

การเตรียมเรซินโคโตซานสำหรับการขจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย



นางสาวสุภาพร ห้วยหงษ์ทอง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2187-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF CHITOSAN RESIN FOR HEAVY METAL IONS REMOVAL IN WASTEWATER



Miss Supaporn Hoiyhongtong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

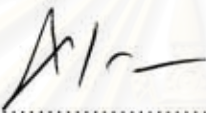
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

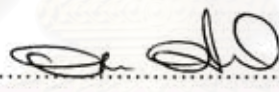
ISBN 974-14-2187-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมเรซินโคโคซานสำหรับการจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย
โดย นางสาวสุภาพร ห้วยหงษ์ทอง
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ

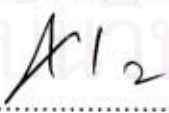
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


.....รองคณบดีฝ่ายบริหารรักษาราชการแทน
.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง: การเตรียมเรซินไคโตซานสำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย (PREPARATION OF CHITOSAN RESIN FOR HEAVY METAL IONS REMOVAL IN WASTE WATER) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ. ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี จำนวนหน้า 140 หน้า. ISBN 974-14-2187-7.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์จากการชุบโลหะโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบคอลัมน์ เรซินไคโตซานดัดแปรทางเคมีถูกเลือกใช้เป็นตัวดูดซับ สำหรับปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของเรซินไคโตซาน ปริมาณเรซินไคโตซาน เวลา ค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนัก และ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการเลือกดูดซับไอออนโลหะหนัก จากการศึกษาอันดับปฏิกิริยาดูดซับพบว่าเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ ไอโซเทอม ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดง 0.7569 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และดูดซับไอออนตะกั่วได้ 0.6120 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

สำหรับผลการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนตัวดูดซับเรซินไคโตซานดัดแปรทางเคมี ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำเสียและชนิดของเรซินไคโตซานดัดแปรทางเคมี การเลือกดูดซับไอออนทองแดงทำได้โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 2 ส่วนการเลือกดูดซับไอออนตะกั่วทำได้โดยใช้ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่ค่าพีเอช 4 ซึ่งผลการทดลองการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบผสมก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ผลของโพแทสเซียมไนเตรตในสารละลายโลหะหนักแบบผสมพบว่า โพแทสเซียมไนเตรตไปยับยั้งอัตราการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ส่วนการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ 2 คอลัมน์ซึ่งต่อกันแบบอนุกรมและบรรจุไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานและกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ตามลำดับ สามารถขจัดไอออนตะกั่วและไอออนทองแดงได้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง สำหรับสมบัติของตัวดูดซับที่ใช้ วิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) และ Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy นอกจากนี้สามารถนำไอออนโลหะหนักออกจากตัวดูดซับโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำไปแยกไอออนทองแดงโดยวิธีเคมีไฟฟ้ากลับคืนสูงกว่า 96%

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต..... *สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง*.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *W W*.....
 ปีการศึกษา.....2548.....

4672465723: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: COPPER IONS, LEAD IONS, SELECTIVE ADSORPTION, CHEMICAL MODIFIED CHITOSAN RESINS

SUPAPORN HOIYHONGTONG: PREPARATION OF CHITOSAN RESIN FOR HEAVY METAL IONS REMOVAL IN WASTEWATER THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. SANGOBTHIP PONGSATHABODEE, 140 pp. ISBN 974-14-2187-7.

The objective of this present work was to study a selective adsorption of copper ions and lead ions containing in synthetic metal plating wastewater through batch wise tests and column tests. Chemical modified chitosan resins were chosen as an absorbent. The effects of chemical modified chitosan resins, dosage, contact time, pH condition, initial concentration, type of heavy metal and KNO_3 on the selective adsorption were investigated. The adsorption of heavy metal ions have been studied and found that the pseudo-second order kinetic and Langmuir isotherm (copper ions 0.7569 mg/mg of glutaraldehyde chitosan resins and lead ions 0.6120 mg/mg of thioglycolic chitosan resins)

The experimental results showed that the selective adsorption of copper ions and lead ions strongly depended on pH of wastewater and chemical modified of chitosan resins. The selective adsorption of copper ions was achieved when using glutaraldehyde chitosan resins at pH 2. Success in the selective adsorption of lead ions was obtained when employing thioglycolic chitosan resins at pH 4. In case of ions mixture study, the same results were observed. The KNO_3 inhibited the adsorption rate. In order to demonstrate the feasibility of selective adsorption, two packed-bed reactors in series containing thioglycolic chitosan resins and glutaraldehyde chitosan resins were studied and selective lead ions and copper ions were observed, respectively. The adsorbents were characterized by SEM, EDX and FTIR. Washing with a solution of hydrochloric could regenerate the adsorbent and recovered by electrochemical (>96%).

Department.....Chemical Technology.....

Student's signature.....*Supaporn Hoiyhongtong*.....

Field of study... Chemical Technology.....

Advisor's signature...*Sangobthip Pongsathabodee*.....

Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาปดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่วิเคราะห์ผลตลอดการวิจัย และความช่วยเหลือแนะนำข้อมูลต่างๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนบางส่วนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณพี่นี่ และพี่ๆ ทุกคนจากบริษัทกุยหลี อ. มหาชัย จ. สมุทรสาคร ที่เอื้อเพื่อเปลื้องกั๊กซ์ใช้ตลอดการวิจัย และคุณพีรศิลป์ที่แนะนำแหล่งวัตถุดิบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พระปฐมวิทยาลัย เทคนิคกรุงเทพฯ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ เป็นที่ปรึกษาที่ดี ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลทางด้านวิเคราะห์ และเอื้อเพื่อสารเคมี

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านทุนทรัพย์ทั้งหมด รวมทั้งเป็นที่ปรึกษาและกำลังใจอย่างดีที่สุดในทุกเรื่อง และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ฐ |
| สารบัญรูป | ฒ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 2 ทฤษฎี | |
| 2.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน..... | 4 |
| 2.2 แหล่งของไคตินและไคโตซาน..... | 6 |
| 2.3 กระบวนการเตรียมไคตินและไคโตซาน..... | 9 |
| 2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ..... | 10 |
| 2.3.2 การกำจัดแร่ธาตุ..... | 10 |
| 2.3.3 การกำจัดโปรตีน..... | 10 |
| 2.3.4 การกำจัดสีและไขมัน..... | 11 |
| 2.3.5 การกำจัดหมู่แอสติล..... | 11 |
| 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของไคโตซาน..... | 12 |
| 2.4.1 ชนิดของสารละลายต่าง..... | 12 |
| 2.4.2 ความเข้มข้นของสารละลายต่าง..... | 12 |
| 2.4.3 อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอสติล..... | 12 |
| 2.4.4 เวลาในการกำจัดหมู่แอสติล..... | 13 |

| | | |
|--------|---------------------------------------------------|----|
| 2.4.5 | ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)..... | 13 |
| 2.4.6 | คุณภาพไคติน..... | 13 |
| 2.5 | สมบัติของไคโตซาน..... | 14 |
| 2.5.1 | การละลาย (Solubility)..... | 15 |
| 2.5.2 | ความหนืด (Viscosity)..... | 16 |
| 2.6 | การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน..... | 16 |
| 2.7 | เรซิน..... | 18 |
| 2.8 | การเกิดโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน..... | 19 |
| 2.9 | การดูดซับ (Adsorption)..... | 19 |
| 2.9.1 | ลักษณะการดูดซับ..... | 20 |
| 2.9.2 | ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ..... | 22 |
| | ก. ธรรมชาติของสารดูดซับ..... | 22 |
| | ข. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ..... | 22 |
| | ค. สภาพแวดล้อม..... | 23 |
| 2.9.3 | สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ..... | 23 |
| 2.9.4 | สมการเฟรנדลิช..... | 24 |
| 2.9.5 | สมการแลงเมียร์..... | 25 |
| 2.10 | การดูดซับแบบต่อเนื่อง..... | 26 |
| 2.10.1 | ขอบเขตการถ่ายโอนมวล..... | 26 |
| 2.10.2 | ลักษณะเบรคทวร์จ์..... | 27 |
| 2.11 | อุตสาหกรรมชุบโลหะ..... | 28 |
| 2.11.1 | ทฤษฎีและหลักการ..... | 28 |
| 2.11.2 | การนำไปใช้..... | 29 |
| 2.12 | โลหะหนัก..... | 30 |
| 2.12.1 | ทองแดง (COPPER)..... | 30 |
| 2.12.2 | ตะกั่ว (LEAD)..... | 30 |
| 2.13 | การนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)..... | 31 |
| 2.13.1 | กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process)..... | 31 |
| 2.13.2 | ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า..... | 32 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ก. เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)..... | 32 |
| ข. กระบวนการเคมีไฟฟ้า..... | 32 |
| ค. ขั้วไฟฟ้า (Electrode)..... | 33 |
| ง. การระงับรักษาขั้วไฟฟ้า..... | 33 |
| จ. สารละลายอิเล็กโทรไลต์..... | 33 |
| ฉ. ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า [E°]..... | 35 |
| ช. ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential)..... | 35 |
| ซ. หลักการอุณหภูมิจลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า..... | 35 |
| ฌ. สมการเนิร์นสต์ (Nernst equation)..... | 36 |
| ญ. กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)..... | 37 |
| ฎ. การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี..... | 38 |
| ฏ. การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Potential Method or Potential static Mode)..... | 38 |
| ฐ. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled– Current Method or Galvanostatic Mode)..... | 39 |
| ฑ. ตัวแปรที่มีผลต่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า..... | 40 |
| ฒ. การถ่ายโอนมวลสาร..... | 40 |
| ณ. ไมเกรชั่น..... | 40 |
| ด. การแพร่..... | 40 |
| ต. การพา..... | 41 |
| 2.14 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... | 41 |
| 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 42 |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | 45 |
| 3.1 รูปแบบการศึกษา | 45 |
| 3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 45 |
| 3.2.1 เปลือกกุ้งขาว..... | 45 |
| 3.2.1 สารเคมีสำหรับการเตรียมโคโตซาน..... | 45 |
| 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 46 |
| 3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมโคโตซาน..... | 46 |
| 3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการหาภาวะการดูดซับไอออนโลหะหนัก... | 46 |

