4<sup>th</sup>. Prentice  
Hall, 2003
- [19] <http://www2.diw.go.th/KM/pdf%5Cknow%5Cgas.pdf>
- [20] Oscik, J., Adsorption. New York, John Wiley & Sons, pp. 157-193.
- [21] Noll, K.E., Gounaroius, and V. and Hou, W., 1992, Adsorption Technology for Air and  
Water Pollution Control. Michigan, Lewis, pp. 199-216
- [22] จีรพา วงศ์สิงหรา และ ภัทธาภรณ์ หลักทอง, การศึกษาการดูดซับสิ่งเจือปนในน้ำมันไปโอ  
ดีเซล, วิทยานิพนธ์ ปริญญาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550: 16
- [23] Shaobin Wang, and Z.H. Zhu., Effect of acidic treatment of activated carbons on dye  
adsorption. Dyes and Pigments 75, 2007, 306-314
- [24] D.W. Green, and R.H. Perry, Perry's Chemical Engineers' Handbook. Chapter 16,  
McGraw Hill, 8<sup>th</sup> edition, 2008.
- [25] อุบลรัตน์ รัตนศักดิ์, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าแกลบในงานคอนกรีต. สำนักพิมพ์ไซค์  
แอนด์เอ็นจิเนียริง, 2552
- [26] Kalapathy, U., Proctor, A., and Shultz, J., (2000), A simple method for production of  
pure silica from rice hull ash. Bioresource Technology 73, 257 - 262
- [27] Kalapathy, U., Proctor, A., and Shultz, J., (2008), An improve method for production of  
silica from rice hull ash. Bioresource Technology 85, 285 - 289
- [28] สันติ รัตนวีรนนท์, เจือไนท์ที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547

- [29] Farook Adam, and Joo-Hann Chua, (2004). The adsorption of palmytic acid on rice husk ash chemically modified with Al(III) ion using the sol-gel technique. *Journal of Colloid and Interface Science* 280, 55-61
- [30] Namasivayam, C., and Kavitha, D., (2002), Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste. *Dyes and Pigments* 54, 47 - 58
- [31] Lili Lian, Liping Guo, and Chunjing Guo, (2009). Adsorption of Congo red from aqueous solutions onto Ca-bentonite. *Journal of Hazardous Materials* 161, 126-131
- [32] Sudipa Chatterjee, Dae S. Lee, Min W. Lee, and Seung H. Woo, (2009). Congo red adsorption from aqueous solution by using chitosan hydrogel beads impregnated with nonionic and anionic surfactant. *Bioresource Technology* 100, 3862-3868
- [33] Shao-Xiang Teng, and others (2009). Interaction between Congo red and copper in a binary adsorption system: Spectroscopic and kinetic studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 340, 86-92
- [34] Flavio A. Pavan, Silvio L.P. Dias, Eder C. Lima, and Edilson V. Benvenutti, (2006). Removal of Congo red from aqueous solution by anilinepropylsilica xerogel. *Dyes and Pigments* 76, 64-69
- [35] I.D. Mall, V.C. srivastava, N.K. Agarwal, and I.M. Mishra, (2005). Removal of Congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon. *Chemosphere* 61, 492-501.
- [36] S. Chatterjee, S. Chatterjee, B.P. Chatterjee, and A.K. Guha, (2007). Adsorptive removal of Congo red, a carcinogenic textile dye by chitosan hydrobeads: binding mechanism, equilibrium and kinetics. *Colloids Surf. A* 299, 146-152.
- [37] A. Tor, and Y. Cengeloglu, (2006). Removal of Congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud. *J. Hazard. Mater.* 138, 409-415.
- [38] A.M. Donia, A.A. Atia, W.A. Al-amrani, and A.M. El-Nahas, (2009). Effect of structural properties of acid dyes on their adsorption behavior fro, aqueous solutions by amine modified silica. *J. Hazard. Mater.* 161, 1544-1550.



ภาคผนวก

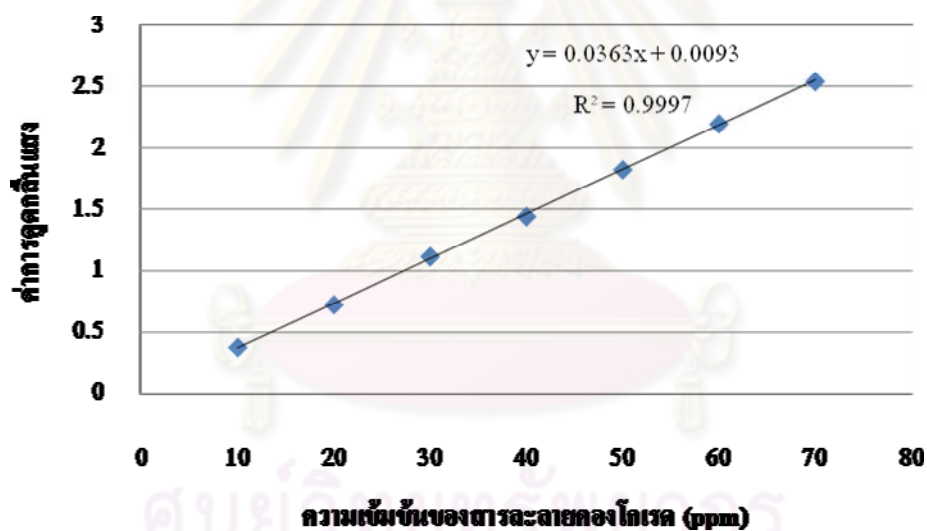
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ตาราง ก. 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานคองโกเรด

| ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรด<br>(ppm) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|---|------------------|
| 10                                      | 0.376            |
| 20                                      | 0.726            |
| 30                                      | 1.117            |
| 40                                      | 1.443            |
| 50                                      | 1.825            |
| 60                                      | 2.202            |
| 70                                      | 2.546            |

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดและค่าการดูดกลืนแสงได้ผลเป็นดังรูปที่ ก. 1



รูปที่ ก. 1 กราฟมาตรฐานของสารละลายคองโกเรด

ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.743            |
| 15              | 0.690            |
| 30              | 0.679            |
| 45              | 0.674            |
| 60              | 0.672            |
| 75              | 0.669            |
| 90              | 0.670            |
| 105             | 0.671            |
| 120             | 0.670            |
| 150             | 0.671            |
| 180             | 0.669            |
| 210             | 0.669            |
| 240             | 0.668            |

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.103            |
| 15              | 1.012            |
| 30              | 0.999            |
| 45              | 0.994            |
| 60              | 0.990            |
| 75              | 0.989            |
| 90              | 0.987            |
| 105             | 0.991            |
| 120             | 0.988            |
| 150             | 0.987            |
| 180             | 0.987            |
| 210             | 0.988            |
| 240             | 0.989            |

ตารางที่ ก. 4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.835            |
| 15              | 1.634            |
| 30              | 1.612            |
| 45              | 1.605            |
| 60              | 1.600            |
| 75              | 1.596            |
| 90              | 1.595            |
| 105             | 1.594            |
| 120             | 1.595            |
| 150             | 1.595            |
| 180             | 1.594            |
| 210             | 1.594            |
| 240             | 1.595            |

ตารางที่ ก. 5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.835             |
| 15              | 1.634             |
| 30              | 1.612             |
| 45              | 1.605             |
| 60              | 1.600             |
| 75              | 1.596             |
| 90              | 1.595             |
| 105             | 1.594             |
| 120             | 1.595             |
| 150             | 1.595             |
| 180             | 1.594             |
| 210             | 1.594             |
| 240             | 1.595             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 2 เท่า

ตารางที่ ก. 6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.832             |
| 15              | 1.745             |
| 30              | 1.733             |
| 45              | 1.715             |
| 60              | 1.710             |
| 75              | 1.709             |
| 90              | 1.711             |
| 105             | 1.708             |
| 120             | 1.707             |
| 150             | 1.706             |
| 180             | 1.709             |
| 210             | 1.706             |
| 240             | 1.710             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 3 เท่า

ตารางที่ ก. 7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.471             |
| 15              | 1.442             |
| 30              | 1.420             |
| 45              | 1.409             |
| 60              | 1.405             |
| 75              | 1.402             |
| 90              | 1.400             |
| 105             | 1.401             |
| 120             | 1.400             |
| 150             | 1.401             |
| 180             | 1.398             |
| 210             | 1.399             |
| 240             | 1.398             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 2.180             |
| 15              | 2.123             |
| 30              | 2.112             |
| 45              | 2.111             |
| 60              | 2.105             |
| 75              | 2.103             |
| 90              | 2.103             |
| 105             | 2.100             |
| 120             | 2.101             |
| 150             | 2.100             |
| 180             | 2.102             |
| 210             | 2.099             |
| 240             | 2.100             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 9 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.841             |
| 15              | 1.829             |
| 30              | 1.818             |
| 45              | 1.813             |
| 60              | 1.807             |
| 75              | 1.803             |
| 90              | 1.803             |
| 105             | 1.802             |
| 120             | 1.802             |
| 150             | 1.801             |
| 180             | 1.802             |
| 210             | 1.802             |
| 240             | 1.801             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า



ก. 3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออน 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก. 10 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออนในอัตรา 0.159 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.721            |
| 15              | 0.636            |
| 30              | 0.625            |
| 45              | 0.620            |
| 60              | 0.616            |
| 75              | 0.614            |
| 90              | 0.612            |
| 105             | 0.611            |
| 120             | 0.610            |
| 150             | 0.611            |
| 180             | 0.611            |
| 210             | 0.610            |
| 240             | 0.610            |

ตารางที่ ก. 11 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออนในอัตรา 0.159 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.817            |
| 15              | 1.562            |
| 30              | 1.546            |
| 45              | 1.535            |
| 60              | 1.531            |
| 75              | 1.529            |
| 90              | 1.527            |
| 105             | 1.525            |
| 120             | 1.526            |
| 150             | 1.527            |
| 180             | 1.525            |
| 210             | 1.526            |
| 240             | 1.527            |

ตารางที่ ก. 12 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.159 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.455             |
| 15              | 1.376             |
| 30              | 1.365             |
| 45              | 1.354             |
| 60              | 1.346             |
| 75              | 1.343             |
| 90              | 1.342             |
| 105             | 1.339             |
| 120             | 1.341             |
| 150             | 1.340             |
| 180             | 1.340             |
| 210             | 1.339             |
| 240             | 1.340             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 13 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.159 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.807             |
| 15              | 1.773             |
| 30              | 1.767             |
| 45              | 1.758             |
| 60              | 1.752             |
| 75              | 1.748             |
| 90              | 1.747             |
| 105             | 1.743             |
| 120             | 1.744             |
| 150             | 1.743             |
| 180             | 1.744             |
| 210             | 1.742             |
| 240             | 1.744             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า

ก. 4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออน 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก. 14 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออนในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.732            |
| 15              | 0.645            |
| 30              | 0.637            |
| 45              | 0.633            |
| 60              | 0.628            |
| 75              | 0.623            |
| 90              | 0.620            |
| 105             | 0.621            |
| 120             | 0.622            |
| 150             | 0.619            |
| 180             | 0.621            |
| 210             | 0.620            |
| 240             | 0.620            |

ตารางที่ ก. 15 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออนในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.087            |
| 15              | 0.961            |
| 30              | 0.947            |
| 45              | 0.939            |
| 60              | 0.933            |
| 75              | 0.926            |
| 90              | 0.920            |
| 105             | 0.919            |
| 120             | 0.921            |
| 150             | 0.920            |
| 180             | 0.920            |
| 210             | 0.918            |
| 240             | 0.920            |

ตารางที่ ก. 16 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.793            |
| 15              | 1.560            |
| 30              | 1.556            |
| 45              | 1.542            |
| 60              | 1.526            |
| 75              | 1.519            |
| 90              | 1.508            |
| 105             | 1.507            |
| 120             | 1.507            |
| 150             | 1.505            |
| 180             | 1.508            |
| 210             | 1.503            |
| 240             | 1.506            |

ตารางที่ ก. 17 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.793             |
| 15              | 1.596             |
| 30              | 1.580             |
| 45              | 1.570             |
| 60              | 1.565             |
| 75              | 1.554             |
| 90              | 1.537             |
| 105             | 1.534             |
| 120             | 1.533             |
| 150             | 1.534             |
| 180             | 1.534             |
| 210             | 1.535             |
| 240             | 1.534             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 2 เท่า

ตารางที่ ก. 18 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.809             |
| 15              | 1.662             |
| 30              | 1.645             |
| 45              | 1.632             |
| 60              | 1.616             |
| 75              | 1.607             |
| 90              | 1.600             |
| 105             | 1.598             |
| 120             | 1.601             |
| 150             | 1.600             |
| 180             | 1.596             |
| 210             | 1.602             |
| 240             | 1.600             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 3 เท่า

ตารางที่ ก. 19 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.458             |
| 15              | 1.383             |
| 30              | 1.366             |
| 45              | 1.358             |
| 60              | 1.340             |
| 75              | 1.333             |
| 90              | 1.328             |
| 105             | 1.329             |
| 120             | 1.329             |
| 150             | 1.328             |
| 180             | 1.327             |
| 210             | 1.330             |
| 240             | 1.329             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 20 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 2.163             |
| 15              | 2.044             |
| 30              | 2.012             |
| 45              | 2.004             |
| 60              | 1.994             |
| 75              | 1.991             |
| 90              | 1.990             |
| 105             | 1.992             |
| 120             | 1.991             |
| 150             | 1.989             |
| 180             | 1.991             |
| 210             | 1.991             |
| 240             | 1.991             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 21 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.821             |
| 15              | 1.754             |
| 30              | 1.752             |
| 45              | 1.747             |
| 60              | 1.742             |
| 75              | 1.741             |
| 90              | 1.739             |
| 105             | 1.739             |
| 120             | 1.736             |
| 150             | 1.738             |
| 180             | 1.736             |
| 210             | 1.735             |
| 240             | 1.735             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า

ก. 5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก. 22 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.751            |
| 15              | 0.638            |
| 30              | 0.634            |
| 45              | 0.627            |
| 60              | 0.622            |
| 75              | 0.621            |
| 90              | 0.619            |
| 105             | 0.618            |
| 120             | 0.620            |
| 150             | 0.618            |
| 180             | 0.617            |
| 210             | 0.619            |
| 240             | 0.618            |