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.3 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 47 |
| 3.4 | การดำเนินงานวิจัย..... | 47 |
| 3.4.1 | การสกัดโคโคซานจากเปลือกกุ้ง..... | 47 |
| 3.4.2 | การเตรียมเรซินโคโคซานและดัดแปรด้วยสารเคมี..... | 49 |
| 3.4.2.1 | การเตรียมเรซินโคโคซาน..... | 49 |
| 3.4.2.2 | การเตรียมกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโคซาน..... | 49 |
| 3.4.2.3 | การเตรียมคาร์บอกซีเลตเรซินโคโคซาน..... | 49 |
| 3.4.2.4 | การเตรียมไทโอไกลโคลิกเรซินโคโคซาน..... | 50 |
| 3.4.3 | การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมและความสามารถในการดูดซับไอออน โลหะหนักของเรซินโคโคซาน..... | 50 |
| 3.4.3.1 | การศึกษาชนิดของโคโคซานที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก... | 51 |
| 3.4.3.2 | การศึกษาปริมาณเรซินโคโคซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออน โลหะหนัก..... | 51 |
| 3.4.3.3 | การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก.. | 52 |
| 3.4.3.4 | การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสม ในการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 52 |
| 3.4.3.5 | การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการ ดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 53 |
| 3.4.3.6 | การศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วใน สารละลายโลหะหนักผสม..... | 53 |
| 3.4.3.7 | การศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่เหมาะสม ต่อการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 54 |
| 3.4.3.8 | การศึกษาการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงแบบ ต่อเนื่อง..... | 56 |
| | -ปริมาณเรซินที่ใช้ในคอลัมน์..... | 56 |
| | -อัตราการไหลของสารละลายโลหะหนักแบบผสม..... | 57 |
| 3.4.3.9 | การศึกษาการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและ ไอออนตะกั่วแบบต่อเนื่อง..... | 58 |
| | -แบบคอลัมน์เดี่ยว..... | 58 |
| | -แบบคอลัมน์คู่..... | 59 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.3.10 | การฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการ ดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 59 |
| 3.4.3.11 | การศึกษาการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรด ไฮโดรคลอริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซาน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า..... | 61 |
| 4 | ผลและการอภิปรายผลการทดลอง..... | 63 |
| 4.1 | ลักษณะสมบัติของเรซินไคโตซาน..... | 63 |
| 4.2 | การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 65 |
| 4.2.1 | การเลือกชนิดของเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการเลือกดูดซับไอออน ทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 65 |
| 4.2.2 | ปริมาณเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออน ตะกั่ว..... | 73 |
| 4.2.3 | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับ ไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 75 |
| 4.2.4 | ค่าพีเอชที่ทำให้เรซินไคโตซานชนิดต่างๆ มีความสมดุลระหว่าง ประจุลบและประจุบวก..... | 77 |
| 4.2.5 | ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงและ ไอออนตะกั่ว..... | 78 |
| 4.2.6 | ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่ เหมาะสมในการดูดซับกับเวลา..... | 82 |
| 4.2.7 | ค่าการแพร่ภายในรูพรุนของการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและ ไอออนตะกั่วที่เหมาะสมในการดูดซับ..... | 85 |
| 4.2.8 | ไอโซเทอมของการดูดซับ..... | 86 |
| 4.2.9 | ค่าคงที่อัตราการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์ เรซินไคโตซานและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 87 |
| 4.2.10 | การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะ หนักแบบผสม..... | 90 |
| 4.2.11 | ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต..... | 91 |
| 4.2.12 | ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดง แบบต่อเนื่อง..... | 93 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.13 การเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบ ต่อเนื่อง (คอลัมน์เดี่ยว)..... | 97 |
| 4.2.14 การเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบ ต่อเนื่อง (คอลัมน์คู่)..... | 99 |
| 4.3.15 การฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับ ไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 100 |
| 4.2.16 การแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ได้จากการ ฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า..... | 102 |
| 4.2.17 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น..... | 104 |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 106 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 106 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 108 |
| รายการอ้างอิง..... | 109 |
| ภาคผนวก..... | 113 |
| ภาคผนวก ก..... | 114 |
| ภาคผนวก ข..... | 115 |
| ภาคผนวก ค..... | 119 |
| ภาคผนวก ง..... | 126 |
| ภาคผนวก จ..... | 134 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 140 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 | ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ..... | 7 |
| 2.2 | การประมาณปริมาณผลผลิตทั่วโลกของสารประเภทไคตินจากแหล่งต่างๆ..... | 8 |
| 2.3 | สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคโตซาน..... | 14 |
| 2.4 | ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆกัน..... | 15 |
| 2.5 | การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน..... | 17 |
| 2.6 | ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... | 42 |
| 3.1 | สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมไคโตซาน..... | 45 |
| 3.2 | เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมไคโตซาน..... | 46 |
| 3.3 | เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 46 |
| 3.4 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 47 |
| 4.1 | สเปกตรัมของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ..... | 64 |
| 4.2 | ชนิดของเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 66 |
| 4.3 | เปรียบเทียบสเปกตรัมของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม..... | 71 |
| 4.4 | เปรียบเทียบสเปกตรัมของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม..... | 72 |
| 4.5 | ค่าคงที่ของอัตราการแพร่ภายในรูพรุนของปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก..... | 85 |
| 4.6 | ค่าคงที่แลงเมียร์ไอโซเทอมและเฟรนดริชไอโซเทอม..... | 87 |
| 4.7 | เปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการดูดซับของไอออนแบบอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม..... | 89 |
| 4.8 | การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะหนักผสม.... | 90 |
| 4.9 | เปอร์เซ็นต์การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะหนักแบบผสม..... | 94 |
| 4.10 | เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวล.... | 97 |

| ตารางที่ | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.11 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวลแบบคอลัมน์เดี่ยว..... | 99 |
| 4.12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วหลังผ่าน การฟื้นฟูประสิทธิภาพ แบบกะ..... | 100 |
| 4.13 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวลของการฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซาน..... | 102 |
| 4.14 ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาได้และร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง..... | 103 |
| 4.15 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น..... | 104 |
| ง.1 ปริมาณเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 126 |
| ง.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 127 |
| ง.3 ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 128 |
| ง.4 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว แบบเดี่ยว..... | 129 |
| ง.5 ค่าคงที่แลงเมียร์ไอโซเทอมและเฟรนดริชไอโซเทอม..... | 129 |
| ง.6 ชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบคอลัมน์เดี่ยว (กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน)..... | 130 |
| ง.7 ชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบคอลัมน์เดี่ยว (ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน)..... | 131 |
| ง.8 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก แบบคอลัมน์คู่..... | 132 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 | โครงสร้างโมเลกุลของโคติน..... | 5 |
| 2.2 | โครงสร้างโมเลกุลของโคโตซาน..... | 5 |
| 2.3 | IR spectra ของโคตินและโคโตซาน..... | 6 |
| 2.4 | การเกิดคีเลทของทองแดงกับโคโตซาน..... | 6 |
| 2.5 | ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมโคตินและโคโตซาน..... | 10 |
| 2.6 | ลักษณะของ ตัวดูดซับ, ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย... | 20 |
| 2.7 | เส้นโค้งเบรคทฤษฎีในการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 27 |
| 2.8 | การต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ (ก) แบบอนุกรม (ข) แบบขนาน..... | 28 |
| 2.9 | แบบจำลองเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์..... | 34 |
| 2.10 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่..... | 39 |
| 2.11 | (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่..... | 40 |
| 3.1 | ขั้นตอนการเตรียมโคโตซานจากเปลือกกุ้ง..... | 48 |
| 3.2 | โครงสร้างของคาร์บอกซิเลต..... | 50 |
| 3.3 | การดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบต่อเนื่อง (ก) แบบคอลัมน์เดี่ยว (ข) แบบคอลัมน์คู่..... | 57 |
| 3.4 | การแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยเครื่องแยกไอออนทองแดง (Electro Analysis)..... | 62 |
| 4.1 | ลักษณะสมบัติของเรซินโคโตซาน..... | 64 |
| 4.2 | การเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของเรซินโคโตซานชนิดต่างๆ..... | 65 |
| 4.3 | การเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเรซินโคโตซาน..... | 68 |
| 4.4 | EDX ของกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน..... | 69 |
| 4.5 | เปรียบเทียบสเปกตรัมของกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม..... | 70 |
| 4.6 | เปรียบเทียบสเปกตรัมของไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม..... | 72 |