ตารางที่ ก. 23 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.807            |
| 15              | 1.521            |
| 30              | 1.510            |
| 45              | 1.506            |
| 60              | 1.491            |
| 75              | 1.488            |
| 90              | 1.485            |
| 105             | 1.484            |
| 120             | 1.483            |
| 150             | 1.482            |
| 180             | 1.484            |
| 210             | 1.484            |
| 240             | 1.483            |

ตารางที่ ก. 24 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.452             |
| 15              | 1.370             |
| 30              | 1.345             |
| 45              | 1.334             |
| 60              | 1.325             |
| 75              | 1.318             |
| 90              | 1.311             |
| 105             | 1.304             |
| 120             | 1.303             |
| 150             | 1.303             |
| 180             | 1.302             |
| 210             | 1.303             |
| 240             | 1.301             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 25 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.821             |
| 15              | 1.767             |
| 30              | 1.752             |
| 45              | 1.741             |
| 60              | 1.735             |
| 75              | 1.732             |
| 90              | 1.729             |
| 105             | 1.730             |
| 120             | 1.728             |
| 150             | 1.727             |
| 180             | 1.726             |
| 210             | 1.727             |
| 240             | 1.727             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า



ก. 6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก. 26 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.742            |
| 15              | 0.633            |
| 30              | 0.607            |
| 45              | 0.589            |
| 60              | 0.589            |
| 75              | 0.591            |
| 90              | 0.591            |
| 105             | 0.591            |
| 120             | 0.591            |
| 150             | 0.592            |
| 180             | 0.592            |
| 210             | 0.589            |
| 240             | 0.590            |

ตารางที่ ก. 27 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.123            |
| 15              | 0.952            |
| 30              | 0.930            |
| 45              | 0.917            |
| 60              | 0.910            |
| 75              | 0.899            |
| 90              | 0.898            |
| 105             | 0.902            |
| 120             | 0.902            |
| 150             | 0.901            |
| 180             | 0.900            |
| 210             | 0.898            |
| 240             | 0.899            |

ตารางที่ ก. 28 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.856            |
| 15              | 1.555            |
| 30              | 1.514            |
| 45              | 1.510            |
| 60              | 1.501            |
| 75              | 1.492            |
| 90              | 1.491            |
| 105             | 1.490            |
| 120             | 1.492            |
| 150             | 1.489            |
| 180             | 1.492            |
| 210             | 1.492            |
| 240             | 1.493            |

ตารางที่ ก. 29 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.825             |
| 15              | 1.624             |
| 30              | 1.585             |
| 45              | 1.546             |
| 60              | 1.539             |
| 75              | 1.517             |
| 90              | 1.528             |
| 105             | 1.527             |
| 120             | 1.514             |
| 150             | 1.520             |
| 180             | 1.526             |
| 210             | 1.515             |
| 240             | 1.516             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 2 เท่า

ตารางที่ ก. 30 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.822             |
| 15              | 1.631             |
| 30              | 1.598             |
| 45              | 1.559             |
| 60              | 1.533             |
| 75              | 1.525             |
| 90              | 1.526             |
| 105             | 1.519             |
| 120             | 1.515             |
| 150             | 1.526             |
| 180             | 1.522             |
| 210             | 1.518             |
| 240             | 1.515             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 3 เท่า

ตารางที่ ก. 31 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.464             |
| 15              | 1.396             |
| 30              | 1.362             |
| 45              | 1.330             |
| 60              | 1.306             |
| 75              | 1.312             |
| 90              | 1.295             |
| 105             | 1.301             |
| 120             | 1.294             |
| 150             | 1.290             |
| 180             | 1.293             |
| 210             | 1.282             |
| 240             | 1.288             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 32 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 2.149             |
| 15              | 1.987             |
| 30              | 1.957             |
| 45              | 1.936             |
| 60              | 1.901             |
| 75              | 1.897             |
| 90              | 1.897             |
| 105             | 1.896             |
| 120             | 1.898             |
| 150             | 1.898             |
| 180             | 1.899             |
| 210             | 1.898             |
| 240             | 1.898             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 33 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.830             |
| 15              | 1.768             |
| 30              | 1.741             |
| 45              | 1.729             |
| 60              | 1.713             |
| 75              | 1.703             |
| 90              | 1.702             |
| 105             | 1.700             |
| 120             | 1.700             |
| 150             | 1.698             |
| 180             | 1.701             |
| 210             | 1.699             |
| 240             | 1.700             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า

ก. 7 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ก. 34 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 0.754            |
| 15              | 0.633            |
| 30              | 0.623            |
| 45              | 0.610            |
| 60              | 0.604            |
| 75              | 0.600            |
| 90              | 0.595            |
| 105             | 0.596            |
| 120             | 0.595            |
| 150             | 0.594            |
| 180             | 0.593            |
| 210             | 0.595            |
| 240             | 0.595            |

ตารางที่ ก. 35 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.115            |
| 15              | 0.947            |
| 30              | 0.929            |
| 45              | 0.908            |
| 60              | 0.902            |
| 75              | 0.899            |
| 90              | 0.891            |
| 105             | 0.890            |
| 120             | 0.891            |
| 150             | 0.890            |
| 180             | 0.888            |
| 210             | 0.887            |
| 240             | 0.889            |

ตารางที่ ก. 36 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-----------------|------------------|
| 0               | 1.827            |
| 15              | 1.537            |
| 30              | 1.505            |
| 45              | 1.487            |
| 60              | 1.482            |
| 75              | 1.469            |
| 90              | 1.462            |
| 105             | 1.463            |
| 120             | 1.461            |
| 150             | 1.459            |
| 180             | 1.460            |
| 210             | 1.461            |
| 240             | 1.461            |

ตารางที่ ก. 37 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.853             |
| 15              | 1.621             |
| 30              | 1.587             |
| 45              | 1.565             |
| 60              | 1.551             |
| 75              | 1.540             |
| 90              | 1.531             |
| 105             | 1.530             |
| 120             | 1.531             |
| 150             | 1.529             |
| 180             | 1.530             |
| 210             | 1.530             |
| 240             | 1.528             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 2 เท่า

ตารางที่ ก. 38 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.873             |
| 15              | 1.708             |
| 30              | 1.642             |
| 45              | 1.619             |
| 60              | 1.595             |
| 75              | 1.584             |
| 90              | 1.574             |
| 105             | 1.574             |
| 120             | 1.571             |
| 150             | 1.573             |
| 180             | 1.573             |
| 210             | 1.573             |
| 240             | 1.572             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 3 เท่า

ตารางที่ ก. 39 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.463             |
| 15              | 1.378             |
| 30              | 1.323             |
| 45              | 1.308             |
| 60              | 1.295             |
| 75              | 1.287             |
| 90              | 1.281             |
| 105             | 1.281             |
| 120             | 1.281             |
| 150             | 1.280             |
| 180             | 1.281             |
| 210             | 1.280             |
| 240             | 1.280             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 40 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 2.153             |
| 15              | 2.011             |
| 30              | 1.987             |
| 45              | 1.948             |
| 60              | 1.928             |
| 75              | 1.916             |
| 90              | 1.909             |
| 105             | 1.910             |
| 120             | 1.908             |
| 150             | 1.910             |
| 180             | 1.909             |
| 210             | 1.907             |
| 240             | 1.911             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 5 เท่า

ตารางที่ ก. 41 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับที่สกัดจากเห็ดกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง* |
|-----------------|-------------------|
| 0               | 1.837             |
| 15              | 1.793             |
| 30              | 1.770             |
| 45              | 1.745             |
| 60              | 1.720             |
| 75              | 1.716             |
| 90              | 1.712             |
| 105             | 1.710             |
| 120             | 1.710             |
| 150             | 1.709             |
| 180             | 1.711             |
| 210             | 1.709             |
| 240             | 1.710             |

หมายเหตุค่าการดูดกลืนแสงวัดจากสารละลายที่เจือจาง 10 เท่า



## ภาคผนวก ข

ข.1 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากเถ้า  
แกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 20.21                        | 0.0000                    |
| 15              | 18.75                        | 0.1460                    |
| 30              | 18.45                        | 0.1763                    |
| 45              | 18.31                        | 0.1901                    |
| 60              | 18.26                        | 0.1956                    |
| 75              | 18.17                        | 0.2039                    |
| 90              | 18.20                        | 0.2011                    |
| 105             | 18.23                        | 0.1983                    |
| 120             | 18.20                        | 0.2011                    |
| 150             | 18.23                        | 0.1983                    |
| 180             | 18.17                        | 0.2039                    |
| 210             | 18.17                        | 0.2039                    |
| 240             | 18.15                        | 0.2066                    |

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 30.13                        | 0.0000                    |
| 15              | 27.62                        | 0.2507                    |
| 30              | 27.26                        | 0.2865                    |
| 45              | 27.13                        | 0.3003                    |
| 60              | 27.02                        | 0.3113                    |
| 75              | 26.99                        | 0.3140                    |
| 90              | 26.93                        | 0.3196                    |
| 105             | 27.04                        | 0.3085                    |
| 120             | 26.96                        | 0.3168                    |
| 150             | 26.93                        | 0.3196                    |
| 180             | 26.93                        | 0.3196                    |
| 210             | 26.96                        | 0.3168                    |
| 240             | 26.99                        | 0.3140                    |

ตารางที่ ข. 3 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 50.29                        | 0.0000                    |
| 15              | 44.76                        | 0.5537                    |
| 30              | 44.15                        | 0.6143                    |
| 45              | 43.96                        | 0.6336                    |
| 60              | 43.82                        | 0.6474                    |
| 75              | 43.71                        | 0.6584                    |
| 90              | 43.68                        | 0.6612                    |
| 105             | 43.66                        | 0.6639                    |
| 120             | 43.68                        | 0.6612                    |
| 150             | 43.68                        | 0.6612                    |
| 180             | 43.66                        | 0.6639                    |
| 210             | 43.66                        | 0.6639                    |
| 240             | 43.68                        | 0.6612                    |

ตารางที่ ข. 4 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 49.55   | 99.10                        | 0.0000                    |
| 15              | 47.35   | 94.69                        | 0.4408                    |
| 30              | 46.66   | 93.32                        | 0.5785                    |
| 45              | 46.16   | 92.33                        | 0.6777                    |
| 60              | 45.83   | 91.66                        | 0.7438                    |
| 75              | 45.61   | 91.22                        | 0.7879                    |
| 90              | 45.56   | 91.11                        | 0.7989                    |
| 105             | 45.53   | 91.06                        | 0.8044                    |
| 120             | 45.56   | 91.11                        | 0.7989                    |
| 150             | 45.56   | 91.11                        | 0.7989                    |
| 180             | 45.53   | 91.06                        | 0.8044                    |
| 210             | 45.50   | 91.00                        | 0.8099                    |
| 240             | 45.53   | 91.06                        | 0.8044                    |

ตารางที่ ข. 5 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 50.21   | 150.64                       | 0.0000                    |
| 15             | 47.82   | 143.45                       | 0.7190                    |
| 30             | 47.48   | 142.45                       | 0.8182                    |
| 45             | 46.99   | 140.97                       | 0.9669                    |
| 60             | 46.85   | 140.55                       | 1.0083                    |
| 75             | 46.82   | 140.47                       | 1.0165                    |
| 90             | 46.88   | 140.64                       | 1.0000                    |
| 105            | 46.80   | 140.39                       | 1.0248                    |
| 120            | 46.77   | 140.31                       | 1.0331                    |
| 150            | 46.74   | 140.22                       | 1.0413                    |
| 180            | 46.82   | 140.47                       | 1.0165                    |
| 210            | 46.74   | 140.22                       | 1.0413                    |
| 240            | 46.85   | 140.55                       | 1.0083                    |

ตารางที่ ข. 6 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 40.27   | 201.34                       | 0.0000                    |
| 15             | 39.47   | 197.34                       | 0.3994                    |
| 30             | 38.86   | 194.31                       | 0.7025                    |
| 45             | 38.56   | 192.80                       | 0.8540                    |
| 60             | 38.45   | 192.25                       | 0.9091                    |
| 75             | 38.37   | 191.83                       | 0.9504                    |
| 90             | 38.31   | 191.56                       | 0.9780                    |
| 105            | 38.34   | 191.69                       | 0.9642                    |
| 120            | 38.31   | 191.56                       | 0.9780                    |
| 150            | 38.34   | 191.69                       | 0.9642                    |
| 180            | 38.26   | 191.28                       | 1.0055                    |
| 210            | 38.28   | 191.42                       | 0.9917                    |
| 240            | 38.26   | 191.28                       | 1.0055                    |

ตารางที่ ข. 7 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 59.80   | 298.99                       | 0.0000                    |
| 15             | 58.23   | 291.14                       | 0.7851                    |
| 30             | 57.93   | 289.63                       | 0.9366                    |
| 45             | 57.90   | 289.49                       | 0.9504                    |
| 60             | 57.73   | 288.66                       | 1.0331                    |
| 75             | 57.68   | 288.39                       | 1.0606                    |
| 90             | 57.68   | 288.39                       | 1.0606                    |
| 105            | 57.60   | 287.98                       | 1.1019                    |
| 120            | 57.62   | 288.11                       | 1.0882                    |
| 150            | 57.60   | 287.98                       | 1.1019                    |
| 180            | 57.65   | 288.25                       | 1.0744                    |
| 210            | 57.57   | 287.84                       | 1.1157                    |
| 240            | 57.60   | 287.98                       | 1.1019                    |

ตารางที่ ข. 8 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 50.46   | 504.60                       | 0.0000                    |
| 15             | 50.13   | 501.29                       | 0.3306                    |
| 30             | 49.83   | 498.26                       | 0.6336                    |
| 45             | 49.69   | 496.89                       | 0.7713                    |
| 60             | 49.52   | 495.23                       | 0.9366                    |
| 75             | 49.41   | 494.13                       | 1.0468                    |
| 90             | 49.41   | 494.13                       | 1.0468                    |
| 105            | 49.39   | 493.86                       | 1.0744                    |
| 120            | 49.39   | 493.86                       | 1.0744                    |
| 150            | 49.36   | 493.58                       | 1.1019                    |
| 180            | 49.39   | 493.86                       | 1.0744                    |
| 210            | 49.39   | 493.86                       | 1.0744                    |
| 240            | 49.36   | 493.58                       | 1.1019                    |