| รูปที่ | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.7 ปริมาณเรซินโคโตซานต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก..... | 74 |
| 4.8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน และไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน..... | 76 |
| 4.9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างประจุลบและประจุบวกของเรซินชนิดต่างๆ..... | 77 |
| 4.10 ค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนัก..... | 80 |
| 4.11 ความแตกต่างของค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนักในการเลือกดูดซับ ไอออนโลหะหนักในภาวะเป็นกรด ช่วง 2-4..... | 81 |
| 4.12 ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ปริมาณเรซินโคโตซาน)..... | 83 |
| 4.13 ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก)..... | 84 |
| 4.14 ร้อยละของการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน และการเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน..... | 91 |
| 4.15 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (สารละลายโลหะหนักแบบเดี่ยว)..... | 92 |
| 4.16 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (สารละลายโลหะหนักแบบผสม)..... | 93 |
| 4.17 เส้นโค้งเบรคทวร์จของการศึกษาปัจจัยการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบน กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน..... | 96 |
| 4.18 เส้นโค้ง Breakthrough ของการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซิน โคโตซานและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน..... | 98 |
| 4.19 เส้นโค้ง Breakthrough ของการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน แบบต่อเนื่องหลังฟื้นฟูประสิทธิภาพ..... | 101 |
| ข. 1 Calibration Curve ของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer..... | 117 |
| ค.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 119 |
| ค.2 ค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... | 119 |
| ค.3 ค่าการแพร่ภายในรูพรุนของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของ ปริมาณเรซินโคโตซาน..... | 120 |

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ค.4 | ค่าการแพร่ภายในรูปทรงของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... 120 |
| ค.5 | อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียบของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของปริมาณเรซินไคโตซาน..... 121 |
| ค.6 | อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียบของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของค่าการแพร่ภายในรูปทรงของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... 121 |
| ค.7 | อัตราการดูดซับอันดับสองเทียบของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของปริมาณเรซินไคโตซาน..... 122 |
| ค.8 | อัตราการดูดซับอันดับสองเทียบของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของค่าการแพร่ภายในรูปทรงของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... 122 |
| ค.9 | เฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของปริมาณเรซินไคโตซาน..... 123 |
| ค.10 | เฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของค่าการแพร่ภายในรูปทรงของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... 123 |
| ค.11 | แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของปริมาณเรซินไคโตซาน..... 124 |
| ค.12 | แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของค่าการแพร่ภายในรูปทรงของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว..... 124 |
| ค.13 | การฟื้นฟูคุณภาพเรซินไคโตซานด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์แบบต่อเนื่อง..... 125 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ทำให้มีการขยายงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านเคมี เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น เป็นเหตุให้ประเทศประสบปัญหามลพิษ โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำ ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมชุบโลหะ มีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต ทำให้มีการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำเสีย ได้แก่ ไอออนโลหะหนัก เป็นต้น ซึ่งไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำนั้นก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ถึงแม้จะพบในปริมาณน้อยก็ตาม เช่น ตะกั่ว ก่อให้เกิดความผิดปกติทางสมอง ทองแดงสามารถทำลายตับและไต และแคดเมียมก่อให้เกิดโรคอิไต-อิไต เป็นต้น จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ปัจจุบันรัฐบาลต้องออกมาตราการที่เข้มงวดในการควบคุมมาตรฐานของน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดตามมา ทำให้ภาคอุตสาหกรรมต้องเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดปริมาณสารมลพิษในน้ำเสีย ปัจจุบันได้มีการพัฒนาคิดค้นวิธีการบำบัดน้ำเสียในการกำจัดโลหะหนัก เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical-deposition) การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-deposition) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electro-chemical) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) การใช้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยน (Membrane) เป็นต้น โดยกระบวนการต่างๆ มีข้อจำกัดทางด้านราคาที่สูงเกินไป บำรุงรักษายาก

งานวิจัยนี้จึงได้มีการนำวิธีการดูดซับ (Adsorption) มาใช้เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการใช้งาน การลงทุนและบำรุงรักษาต่ำ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักสูง โดยตัวดูดซับที่ใช้คือ เรซินไคโตซาน ซึ่งเตรียมมาจากของเสียทางด้านอุตสาหกรรมอาหารทะเลจำพวกเปลือกกุ้ง ซึ่งเป็นสารไบโอพอลิเมอร์ธรรมชาติ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียอีกทาง แต่ถึงแม้จะมีงานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการนำไคโตซานมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจำนวนมากก็ตาม แต่ก็ยังพบปัญหาที่สำคัญ คือ การบวมและการแตกตัวของไคโตซาน และประสิทธิภาพของตัวดูดซับ อีกทั้งการดูดซับไอออนโลหะหนักมักจะเป็นแบบเดี่ยวแต่น้ำเสียที่พบจริงจะมีไอออนโลหะหนักหลายชนิดผสมกันอยู่ จึงต้องมีการพัฒนาต่อเนื่องเพื่อให้

เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักที่ดีขึ้น และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะแก้ไขปัญหาที่มักพบในงานวิจัยอื่นและพัฒนาตัวดูดซับให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยการเตรียมไคโตซานในแบบเรซิน โดยการนำไคโตซานชนิดเม็ดมาทำปฏิกิริยากับสารเคมี เช่น กรดคลอโรแอซิดิก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น จากนั้นทำให้แห้งเพื่อลดความชื้นลง จะได้เรซินไคโตซานซึ่งช่วยแก้ปัญหาการบวมและการแตกตัวของไคโตซาน และศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบผสม เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจริง และผลของตัวแปรต่างๆ ที่ต้องคำนึงต่อการกำจัดโลหะหนัก เช่น ปริมาณไคโตซานที่ใช้ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ชนิดของโลหะหนัก และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น เหตุที่เลือกศึกษาไคโตซานแบบเรซินนั้น เนื่องจากเมื่อทำเป็นเรซินจะมีความชื้นน้อยสามารถเก็บรักษาได้ง่ายทำให้สะดวกต่อการใช้งาน และเป็นที่ต้องการของภาคอุตสาหกรรมเพื่อรองรับการขยายตัวอย่างรวดเร็ว

1.2 วัตถุประสงค์

1. การเตรียมเรซินไคโตซานจากของเสียด้านอุตสาหกรรมทางทะเล เช่น เปลือกกุ้ง เป็นต้น
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมและความสามารถของเรซินไคโตซานในการเลือกดูดซับไอออนโลหะหนักจากไอออนโลหะหนักแบบผสม

1.3 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการสกัดและเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้งจากอำเภอมหาชัย จังหวัดสมุทรสาคร
2. ศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ
3. ในงานวิจัยนี้ศึกษาไอออนโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ทองแดงและตะกั่ว โดยวิธีการดูดซับทำการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง
4. หาภาวะที่เหมาะสมและความสามารถของเรซินไคโตซานในการกำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสียจำลอง ทั้งแบบชนิดเดียวและแบบผสมกัน โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของเรซินไคโตซาน ปริมาณของเรซินไคโตซานที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ค่าพีเอช ระยะเวลา และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายโลหะหนัก

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยการใช้
ไคโตซาน

การสกัดและเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง โดยให้อยู่ในรูปคาร์บอกซีเลตเรซิน

ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการเลือกดูดซับไอออนโลหะหนักแบบผสมโดยใช้ไคโตซาน เช่น

- ปริมาณเรซินไคโตซาน (20-100 มิลลิกรัม)
- ค่าพีเอช (2-8)
- ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก (50-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ เป็นต้น โดยทำการทดลองจากน้ำเสียจำลอง แบบกะ

วิเคราะห์ความสามารถของไคโตซานในรูปเรซิน และวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของการ

เลือกดูดซับไอออนโลหะหนักแบบผสม

สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรซินไคโตซานจากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมทางทะเล ที่สามารถลดการบวมและการแตกตัวขณะดูดซับไอออนโลหะหนัก
2. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการใช้เรซินไคโตซานเลือกดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