ข.2 ความเข้มข้นของสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลือที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไอออน 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข.9 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 19.61                        | 0.0000                    |
| 15             | 17.26                        | 0.2342                    |
| 30             | 16.96                        | 0.2645                    |
| 45             | 16.82                        | 0.2782                    |
| 60             | 16.71                        | 0.2893                    |
| 75             | 16.66                        | 0.2948                    |
| 90             | 16.60                        | 0.3003                    |
| 105            | 16.58                        | 0.3030                    |
| 120            | 16.55                        | 0.3058                    |
| 150            | 16.58                        | 0.3030                    |
| 180            | 16.58                        | 0.3030                    |
| 210            | 16.55                        | 0.3058                    |
| 240            | 16.55                        | 0.3058                    |

ตารางที่ ข.10 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 49.80                        | 0.0000                    |
| 15             | 42.77                        | 0.7025                    |
| 30             | 42.33                        | 0.7466                    |
| 45             | 42.03                        | 0.7769                    |
| 60             | 41.92                        | 0.7879                    |
| 75             | 41.87                        | 0.7934                    |
| 90             | 41.81                        | 0.7989                    |
| 105            | 41.75                        | 0.8044                    |
| 120            | 41.78                        | 0.8017                    |
| 150            | 41.81                        | 0.7989                    |
| 180            | 41.75                        | 0.8044                    |
| 210            | 41.78                        | 0.8017                    |
| 240            | 41.81                        | 0.7989                    |

ตารางที่ ข. 11 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 39.83   | 199.13                       | 0.0000                    |
| 15             | 37.65   | 188.25                       | 1.0882                    |
| 30             | 37.35   | 186.74                       | 1.2397                    |
| 45             | 37.04   | 185.22                       | 1.3912                    |
| 60             | 36.82   | 184.12                       | 1.5014                    |
| 75             | 36.74   | 183.71                       | 1.5427                    |
| 90             | 36.71   | 183.57                       | 1.5565                    |
| 105            | 36.63   | 183.15                       | 1.5978                    |
| 120            | 36.69   | 183.43                       | 1.5702                    |
| 150            | 36.66   | 183.29                       | 1.5840                    |
| 180            | 36.66   | 183.29                       | 1.5840                    |
| 210            | 36.63   | 183.15                       | 1.5978                    |
| 240            | 36.66   | 183.29                       | 1.5840                    |

ตารางที่ ข. 12 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.159 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 49.52   | 495.23                       | 0.0000                    |
| 15             | 48.59   | 485.87                       | 0.9366                    |
| 30             | 48.42   | 484.21                       | 1.1019                    |
| 45             | 48.17   | 481.74                       | 1.3499                    |
| 60             | 48.01   | 480.08                       | 1.5152                    |
| 75             | 47.90   | 478.98                       | 1.6253                    |
| 90             | 47.87   | 478.71                       | 1.6529                    |
| 105            | 47.76   | 477.60                       | 1.7631                    |
| 120            | 47.79   | 477.88                       | 1.7355                    |
| 150            | 47.76   | 477.60                       | 1.7631                    |
| 180            | 47.79   | 477.88                       | 1.7355                    |
| 210            | 47.73   | 477.33                       | 1.7906                    |
| 240            | 47.79   | 477.88                       | 1.7355                    |

ข. 3 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจาก  
แกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข. 13 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 19.91                        | 0.0000                    |
| 15             | 17.51                        | 0.2397                    |
| 30             | 17.29                        | 0.2617                    |
| 45             | 17.18                        | 0.2727                    |
| 60             | 17.04                        | 0.2865                    |
| 75             | 16.91                        | 0.3003                    |
| 90             | 16.82                        | 0.3085                    |
| 105            | 16.85                        | 0.3058                    |
| 120            | 16.88                        | 0.3030                    |
| 150            | 16.80                        | 0.3113                    |
| 180            | 16.85                        | 0.3058                    |
| 210            | 16.82                        | 0.3085                    |
| 240            | 16.82                        | 0.3085                    |

ตารางที่ ข. 14 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 29.69                        | 0.0000                    |
| 15             | 26.22                        | 0.3471                    |
| 30             | 25.83                        | 0.3857                    |
| 45             | 25.61                        | 0.4077                    |
| 60             | 25.45                        | 0.4242                    |
| 75             | 25.25                        | 0.4435                    |
| 90             | 25.09                        | 0.4601                    |
| 105            | 25.06                        | 0.4628                    |
| 120            | 25.12                        | 0.4573                    |
| 150            | 25.09                        | 0.4601                    |
| 180            | 25.09                        | 0.4601                    |
| 210            | 25.03                        | 0.4656                    |
| 240            | 25.09                        | 0.4601                    |

ตารางที่ ข. 15 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 49.14                        | 0.0000                    |
| 15              | 42.72                        | 0.6419                    |
| 30              | 42.61                        | 0.6529                    |
| 45              | 42.22                        | 0.6915                    |
| 60              | 41.78                        | 0.7355                    |
| 75              | 41.59                        | 0.7548                    |
| 90              | 41.29                        | 0.7851                    |
| 105             | 41.26                        | 0.7879                    |
| 120             | 41.26                        | 0.7879                    |
| 150             | 41.20                        | 0.7934                    |
| 180             | 41.29                        | 0.7851                    |
| 210             | 41.15                        | 0.7989                    |
| 240             | 41.23                        | 0.7906                    |

ตารางที่ ข. 16 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 49.14   | 98.28                        | 0.0000                    |
| 15              | 43.71   | 87.42                        | 1.0854                    |
| 30              | 43.27   | 86.54                        | 1.1736                    |
| 45              | 42.99   | 85.99                        | 1.2287                    |
| 60              | 42.86   | 85.71                        | 1.2562                    |
| 75              | 42.55   | 85.11                        | 1.3168                    |
| 90              | 42.09   | 84.17                        | 1.4105                    |
| 105             | 42.00   | 84.01                        | 1.4270                    |
| 120             | 41.98   | 83.95                        | 1.4325                    |
| 150             | 42.00   | 84.01                        | 1.4270                    |
| 180             | 42.00   | 84.01                        | 1.4270                    |
| 210             | 42.03   | 84.06                        | 1.4215                    |
| 240             | 42.00   | 84.01                        | 1.4270                    |



ตารางที่ ข. 17 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 49.58   | 148.74                       | 0.0000                    |
| 15             | 45.53   | 136.59                       | 1.2149                    |
| 30             | 45.06   | 135.18                       | 1.3554                    |
| 45             | 44.70   | 134.11                       | 1.4628                    |
| 60             | 44.26   | 132.79                       | 1.5950                    |
| 75             | 44.01   | 132.04                       | 1.6694                    |
| 90             | 43.82   | 131.46                       | 1.7273                    |
| 105            | 43.77   | 131.30                       | 1.7438                    |
| 120            | 43.85   | 131.55                       | 1.7190                    |
| 150            | 43.82   | 131.46                       | 1.7273                    |
| 180            | 43.71   | 131.13                       | 1.7603                    |
| 210            | 43.88   | 131.63                       | 1.7107                    |
| 240            | 43.82   | 131.46                       | 1.7273                    |

ตารางที่ ข. 18 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 39.91   | 199.55                       | 0.0000                    |
| 15             | 37.84   | 189.21                       | 1.0331                    |
| 30             | 37.37   | 186.87                       | 1.2672                    |
| 45             | 37.15   | 185.77                       | 1.3774                    |
| 60             | 36.66   | 183.29                       | 1.6253                    |
| 75             | 36.47   | 182.33                       | 1.7218                    |
| 90             | 36.33   | 181.64                       | 1.7906                    |
| 105            | 36.36   | 181.78                       | 1.7769                    |
| 120            | 36.36   | 181.78                       | 1.7769                    |
| 150            | 36.33   | 181.64                       | 1.7906                    |
| 180            | 36.30   | 181.50                       | 1.8044                    |
| 210            | 36.38   | 181.91                       | 1.7631                    |
| 240            | 36.36   | 181.78                       | 1.7769                    |

ตารางที่ ข. 19 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 59.33   | 296.65                       | 0.0000                    |
| 15             | 56.05   | 280.26                       | 1.6391                    |
| 30             | 55.17   | 275.85                       | 2.0799                    |
| 45             | 54.95   | 274.75                       | 2.1901                    |
| 60             | 54.67   | 273.37                       | 2.3278                    |
| 75             | 54.59   | 272.96                       | 2.3691                    |
| 90             | 54.56   | 272.82                       | 2.3829                    |
| 105            | 54.62   | 273.10                       | 2.3554                    |
| 120            | 54.59   | 272.96                       | 2.3691                    |
| 150            | 54.54   | 272.69                       | 2.3967                    |
| 180            | 54.59   | 272.96                       | 2.3691                    |
| 210            | 54.59   | 272.96                       | 2.3691                    |
| 240            | 54.59   | 272.96                       | 2.3691                    |

ตารางที่ ข. 20 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.318 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 49.91   | 499.09                       | 0.0000                    |
| 15             | 48.06   | 480.63                       | 1.8457                    |
| 30             | 48.01   | 480.08                       | 1.9008                    |
| 45             | 47.87   | 478.71                       | 2.0386                    |
| 60             | 47.73   | 477.33                       | 2.1763                    |
| 75             | 47.71   | 477.05                       | 2.2039                    |
| 90             | 47.65   | 476.50                       | 2.2590                    |
| 105            | 47.65   | 476.50                       | 2.2590                    |
| 120            | 47.57   | 475.67                       | 2.3416                    |
| 150            | 47.62   | 476.23                       | 2.2865                    |
| 180            | 47.57   | 475.67                       | 2.3416                    |
| 210            | 47.54   | 475.40                       | 2.3691                    |
| 240            | 47.54   | 475.40                       | 2.3691                    |

ข. 4 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากเถ้า  
แกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข. 21 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 20.43                        | 0.0000                    |
| 15              | 17.32                        | 0.3113                    |
| 30              | 17.21                        | 0.3223                    |
| 45              | 17.02                        | 0.3416                    |
| 60              | 16.88                        | 0.3554                    |
| 75              | 16.85                        | 0.3581                    |
| 90              | 16.80                        | 0.3636                    |
| 105             | 16.77                        | 0.3664                    |
| 120             | 16.82                        | 0.3609                    |
| 150             | 16.77                        | 0.3664                    |
| 180             | 16.74                        | 0.3691                    |
| 210             | 16.80                        | 0.3636                    |
| 240             | 16.77                        | 0.3664                    |

ตารางที่ ข. 22 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.476 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 49.52                        | 0.0000                    |
| 15              | 41.64                        | 0.7879                    |
| 30              | 41.34                        | 0.8182                    |
| 45              | 41.23                        | 0.8292                    |
| 60              | 40.82                        | 0.8705                    |
| 75              | 40.74                        | 0.8788                    |
| 90              | 40.65                        | 0.8871                    |
| 105             | 40.63                        | 0.8898                    |
| 120             | 40.60                        | 0.8926                    |
| 150             | 40.57                        | 0.8953                    |
| 180             | 40.63                        | 0.8898                    |
| 210             | 40.63                        | 0.8898                    |
| 240             | 40.60                        | 0.8926                    |

ตารางที่ ข. 23 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.476 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาทีก) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|------------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0                | 39.74   | 198.72                       | 0.0000                    |
| 15               | 37.48   | 187.42                       | 1.1295                    |
| 30               | 36.80   | 183.98                       | 1.4738                    |
| 45               | 36.49   | 182.47                       | 1.6253                    |
| 60               | 36.25   | 181.23                       | 1.7493                    |
| 75               | 36.05   | 180.26                       | 1.8457                    |
| 90               | 35.86   | 179.30                       | 1.9421                    |
| 105              | 35.67   | 178.33                       | 2.0386                    |
| 120              | 35.64   | 178.20                       | 2.0523                    |
| 150              | 35.64   | 178.20                       | 2.0523                    |
| 180              | 35.61   | 178.06                       | 2.0661                    |
| 210              | 35.64   | 178.20                       | 2.0523                    |
| 240              | 35.58   | 177.92                       | 2.0799                    |

ตารางที่ ข. 24 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.476 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาทีก) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|------------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0                | 49.91   | 499.09                       | 0.0000                    |
| 15               | 48.42   | 484.21                       | 1.4876                    |
| 30               | 48.01   | 480.08                       | 1.9008                    |
| 45               | 47.71   | 477.05                       | 2.2039                    |
| 60               | 47.54   | 475.40                       | 2.3691                    |
| 75               | 47.46   | 474.57                       | 2.4518                    |
| 90               | 47.37   | 473.75                       | 2.5344                    |
| 105              | 47.40   | 474.02                       | 2.5069                    |
| 120              | 47.35   | 473.47                       | 2.5620                    |
| 150              | 47.32   | 473.20                       | 2.5895                    |
| 180              | 47.29   | 472.92                       | 2.6171                    |
| 210              | 47.32   | 473.20                       | 2.5895                    |
| 240              | 47.32   | 473.20                       | 2.5895                    |

ข. 5 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำ  
แกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข. 25 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 20.18                        | 0.0000                    |
| 15             | 17.18                        | 0.3003                    |
| 30             | 16.47                        | 0.3719                    |
| 45             | 15.97                        | 0.4215                    |
| 60             | 15.97                        | 0.4215                    |
| 75             | 16.02                        | 0.4160                    |
| 90             | 16.02                        | 0.4160                    |
| 105            | 16.02                        | 0.4160                    |
| 120            | 16.02                        | 0.4160                    |
| 150            | 16.05                        | 0.4132                    |
| 180            | 16.05                        | 0.4132                    |
| 210            | 15.97                        | 0.4215                    |
| 240            | 16.00                        | 0.4187                    |