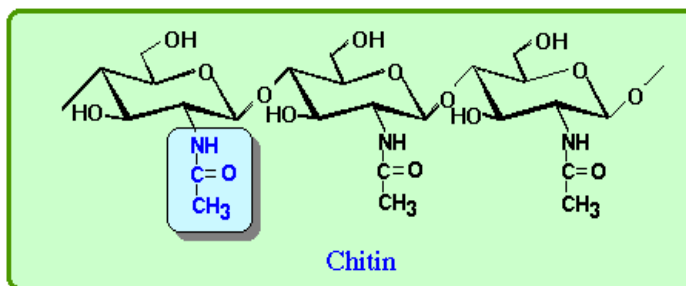
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน (Li และคณะ, 1992)

ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากเซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มเดียวกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ แต่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคล้ายและแตกต่างกันกับเซลลูโลส เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้าง

ไคติน (Chitin) ประกอบด้วยสารพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่พบมากในสัตว์ทะเลที่มีเปลือกแข็ง เช่น กุ้ง ปู กุ้ง เปลือกหุ้มของแมลงตอน แกนของปลาหมึก แมงกะพรุน หรือดาวทะเล (ที่มา: <http://thailabonline.com/news3chitin-chitosan.htm>) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในแมลงมีปีก เช่น แมลงสาบ ตั๊กแตน และยังพบในผนังของเห็ด รา และยีสต์ บางชนิด (Thomas Freier และคณะ, 2002)

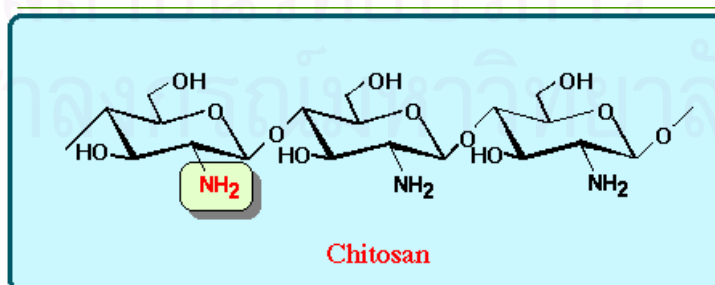
ไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly-β- (1, 4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetyl-glucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 เป็นหมู่ Acetylated amino (-NH-CO-CH₃) แทนที่จะเป็นหมู่ (-OH) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปคือ (C₈H₁₃NO₅)_n ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 39.47 โดยน้ำหนัก (V. Lee., 1974) อย่างไรก็ตาม ไคตินในธรรมชาติจะมีบางหน่วยที่ไม่มีหมู่แอซิติล (-CO-CH₃) โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ในสายพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคติน พบว่าเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้ไคตินไม่ละลายในสารละลายต่างๆ ไปได้ง่าย การใช้ประโยชน์จากไคตินจึงไม่แพร่หลายนัก อย่างไรก็ตาม สามารถดัดแปรไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้น โดยการเตรียมเป็นไคโตซาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของไคติน

(ที่มา: <http://www.wellable.com/product/chitin.gif>)

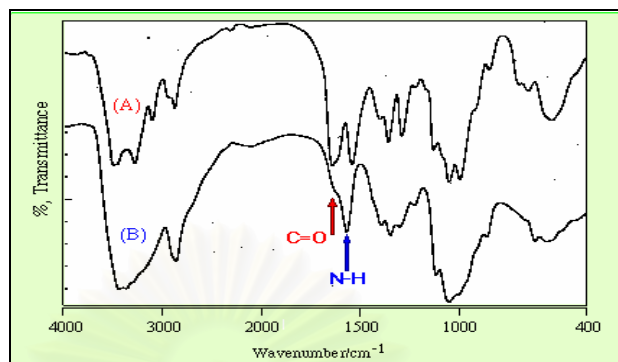
ไคโตซานมีชื่อทางเคมีว่า Poly (D-glucosamine) หรือ Poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถเตรียมขึ้นได้โดยการแยกหมู่แอสติลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่อะมิโนอิสระ (-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปถ้าหมู่แอสติลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 จะเรียกว่า Fully deacetylated chitosan ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และในไคโตซานมีไนโตรเจนประมาณร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่แอสติลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจะไม่แน่นอน จะอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89-8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซานแล้ว จะเห็นว่าไคโตซานมีประจุบวกบนหมู่อะมิโน ถือเป็น Cationic polymer และสมบัติ Polyelectrolyte ของไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับ (Adsorption) สารจำพวกอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls ไปรีนและ Nucleic acid รวมถึงไอออนโลหะ เนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดี ไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็น Coagulating agent ได้ดี นอกจากนี้มีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดแอสติก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ไคโตซานใช้ประโยชน์ได้สูงกว่าไคติน และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในไคโตซานมีสมบัติที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนัก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน

(ที่มา: <http://www.wellable.com/product/chitosan.gif>)

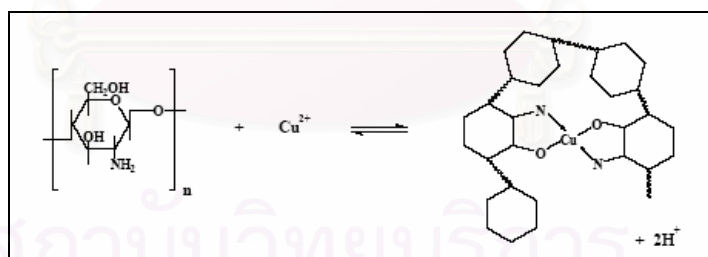
IR spectra ของไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 IR spectra ของไคตินและไคโตซาน (A) ไคติน (B) ไคโตซาน
(ที่มา: <http://dalwoo.com/chitosan/spectra.htm>)

ความสามารถของไคตินและไคโตซานในการรวมกับ Alkali และ Alkaline metals จะน้อยมาก แต่ Transition-metal ions ของแถวแรก เช่น สังกะสี นิกเกิล และทองแดง จะเกิดคีเลตได้ดีกับไคโตซาน ความสามารถในการเกิดคีเลตของไคโตซานสูงกว่าไคติน เนื่องจากมีหมู่แอมิโนมากกว่า

ไคโตซานเกิดคีเลตกับไอออนโลหะ โดยปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมาดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดคีเลตของทองแดงกับไคโตซาน (Schmuhl และคณะ, 2001)

2.2 แหล่งของไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดตามธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส เราจะพบตามผนังเซลล์ของพืชและสัตว์ เช่น ในยีสต์ที่ใช้ทำเบียร์และไวน์ ในพืชบางชนิดอาจจะมีไคตินแทนเซลลูโลสหรือเกิดร่วมกันกับเซลลูโลสก็ได้

ส่วนในสัตว์จะมีไคตินอยู่เป็นคิวติเคิล (Cuticle) ที่ผนังของอพิที่เลียม (Epithelium) ส่วนมากเราจะพบไคตินในเปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง แมลง เชื้อรา เชื้อยีสต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์ที่มีโครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ของสัตว์ใน Phylum Arthropod โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Class Crustacean ได้แก่ กุ้ง ปู กุ้ง ตลอดจนใน Class Insect ได้แก่ แมลงสาบ ตัวด้วง เป็นต้น ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆ จะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ได้มีผู้รายงานว่ (วิสิฐ จະวะลิต และลูกจันทร์ ภัคัรขพันธ์, 2533) หากนำสิ่งทีเปลือกทิ้งจากการแปรรูป กุ้ง ปู เคย (Krill) ทั่วโลกมารวมกัน จะได้ไคตินถึง 150 ล้านกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knoor, 1984)

| ชนิด | ปริมาณไคติน (%) | ชนิด | ปริมาณไคติน (%) |
|-----------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| <u>สัตว์น้ำเปลือกแข็ง (Crustaceans)</u> | | <u>แมลง (Insects)</u> | |
| ปู (Cancer) | 72.1 ^c | แมลงสาบ (Periplaneta) | 2.0 ^a |
| ปู (Carcinus) | 0.4-3.3 ^a | แมลงสาบ (Blatella) | 18.4 ^c |
| | 8.29 ^b | | 10 ^b |
| | 64.2 ^b | | 35 ^c |
| ปูใหญ่ (Paralithodes) | 35 ^b | แมลงปีกแข็ง (Colcoptera) | 5-15 ^b |
| ปูน้ำเงิน (Callinectes) | 14 ^a | | 27-35 ^c |
| ปูแดง (Pleuroncodes) | 1.3-1.8 ^b | แมลงปีกแข็ง (Tenebrio) | 2.1 ^a |
| กุ้ง (Crangon) | 5.8 ^b | | 4.9 ^b |
| | 69.1 ^c | | 31.3 ^c |
| กุ้งลอบสเตอร์ (Nephropes) | 69.8 ^c | แมลงวัน (Dipteral) | 54.8 ^c |
| | 6.7 ^b | ผีเสื้อ (Pieris) | 64 ^c |
| กุ้งลอบสเตอร์ (Homarus) | 60.8-77.0 ^c | ตั๊กแตน (Grasshoppers) | 2-4 ^c |
| เพรียง (Lepas) | 58.3 ^c | | 20 ^c |
| กุ้ง (Alaskan shrimp) | 28 ^d | ตัวไหม (Bombyx) | 44.2 ^c |
| | | ตัวไหม (Calleria) | 33.7 ^c |
| <u>เห็ด รา (Fungi)</u> | | <u>สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังแต่มีเปลือก</u> | |
| <i>Aspergillus Niger</i> | 42.2 ^e | <u>แข็ง (Molluscan Organs)</u> | |
| <i>Penicillium notatum</i> | 18.5 ^e | เปลือกหอยกาบ (Clamshell) | 6.1 ^b |
| <i>Penicillium chrysogenum</i> | 20.1 ^e | เปลือกหอยนางรม (Oyster shell) | 3.6 ^a |
| <i>Saccharomyces cereviciae</i> | 2.9 ^e | แกนปลาหมึก (Squid, skeletal pen) | 41.0 ^c |
| <i>Mucor rouxii</i> | 44.5 ^e | เคย (Krill, deproteinized shell) | 40.2 ^c |

| | | | |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| <i>Lactarius vellereus</i> | 19.0 ^e | แมลงปีกแข็ง (May) | 16 ^b |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|

^a น้ำหนักเปียก (Wet body weight)

^b น้ำหนักแห้ง (Dry body weight)

^c น้ำหนักเปลือกนอก (Organ weight of cuticle)

^d น้ำหนักแห้งของเปลือกนอกทั้งหมด (Total dry weight of cuticle)

^e น้ำหนักแห้งของผนังเซลล์ (Dry weight of the cell wall)

ตารางที่ 2.2 การประมาณปริมาณผลผลิตทั่วโลกของสารประเภทไคตินจากแหล่งต่างๆ (วิธีสุระ
วะลิต และลูกจันทร์ ภัคร์ชพันธ์, 2533)

| แหล่งของไคติน | ปริมาณ ผลผลิตที่ได้ (10 ³ ตัน) | ของเหลือทิ้งจากการย่อยไคติน (Chitinaceous waste) | | | | |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| | | สัดส่วน ของ ผลผลิตที่ ได้ (%) | น้ำหนักเปียก (10 ³ ตัน) | ปริมาณ ของแข็ง (%) | น้ำหนักแห้ง (10 ³ ตัน) | ปริมาณ ไคตินที่ คาดว่าจะ ได้ ^c |
| สัตว์น้ำเปลือกแข็ง (Shellfish) ^{d,e} | 1,700 | 50-60 | 468 | 30-35 | 154 | 39 |
| เคย (Krill) ^f | 18,200 | 40 | 3,640 | 22 | 801 | 56 |
| หอยกาบคู่/หอยนางรม (Clam/oyster) ^e | 1,390 | 65-85 | 521 | 90-95 | 482 | 22 |
| ปลาหมึก (Squid) ^{e,g} | 660 | 20-40 | 99 | 21 | 21 | 1 |
| เห็ดรา (Fungi) ^h | 790 | 100 | 790 | 20-26 | 182 | 32 |
| แมลง (Insects) | ละได้ | - | - | 21-26 | - | - |
| รวมทั้งหมด | 22,740 | | 5,118 | | 1,640 | 150 |

^a ประมาณค่าเฉลี่ยพื้นฐาน หน่วยเป็น 10³ ตัน

^b สมมติให้เป็นครึ่งหนึ่งของผลผลิตที่ได้ทั้งหมดในกระบวนการ ยกเว้นเห็ดราที่ผ่านขั้นตอนการหมักแล้ว

^c คำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยผลผลิตไคตินที่ได้

^d สัตว์น้ำเปลือกแข็งประกอบด้วยปู กุ้งฝอย กุ้ง กุ้งลอบสเตอร์ และกุ้งทะเล

^e ปริมาณเฉลี่ยที่จับขึ้นมาได้ในรอบ 5 ปี (1970-1974)

^f ปริมาณที่คาดว่าจะจับขึ้นมาได้ของ FOA (Rome)

^g คำนวณได้จากการบริโภคซึ่งคิดเป็น 50% ของสัตว์น้ำ

^h ผลผลิตพลอยได้ของกระบวนการกรดซิตริกและปฏิชีวนะ สมมติให้ปริมาณที่ได้จากกรดซิตริกและใยราสมมูลกัน ของเหลือทิ้งจากปฏิชีวนะเป็น 50% ไม่รวมเห็ดรา และผลผลิตทั่วโลกเป็นสองเท่าได้มาจากประเทศสหรัฐอเมริกา

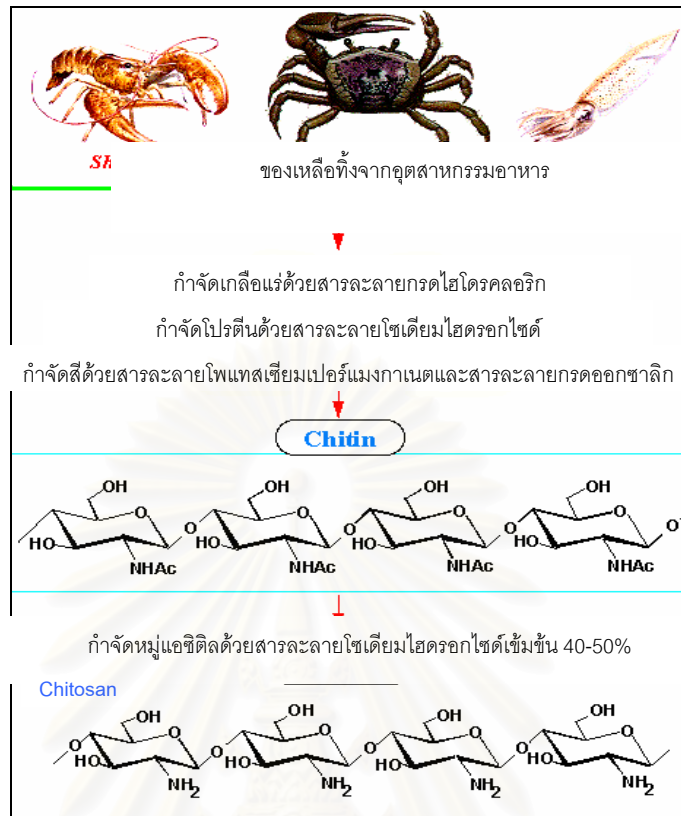
2.3 กระบวนการเตรียมไคตินและไคโตซาน (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547)

การเตรียมไคตินและไคโตซานขึ้นกับวัตถุดิบและสารประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากเปลือกกุ้งและเปลือกปูที่เหลือทิ้ง องค์ประกอบของวัตถุดิบส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนและแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้จะมีฟอสฟอรัสและไขมันต่างๆ โปรตีนสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไนตริก ส่วนรงควัตถุสามารถแยกออกได้โดยการใช้สารฟอกสี

กระบวนการเตรียมไคตินจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนการกำจัดไขมันและเม็ดสี (Elimination of liquid and pigments)

กระบวนการเตรียมไคโตซาน มีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียวคือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่แอซิติล (Deacetylation) ในไคติน ด้วยสารละลายด่างร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



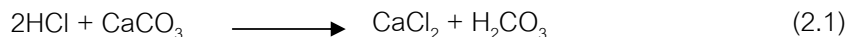
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคตินและไคโตซาน
(ที่มา: <http://user.chollian.net/~chitin/prechitosan.gif>)

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อแยกไคตินและไคโตซาน เริ่มจากการนำวัตถุดิบ ได้แก่ เปลือกกุ้ง เปลือกปู หรือแกนปลาหมึกมาล้างให้สะอาดหลายๆครั้ง ในกรณีที่ต้องเก็บสะสมวัตถุดิบไว้ระยะหนึ่ง ควรนำเปลือกที่ล้างสะอาดแล้วไปต้มและล้างด้วย Antioxidant solution เช่น กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) และโซเดียมไบซัลเฟต (sodium bisulfate) เป็นต้น (ที่มา: <http://www.saudi-fisheries.com/EN/Company/Facts/checking.htm>) หลังจากนั้นอาจมีการลดขนาด เช่น บดละเอียด

2.3.2 การกำจัดแร่ธาตุ

ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ โดยการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเป็นตัวละลายแร่ธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีกลไกปฏิกิริยา ดังสมการ (2.1)



นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดซัลฟิวรัส (H_2SO_4) ในการกำจัดแร่ธาตุสำหรับกระบวนการเตรียมไคตินในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ ลดปฏิกิริยาการสูญเสียสภาพธรรมชาติของไคติน เนื่องจากกรดซัลฟิวรัสเป็นกรดอ่อน และสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก (Recycle) ตลอดจนได้ผลพลอยได้หลายอย่าง เช่น แคลเซียมซัลไฟต์ (CaSO_3) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งสามารถนำไปขายได้

2.3.3 การกำจัดโปรตีน

ขั้นตอนการกำจัดโปรตีน โดยการใช้สารละลายต่าง ส่วนมากนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ การลดขนาดของวัตถุดิบมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดโปรตีน นอกจากการใช้สารละลายต่างในการกำจัดโปรตีนแล้ว ยังมีการใช้เอนไซม์ในการกำจัดโปรตีนด้วย ซึ่งจะทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานลดลง

2.3.4 การกำจัดสีและไขมัน

ขั้นตอนการกำจัดสีและไขมัน โดยมากนิยมใช้ตัวทำละลายต่างๆ เช่น แอลกอฮอล์ แอซีโตน และอีเทอร์ หรือสารละลายเพอร์แมงกาเนต ซึ่งขั้นตอนการกำจัดสีและไขมัน อาจทำในระหว่างขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีน หรือภายหลังจากการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนแล้ว อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการกำจัดสีและไขมันนี้ไม่จำเป็นต้องทำได้

2.3.5 การกำจัดหมู่แอซิติล

ขั้นตอนการกำจัดหมู่แอซิติล นิยมใช้สารละลายต่างร้อน โดยสารละลายที่นิยมใช้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารละลายชนิดอื่น เช่น สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงหรือดีกว่า

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของโคโตซาน (ทิพย์วิมล เกิดอ้อม, 2547)

2.4.1 ชนิดของสารละลายต่าง

โดยทั่วไป สารละลายต่างที่นิยมใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลในโคตินคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ในการกำจัดหมู่แอซิติลด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้สารละลายโคโตซานมีความหนืดสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.4.2 ความเข้มข้นของสารละลายต่าง

นิยมใช้ต่างในรูปของสารละลายกำจัดหมู่แอซิติล โดยทั่วไปมีความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้ต่างในรูปอื่น เช่น Alkaline fusion โดยหลอมโคติน 30 กรัม กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 150 มิลลิกรัม ใน Nickel crucible ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้ได้มีการเตรียมโคโตซานในหลอดทดลอง โดยผสมโคติน 10-50 มิลลิกรัม กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 มิลลิกรัม และ Benzenethiol 100 มิลลิกรัม ละลายในน้ำ 1 มิลลิกรัม แล้วใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้โคโตซานที่ผลิตได้สูญเสียสภาพธรรมชาติ เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลเป็นสภาวะที่รุนแรง ทั้งอุณหภูมิที่สูงและเวลาค่อนข้างนาน แต่การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป มีผลต่อสมบัติการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดอ่อน โดยจะทำให้ละลายได้ยากขึ้นหรือไม่สามารถละลาย

2.4.3 อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอซิติล

อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอซิติล โดยมากมักจะทำที่อุณหภูมิต่ำค่อนข้างสูง ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส และที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เช่น ช่วงอุณหภูมิ 145-150 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราเร็วในการกำจัดหมู่แอซิติลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกือบ 2 เท่า โคโตซานที่ได้หลังจากการกำจัดหมู่แอซิติลที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอซิติลที่สูงเกินไปจะทำให้โคโตซานที่ผลิตได้เสียสภาพธรรมชาติ และทำให้โมเลกุลของโคโตซานเกิดปฏิกิริยา Degradation ได้ ทำให้มวลโมเลกุลลดลง ถ้าใช้ความเข้มข้นของ

สารละลายต่างสูงเกินไป อุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลควรลดลง เพื่อไม่ให้ภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลรุนแรงเกินไป

2.4.4 เวลาในการกำจัดหมู่แอซิติล

ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติล ในการเตรียมโคโคซานโดยใช้เวลาต่างๆ ดังนี้ คือ 0.5 1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลมากขึ้น โคโคซานจะมีปริมาณหมู่แอซิติลและขนาดของมวลโมเลกุลลดลง แต่มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) สูงขึ้น และพบว่าการใช้เวลาในการกำจัดหมู่แอซิติลมากกว่า 2 ชั่วโมง ไม่ได้มีผลต่อการเพิ่ม Degree of deacetylation มากนัก เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลเป็นปัจจัยที่ใช้ในการแบ่งเกรด (Grade) หรือคุณภาพต่างๆ อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกำจัดหมู่แอซิติล เช่น ความเข้มข้นของสารละลายต่างและอุณหภูมิ เป็นต้น

2.4.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันอันเนื่องมาจากออกซิเจนในอากาศ มีผลต่อขนาดของโมเลกุลของโคโคซาน โดยถ้ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น หรือมีแก๊สออกซิเจนปรากฏในขั้นตอนระหว่างการกำจัดหมู่แอซิติลจะทำให้โคโคซานเกิดปฏิกิริยา Degradation ได้ ทำให้โคโคซานที่ผลิตได้มีมวลโมเลกุลลดลง และพบว่าผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนการกำจัดหมู่แอซิติลโดยเติม Oxidizing agent เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ทำให้โคโคซานที่ผลิตได้มีความหนืดลดลง ดังนั้นในขั้นตอนการกำจัดหมู่แอซิติลจึงจำเป็นต้องทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน โคโคซานที่ผลิตภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีขนาดโมเลกุลและความหนืดสูงกว่าโคโคซานที่ผลิตภายใต้บรรยากาศธรรมดา นอกจากนี้อาจมีการเติมสารดักจับออกซิเจน เช่น Thiophenol ซึ่งสามารถดักจับออกซิเจนแล้วยังมีผลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย

2.4.6 คุณภาพโคโคติน

คุณภาพโคโคติน มีผลต่อคุณภาพโคโคซานที่เตรียมได้ เนื่องจากโคโคตินเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมโคโคซาน สมบัติของโคโคตินมีผลต่อการกำจัดหมู่แอซิติลที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดของโคโคตินและความหนาแน่นของโคโคติน โดยมีผลต่ออัตราการ Penetrate ของต่างในขั้นตอนการกำจัด

หมู่แอซิติลเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปสมบัติและคุณภาพของโคโคตินจะขึ้นกับปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แหล่งของโคโคตินหรือวัตถุดิบที่นำมาเตรียมโคโคติน และกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมโคโคติน

2.5 สมบัติของโคโคซาน

สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคโคซาน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคโคซาน

| ลักษณะเฉพาะ | โคโคซาน |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| น้ำหนักมวลโมเลกุล (ดาลตัน) ^a | $(1-5) \times 10^5$ (ผลิตภัณฑ์ทางการค้า) |
| ระดับสายโซ่ (Degree of polymerization) เฉลี่ยจากจำนวนหน่วยใน 1 โมเลกุล | 600-1800 |
| พีค X-ray diffraction | 8°58'-10°26' 19°58'-20°00' |
| องค์ประกอบอุดมคติ (องค์ประกอบเอมพิริคัล) | C ₆ H ₁₁ O ₄ N |
| ปริมาณไนโตรเจน (%) (ผลิตภัณฑ์ทางการค้า) | 7-9.5 |
| % ความชื้น (ผลิตภัณฑ์ที่แห้งในอากาศ) | 2-10 |
| ระดับการกำจัดหมู่แอซิติล (%) | 60-80 |
| ความหนืด (cP) | 250-2500 (1% ในกรดแอซิติค) ไม่คงตัวและมีลักษณะฉีกเล็กๆ |
| % เถ้า ที่อุณหภูมิ 900°C | <1.0 |
| การเปลี่ยนสถานะของโลหะ (Transition metals) ^b , µg/g | <0.5 ^c |

^a น้ำหนักโมเลกุลและระดับสายโซ่ (DP) จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ผลิตภัณฑ์ทางการค้าจะมีน้ำหนักโมเลกุลและระดับสายโซ่ต่ำเนื่องจากการย่อยสลายที่เกิดระหว่างขั้นตอนการสกัด

^b การเอาปริมาณเหล็ก (Fe) ออกแต่ไม่เกิดความเสียหายขึ้น

^c โคโคซานที่ได้จากเปลือกปูประกอบด้วย (กรัม/กรัม): V=0.12; Cr=0.04; Mn=0.09; Ni=1.3; Cu=1.03; Ag=0.02; Cd=0.22; Hg=0.025 และ Pb=0.15

2.5.1 การละลาย (Solubility) (Muzzarelli R.A.A, 1977)

โคโตซานจะไม่ละลายน้ำที่มีค่าพีเอชสูงกว่า 6.5 ตัวทำละลายที่เป็นด่างและกรดเกลือที่เข้มข้น เช่นกรดซัลฟิวริก โคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดแอสติติก สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิกที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2 - 100 โดยปริมาตร (D. Knoor, 1984) และในภาวะที่เป็นกรดนี้มีหมู่เอมีนอิสระ ($-NH_2$) จะถูกโปรตอนเตไปอยู่ในรูปของหมู่ Cationic amino ($-NH^+$) (Muzzarelli RAA, 1977) นอกจากนี้โคโตซานยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอนินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายกรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความสามารถในการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสามารถในการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆกัน (Muzzarelli R.A.A, 1977)

| ชนิดของกรด | ความเข้มข้นของสารละลายกรด | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|----|-----|-----|------|
| | 1% | 5% | 10% | 50% | >50% |
| กรดแอสติติก (Acetic acid) | + | + | + | + | |
| กรดแอดิพิค (Adipic) | + | | | | |
| กรดซิตริก (Citric) | - | | | | |
| กรดฟอร์มิก (Formic) | + | + | + | + | + |
| กรดแลคติก (Lactic) | + | + | + | | |
| กรดมาลิก (Malic) | + | + | + | | |
| กรดทาร์ทาลิก (Tartaric) | - | | + | | |
| กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) | + | - | - | | |
| กรดไนตริก (Nitric) | + | - | - | | |
| กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) | - | - | - | | |
| กรดซัลฟิวริก (Sulfuric) | - | - | - | | |

หมายเหตุ

- + แสดงว่าไคโตซานสามารถละลายได้
- แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้
- * แสดงว่าไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก แต่สามารถละลายได้ในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นกรดน้อยกว่า 0.5%

2.5.2 ความหนืด (Viscosity) (Muzzarelli R.A.A, 1977)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสติล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสติล ซึ่งพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมากและเวลานาน จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสติลรุนแรงโดยจะมีผลทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสติลทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งพบว่าทำให้มีปัญหาในการผลิตไคโตซานที่มีมวลโมเลกุลสูง

2.6 การใช้ประโยชน์จากไคโตซาน

ในการใช้ประโยชน์จากไคโตซานสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางโดยอาศัยคุณลักษณะทั่วไป และคุณลักษณะพิเศษเฉพาะของมัน แบ่งได้เป็นกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 การใช้ประโยชน์จากโคโคซาน (Li และคณะ, 1992)

| การใช้ประโยชน์ | ตัวอย่าง | การใช้ประโยชน์ | ตัวอย่าง |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การบำบัดน้ำ (Water Treatment) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ การกำจัดไอออนโลหะหนัก ◆ ฟลอคกูแลนต์/โคแอกกูแลนต์: <ul style="list-style-type: none"> - โปรตีน (Protein) - สี (Dyes) - กรดแอมิโน (Amino Acids) ◆ การกรอง (Filtration) | เทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ การตรึงเอนไซม์ ◆ การคัดแยกโปรตีน ◆ โครมาโทกราฟี ◆ การฟื้นฟูเซลล์ ◆ การตรึงเซลล์ ◆ ชักดูโคส |
| อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ (Pulp and Paper) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ การบำบัดพื้นผิว ◆ กระดาษถ่ายภาพ ◆ กระดาษก๊อปปี้คาร์บอน | อุตสาหกรรมเกษตร (Agriculture) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ การเคลือบเมล็ดพืช ◆ การเคลือบใบ ◆ ทำปุ๋ย ◆ ควบคุมการหลังสารเคมีของพืชผล |
| อุตสาหกรรมยา (Medical) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ ผ้าพันแผล, ฟองน้ำ ◆ หลอดเลือดเทียม ◆ ควบคุมคอเลสเตอรอลในเลือด ◆ ยับยั้งการเกิดเนื้องอก ◆ เยื่อแลกเปลี่ยน ◆ ยับยั้งการเกิดหินปูนและโรคฟัน ◆ ป้องกันผิวหนัง/ผิวหนังเทียม ◆ คอนแทคเลนส์ ◆ ควบคุมการออกฤทธิ์ของยา ◆ การบำบัดโรคกระดูก | อุตสาหกรรมอาหาร (Food) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ กากกำจัดสี ของแข็ง และกรด ◆ ช่วยในการถนอมอาหาร ◆ ช่วยให้สีคงสภาพเดิม ◆ ช่วยเพิ่มปริมาณในอาหารสัตว์ |
| อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (Cosmetics) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ แบ่งแต่งหน้า ◆ น้ำยาเคลือบเล็บ ◆ ให้ความชุ่มชื้น ◆ โลชันอาบน้ำ ◆ ครีมทาหน้า มือ และร่างกาย ◆ ยาสีฟัน ◆ สารช่วยเพิ่มการเกิดฟอง | เยื่อแลกเปลี่ยน (Membranes) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ รีเวิร์สออสโมซิส ◆ ควบคุมการซึมผ่าน ◆ การแยกตัวทำลาย |

2.7 เรซิน (ที่มา: <http://www.plasticsindustry.org/industry/defs.htm>)

เรซินเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับสารเคมี โดยจะมีการผสมองค์ประกอบของสารอินทรีย์มีลักษณะเป็นสารกึ่งของแข็งหรือของแข็ง หรือเป็นการสังเคราะห์โดยธรรมชาติ โดยปกติจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะไม่แสดงค่าจุดหลอมเหลว เป็นวัสดุที่มีฟิล์มแข็งหลังจากที่มีการระเหยสารเคมี

พลาสติกเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสมบัติและเทคโนโลยีการออกแบบ ผู้บริโภคมักนิยมใช้พลาสติกร่วมกับวัสดุชนิดอื่น เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของชนิดพลาสติก เรามักนิยมเรียกว่า “เรซิน” ต่อไปนี้จะเป็นการผลิตและการใช้ประโยชน์

โดยปกติพลาสติกเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพอลิเมอร์สูง (เช่น ประกอบด้วยโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ขนาดใหญ่) ซึ่งเกิดในพลาสติกขณะที่หรือหลังจากที่มีการเปลี่ยนสถานะจากโมเลกุลเคมีขนาดเล็กเป็นของแข็ง โมเลกุลสายโซ่ขนาดใหญ่เกิดเป็นโมเลกุลสายสั้นในขณะเกิดปฏิกิริยา เช่น พอลิเมอไรเซชัน เมื่อหน่วยมอนอเมอร์รวมกันเป็นพลาสติกที่มีพอลิเมอร์เหมือนกัน (Homopolymer) เช่น การผลิตจากมอนอเมอร์เอทิลีน เมื่อเกิดการรวมหน่วยมอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งในกระบวนการผลิต ได้แก่ เอทิลีน (Ethylene) และโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งพลาสติกเป็นพอลิเมอร์รวม (Copolymer)

พลาสติกแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) และเทอร์โมเซต (Thermosets) เรซินเทอร์โมพลาสติกประกอบด้วยโมเลกุลยาว ซึ่งสายโซ่ด้านข้างหรือหมู่จะไม่จับกับโมเลกุลตัวอื่น (ได้แก่ เมื่อไม่มีการดัดแปร) ดังนั้นจึงสามารถที่จะหลอมและขึ้นรูปได้ด้วยความร้อนและความเย็น สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีเมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปเม็ดเล็ก (pellets) ซึ่งใช้เสริมในกระบวนการผลิตหรือในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (เช่น สี, ตัวนำ เป็นต้น) ช่วงอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกจะจำกัดซึ่งถ้าเกินจะสูญเสียสมบัติทางกายภาพและการหลอมเหลว

เทอร์โมเซตพลาสติก จะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างเชื่อมขวางซึ่งไม่สามารถนำกลับมาหลอมใหม่หรือใช้ในกระบวนการผลิตได้ การกำจัดเทอร์โมเซตหรือใช้เติมในผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูก หรืออาจใช้ในการเติมสารอินทรีย์ เช่น การเชื่อมโลหะ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เทอร์โมเซตจะอยู่ในรูปของของเหลวหรือของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง ไม่สามารถรวมในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยปราศจากความดันและพอลิเมอไรเซชันโดยใช้เคมีหรือความร้อน

เรซินพลาสติก สามารถทำได้จาก Acrylics, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Cellulosics, Epoxy, Melamine-Formaldehyde, Petroleum Resins, Polyethylene, และ Polyvinyl Acetate (PVAc) & Other Vinyls เช่น Polyalcohol เป็นต้น

2.8 การเกิดโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547)

การเกิดโครงร่างตาข่ายส่วนใหญ่จะมีผลต่อสมบัติพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดน้อย จะมีสมบัติอ่อนนุ่ม (Soft) และยืดหยุ่น (flexible) คล้ายยาง (elastomer) แต่ถ้าพอลิเมอร์นั้นเกิดโครงร่างตาข่ายมาก วัสดุนั้นจะแข็ง (rigid)

สารเชื่อมขวาง (Cross linking agent) เป็นสารที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย สารเชื่อมขวางของไคโตซานที่นิยมใช้ในปัจจุบันอาจจัดได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ Glutaraldehyde, Glyoxal, Epihalohydrin, Succinaldehyde, 1, 10-decanedial, Trichlorotriazine, Benzoquinone และ Bisepoxiranes ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนี้จะเกิดภายในโครงสร้างของไคโตซาน โดยโมเลกุลเหล่านี้จะสามารถแพร่ผ่าน (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานได้

สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ดีไฮด์มากกว่า 1 หมู่ (Polyaldehyde) เช่น Dextran Dialdehyde, Starch dialdehyde, Dialdehyde of Carageenan และ Dialdehyde of Alginic acid สารประกอบเหล่านี้เป็น Oxidized Polysaccharide Polyaldehyde ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของไคโตซาน สารเหล่านี้มีสายโซ่โมเลกุลยาวทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานได้

2.9 การดูดซับ (Adsorption) (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547 และ Vasanth และคณะ, 2004)

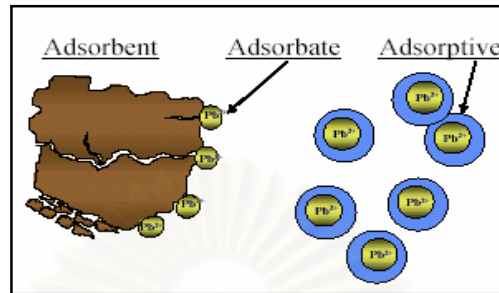
การดูดซับเป็นการทำให้ตัวถูกดูดซับเข้มข้นขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวตัวดูดซับเนื่องมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ได้แก่

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจาย (diffusion) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิวในรูปพหุระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ ตัวดูดซับ, ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย

(ที่มา: <http://soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf>)

2.9.1 ลักษณะการดูดซับ (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547 และ Vasanth และคณะ, 2004)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับประเภทนี้จะไม่มีความจำเพาะของการดูดซับที่แน่นอนและสามารถย้อนกลับได้ จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นต้องมีปริมาณของตัวถูกดูดซับมากกว่าตัวดูดซับ และความร้อนที่ใช้ในการดูดซับ 1 กิโลแคลอรีต่อโมล เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ดังนั้นตัวถูกดูดซับจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ จะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรืออุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (reversible) การดูดซับนี้ สารถูกดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า การดูดซับแบบวานเดอร์วาลส์ (van der wall's adsorption) แรงดึงดูดของการดูดซับทางกายภาพ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (van der wall's force) รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตย์บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ

แรงวานเดอร์วาลส์ อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อน ๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะกระทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม
2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorptions) เป็นการดูดซับที่ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสร้างพันธะระหว่างกัน มีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน จะเป็นการดูดซับแบบขั้นเดียว จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นขึ้นอยู่กับทั้งตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับและความร้อนที่ใช้ในการดูดซับ 50-100 กิโลแคลอรีต่อโมลเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ซึ่งไม่ขึ้นกับความดันมากนักและดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวจึงเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิปกติองค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสามารถที่จะเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction)

ในช่วงสั้น ๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ดินเหนียว เนื่องจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1. เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางกายภาพ
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มาก และมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547)

ก. **ธรรมชาติของสารดูดซับ (Nature of the adsorption)** โดยเฉพาะพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (surface area and pore structure) และขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของสารดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ

ข. **ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)** ได้แก่ความสามารถในการละลาย น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล และความมีขั้วของโมเลกุล (polarity)

ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

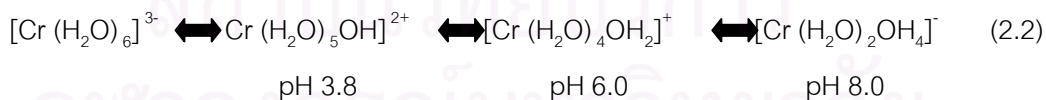
เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

ค. สภาพแวดล้อม

ผลของอุณหภูมิของสารละลาย (Effect of temperature) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับ

ผลของพีเอชของสารละลาย (Effect of pH) เนื่องจากพีเอชมีผลต่อรูปแบบ (species) ของโลหะ เช่น ไอออนของตะกั่ว จะมีรูปแบบต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายที่พีเอชต่ำกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} เป็นส่วนใหญ่ แต่ที่พีเอชสูง ๆ ไอออนของตะกั่วจะมีการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบประเภท hydroxocomplexes ชนิดต่าง ๆ เช่น Pb^{2+} , $Pb(OH)^+$, $Pb(OH)_2$ และ $Pb_3(OH)_4^{2+}$ ในกรณีของ Cr^{3+} พีเอชจะทำให้ Cr^{3+} บางรูปแบบมีประจุเปลี่ยนจากบวกเป็นลบได้ดังสมการ (2.2)



2.9.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption equilibrium and adsorption isotherm) (ที่มา: <http://adsorption.org/awm/ads/Iso-list.htm>)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จะมี

การคายการดูดซับเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายตัวจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆจะเป็นคุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และพีเอชของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) ณ อุณหภูมิคงที่

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้นำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับด้วยดินคือสมการแลงเมียร์ (Langmiur Equation) และสมการเฟรנדลิช (Freundlich Equation)

2.9.4 สมการเฟรנדลิช (Albers, 2003 และ Kathikeyyan และคณะ, 2004)

คิดค้นโดยนักเคมีฟิสิกส์ชื่อ เฮอร์เบิร์ต ฟินเลย์ เฟรנדลิช เป็นการดูดซับแบบจริงบนพื้นผิวแบบต่างชนิดกัน เช่น การดูดซับแบบหลายชั้น (ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>) สมการเฟรנדลิชถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซและตัวถูกละลายในสารละลาย เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลองซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ในรูปของลอการิทึม (Logarithmic) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.3)

$$q_e = \frac{x}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.3)$$

| | | | |
|-------|---|-----|------------------------------------------------------|
| เมื่อ | K | คือ | ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ |
| | n | คือ | ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม) |

จากสมการของเฟรנדลิช สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (2.4)

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2.4)$$

เมื่อนำค่า $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ กับ $\log(C_e)$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ เป็นแกน y และ $\log(C_e)$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$

2.9.5 สมการแลงเมียร์ (Albers, 2003 และ Kathikeyyan และคณะ, 2004)

สมการของแลงเมียร์ ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1918 (ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>) เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิวและถูกประยุกต์ใช้กับดินครั้งแรก โดย Fride และ Shapiro ในปี ค.ศ. 1956 และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ. 1957 เพื่ออธิบายการดูดซับฟอสเฟตบนดิน ต่อมาจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ สมการของแลงเมียร์ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำเช่นเดียวกับสมการของเฟรנדลิช เป็นสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบต่างชนิดกันทั่วไป (การดูดซับ) สำหรับกระบวนการมากกว่า 1 ขั้นตอน กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในระบบต่างชนิดกันมี 2 ขั้นตอน คือ ทางกายภาพ (การถ่ายโอนมวลและความร้อน) และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา

สมมติฐานของสมการแลงเมียร์

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน
2. พื้นทีนั้น ๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer)
3. จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุก ๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมมติฐานเหล่านี้ส่วนใหญ่ จะไม่นำมาใช้อธิบายการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น Heterogeneous เช่น ดิน เพราะสมมติฐานของสมการแลงเมียร์ จะใช้ได้ดีกับการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น homogeneous สมการแลงเมียร์ สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.5)

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{KQ^0 C_e}{1 + K C_e} \quad (2.5)$$

| | | |
|-----------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ x | คือ | ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) |
| m | คือ | ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม) |
| C_e | คือ | ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| Q^0 | คือ | ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมโคโคไตซาน) |
| K | คือ | ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือเป็นค่าคงที่ของความร้อนของการดูดซับ |

จากสมการของแลงเมียร์ สามารถเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (2.6)

$$\left(\frac{1}{(x/m)}\right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0} \left(\frac{1}{C_e}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\left(\frac{1}{(x/m)}\right)$ เป็นแกน y และ $\left(\frac{1}{C_e}\right)$ เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{KQ^0}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$

2.10 การดูดซับแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode) (ที่มา: <http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html>)

ในการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวที่มีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง

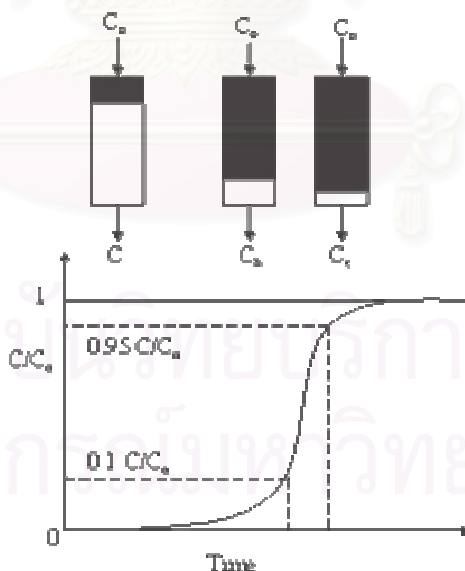
2.10.1 ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

เมื่อน้ำที่มีสารที่ต้องการดูดซับปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ขอบเขตการถ่ายโอนมวล เกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องและสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารถูกดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในภาวะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า

ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (MTZ, Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของสารถูกดูดซับ และลักษณะของการดูดซับ

2.10.2 ลักษณะ Breakthrough (Breakthrough Characteristics)