ตารางที่ ข. 26 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 30.68                        | 0.0000                    |
| 15             | 25.97                        | 0.4711                    |
| 30             | 25.36                        | 0.5317                    |
| 45             | 25.01                        | 0.5675                    |
| 60             | 24.81                        | 0.5868                    |
| 75             | 24.51                        | 0.6171                    |
| 90             | 24.48                        | 0.6198                    |
| 105            | 24.59                        | 0.6088                    |
| 120            | 24.59                        | 0.6088                    |
| 150            | 24.56                        | 0.6116                    |
| 180            | 24.54                        | 0.6143                    |
| 210            | 24.48                        | 0.6198                    |
| 240            | 24.51                        | 0.6171                    |

ตารางที่ ข. 27 ความเข้มข้นสารละลายของโกรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 50.87                        | 0.0000                    |
| 15              | 42.58                        | 0.8292                    |
| 30              | 41.45                        | 0.9421                    |
| 45              | 41.34                        | 0.9532                    |
| 60              | 41.09                        | 0.9780                    |
| 75              | 40.85                        | 1.0028                    |
| 90              | 40.82                        | 1.0055                    |
| 105             | 40.79                        | 1.0083                    |
| 120             | 40.85                        | 1.0028                    |
| 150             | 40.76                        | 1.0110                    |
| 180             | 40.85                        | 1.0028                    |
| 210             | 40.85                        | 1.0028                    |
| 240             | 40.87                        | 1.0000                    |

ตารางที่ ข. 28 ความเข้มข้นสารละลายของโกรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในอัตรา 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 50.02   | 100.04                       | 0.0000                    |
| 15              | 44.48   | 88.96                        | 1.1074                    |
| 30              | 43.41   | 86.82                        | 1.3223                    |
| 45              | 42.33   | 84.67                        | 1.5372                    |
| 60              | 42.14   | 84.28                        | 1.5758                    |
| 75              | 41.53   | 83.07                        | 1.6970                    |
| 90              | 41.84   | 83.67                        | 1.6364                    |
| 105             | 41.81   | 83.62                        | 1.6419                    |
| 120             | 41.45   | 82.90                        | 1.7135                    |
| 150             | 41.62   | 83.23                        | 1.6804                    |
| 180             | 41.78   | 83.56                        | 1.6474                    |
| 210             | 41.48   | 82.96                        | 1.7080                    |
| 240             | 41.51   | 83.01                        | 1.7025                    |

ตารางที่ ข. 29 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 49.94   | 149.81                       | 0.0000                    |
| 15             | 44.67   | 134.02                       | 1.5785                    |
| 30             | 43.77   | 131.30                       | 1.8512                    |
| 45             | 42.69   | 128.07                       | 2.1736                    |
| 60             | 41.98   | 125.93                       | 2.3884                    |
| 75             | 41.75   | 125.26                       | 2.4545                    |
| 90             | 41.78   | 125.35                       | 2.4463                    |
| 105            | 41.59   | 124.77                       | 2.5041                    |
| 120            | 41.48   | 124.44                       | 2.5372                    |
| 150            | 41.78   | 125.35                       | 2.4463                    |
| 180            | 41.67   | 125.02                       | 2.4793                    |
| 210            | 41.56   | 124.69                       | 2.5124                    |
| 240            | 41.48   | 124.44                       | 2.5372                    |

ตารางที่ ข. 30 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ไนเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 40.07   | 200.37                       | 0.0000                    |
| 15             | 38.20   | 191.01                       | 0.9366                    |
| 30             | 37.26   | 186.32                       | 1.4050                    |
| 45             | 36.38   | 181.91                       | 1.8457                    |
| 60             | 35.72   | 178.61                       | 2.1763                    |
| 75             | 35.89   | 179.44                       | 2.0937                    |
| 90             | 35.42   | 177.09                       | 2.3278                    |
| 105            | 35.58   | 177.92                       | 2.2452                    |
| 120            | 35.39   | 176.96                       | 2.3416                    |
| 150            | 35.28   | 176.40                       | 2.3967                    |
| 180            | 35.36   | 176.82                       | 2.3554                    |
| 210            | 35.06   | 175.30                       | 2.5069                    |
| 240            | 35.23   | 176.13                       | 2.4242                    |

ตารางที่ ข. 31 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 58.94   | 294.72                       | 0.0000                    |
| 15             | 54.48   | 272.41                       | 2.2314                    |
| 30             | 53.66   | 268.28                       | 2.6446                    |
| 45             | 53.08   | 265.39                       | 2.9339                    |
| 60             | 52.11   | 260.56                       | 3.4160                    |
| 75             | 52.00   | 260.01                       | 3.4711                    |
| 90             | 52.00   | 260.01                       | 3.4711                    |
| 105            | 51.98   | 259.88                       | 3.4848                    |
| 120            | 52.03   | 260.15                       | 3.4573                    |
| 150            | 52.03   | 260.15                       | 3.4573                    |
| 180            | 52.06   | 260.29                       | 3.4435                    |
| 210            | 52.03   | 260.15                       | 3.4573                    |
| 240            | 52.03   | 260.15                       | 3.4573                    |

ตารางที่ ข. 32 ความเข้มข้นสารละลายคองโกรีตที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 0.635 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 50.16   | 501.57                       | 0.0000                    |
| 15             | 48.45   | 484.49                       | 1.7080                    |
| 30             | 47.71   | 477.05                       | 2.4518                    |
| 45             | 47.37   | 473.75                       | 2.7824                    |
| 60             | 46.93   | 469.34                       | 3.2231                    |
| 75             | 46.66   | 466.58                       | 3.4986                    |
| 90             | 46.63   | 466.31                       | 3.5262                    |
| 105            | 46.58   | 465.76                       | 3.5813                    |
| 120            | 46.58   | 465.76                       | 3.5813                    |
| 150            | 46.52   | 465.21                       | 3.6364                    |
| 180            | 46.60   | 466.03                       | 3.5537                    |
| 210            | 46.55   | 465.48                       | 3.6088                    |
| 240            | 46.58   | 465.76                       | 3.5813                    |



ข. 6 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากเถ้า  
แกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ตารางที่ ข. 33 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 20.52                        | 0.0000                    |
| 15             | 17.18                        | 0.3333                    |
| 30             | 16.91                        | 0.3609                    |
| 45             | 16.55                        | 0.3967                    |
| 60             | 16.38                        | 0.4132                    |
| 75             | 16.27                        | 0.4242                    |
| 90             | 16.13                        | 0.4380                    |
| 105            | 16.16                        | 0.4353                    |
| 120            | 16.13                        | 0.4380                    |
| 150            | 16.11                        | 0.4408                    |
| 180            | 16.08                        | 0.4435                    |
| 210            | 16.13                        | 0.4380                    |
| 240            | 16.13                        | 0.4380                    |

ตารางที่ ข. 34 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่  
สกัดจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 30.46                        | 0.0000                    |
| 15             | 25.83                        | 0.4628                    |
| 30             | 25.34                        | 0.5124                    |
| 45             | 24.76                        | 0.5702                    |
| 60             | 24.59                        | 0.5868                    |
| 75             | 24.51                        | 0.5950                    |
| 90             | 24.29                        | 0.6171                    |
| 105            | 24.26                        | 0.6198                    |
| 120            | 24.29                        | 0.6171                    |
| 150            | 24.26                        | 0.6198                    |
| 180            | 24.21                        | 0.6253                    |
| 210            | 24.18                        | 0.6281                    |
| 240            | 24.23                        | 0.6226                    |

ตารางที่ ข. 35 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 50.07                        | 0.0667                    |
| 15              | 42.09                        | 0.0333                    |
| 30              | 41.20                        | 0.0222                    |
| 45              | 40.71                        | 0.0167                    |
| 60              | 40.57                        | 0.0133                    |
| 75              | 40.21                        | 0.0111                    |
| 90              | 40.02                        | 0.0095                    |
| 105             | 40.05                        | 0.0083                    |
| 120             | 39.99                        | 0.0067                    |
| 150             | 39.94                        | 0.0056                    |
| 180             | 39.96                        | 0.0048                    |
| 210             | 39.99                        | 0.0042                    |
| 240             | 39.99                        | 0.0667                    |

ตารางที่ ข. 36 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm

| ระยะเวลา (นาที) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|-----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0               | 50.79   | 101.58                       | 0.0000                    |
| 15              | 44.40   | 88.80                        | 1.2782                    |
| 30              | 43.46   | 86.93                        | 1.4656                    |
| 45              | 42.86   | 85.71                        | 1.5868                    |
| 60              | 42.47   | 84.94                        | 1.6639                    |
| 75              | 42.17   | 84.34                        | 1.7245                    |
| 90              | 41.92   | 83.84                        | 1.7741                    |
| 105             | 41.89   | 83.79                        | 1.7796                    |
| 120             | 41.92   | 83.84                        | 1.7741                    |
| 150             | 41.87   | 83.73                        | 1.7851                    |
| 180             | 41.89   | 83.79                        | 1.7796                    |
| 210             | 41.89   | 83.79                        | 1.7796                    |
| 240             | 41.84   | 83.67                        | 1.7906                    |

ตารางที่ ข. 37 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 51.34   | 154.02                       | 0.0000                    |
| 15             | 46.80   | 140.39                       | 1.3636                    |
| 30             | 44.98   | 134.93                       | 1.9091                    |
| 45             | 44.34   | 133.03                       | 2.0992                    |
| 60             | 43.68   | 131.05                       | 2.2975                    |
| 75             | 43.38   | 130.14                       | 2.3884                    |
| 90             | 43.10   | 129.31                       | 2.4711                    |
| 105            | 43.10   | 129.31                       | 2.4711                    |
| 120            | 43.02   | 129.07                       | 2.4959                    |
| 150            | 43.08   | 129.23                       | 2.4793                    |
| 180            | 43.08   | 129.23                       | 2.4793                    |
| 210            | 43.08   | 129.23                       | 2.4793                    |
| 240            | 43.05   | 129.15                       | 2.4876                    |

ตารางที่ ข. 38 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 40.05   | 200.23                       | 0.0000                    |
| 15             | 37.71   | 188.53                       | 1.1708                    |
| 30             | 36.19   | 180.95                       | 1.9284                    |
| 45             | 35.78   | 178.88                       | 2.1350                    |
| 60             | 35.42   | 177.09                       | 2.3140                    |
| 75             | 35.20   | 175.99                       | 2.4242                    |
| 90             | 35.03   | 175.17                       | 2.5069                    |
| 105            | 35.03   | 175.17                       | 2.5069                    |
| 120            | 35.03   | 175.17                       | 2.5069                    |
| 150            | 35.01   | 175.03                       | 2.5207                    |
| 180            | 35.03   | 175.17                       | 2.5069                    |
| 210            | 35.01   | 175.03                       | 2.5207                    |
| 240            | 35.01   | 175.03                       | 2.5207                    |

ตารางที่ ข. 39 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 59.06   | 295.28                       | 0.0000                    |
| 15             | 55.14   | 275.72                       | 1.9559                    |
| 30             | 54.48   | 272.41                       | 2.2865                    |
| 45             | 53.41   | 267.04                       | 2.8237                    |
| 60             | 52.86   | 264.28                       | 3.0992                    |
| 75             | 52.53   | 262.63                       | 3.2645                    |
| 90             | 52.33   | 261.67                       | 3.3609                    |
| 105            | 52.36   | 261.80                       | 3.3471                    |
| 120            | 52.31   | 261.53                       | 3.3747                    |
| 150            | 52.36   | 261.80                       | 3.3471                    |
| 180            | 52.33   | 261.67                       | 3.3609                    |
| 210            | 52.28   | 261.39                       | 3.3884                    |
| 240            | 52.39   | 261.94                       | 3.3333                    |

ตารางที่ ข. 40 ความเข้มข้นสารละลายคองโกเรดที่ผ่านการดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะของซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์ในเตรต 1.270 % ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm

| ระยะเวลา (นาท) | ความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการเจือจาง (ppm) | ความเข้มข้นของสารละลาย (ppm) | ปริมาณดูดซับจำเพาะ (mg/g) |
|----------------|---|------------------------------|---------------------------|
| 0              | 50.35   | 503.50                       | 0.0000                    |
| 15             | 49.14   | 491.38                       | 1.2121                    |
| 30             | 48.50   | 485.04                       | 1.8457                    |
| 45             | 47.82   | 478.15                       | 2.5344                    |
| 60             | 47.13   | 471.27                       | 3.2231                    |
| 75             | 47.02   | 470.17                       | 3.3333                    |
| 90             | 46.91   | 469.06                       | 3.4435                    |
| 105            | 46.85   | 468.51                       | 3.4986                    |
| 120            | 46.85   | 468.51                       | 3.4986                    |
| 150            | 46.82   | 468.24                       | 3.5262                    |
| 180            | 46.88   | 468.79                       | 3.4711                    |
| 210            | 46.82   | 468.24                       | 3.5262                    |
| 240            | 46.85   | 468.51                       | 3.4986                    |

## ภาคผนวก ก.

## ค. 1 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายจากค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายหาได้จากกราฟมาตรฐานของสารละลาย ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$y = 0.0363x + 0.0093$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$x$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

สำหรับสารละลายคองโกเรดเข้มข้น 20 ppm ที่เตรียมเพื่อใช้ในการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาวัลย์ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาเริ่มดูดซับได้เท่ากับ 0.743 ดังนั้นจึงคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายได้เท่ากับ

$$x = \frac{0.743 - 0.0093}{0.0363}$$

$$x = 20.21$$

## ค. 2 การคำนวณปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ

ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ คำนวณได้จากสมการ

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{W}$$

เมื่อ  $q_t$  คือ ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ (mg/g)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (ppm)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ ของสารละลาย (ppm)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

$W$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

สำหรับการดูดซับสารละลายคองโกเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถาวัลย์วัดความเข้มข้นได้เท่ากับ 20.21 ppm และวัดความเข้มข้นของสารละลายที่หลังจากทำการดูดซับ 15 นาที ได้เท่ากับ 18.75 ppm จึงคำนวณปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาดังนั้นกล่าวได้ คือ

$$q_t = \frac{(20.21 - 18.75)}{0.2} \times 0.02$$

$$q_t = 0.1460 \text{ mg/g}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วีระวัฒน์ กลอวุฒิมันตร์ เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย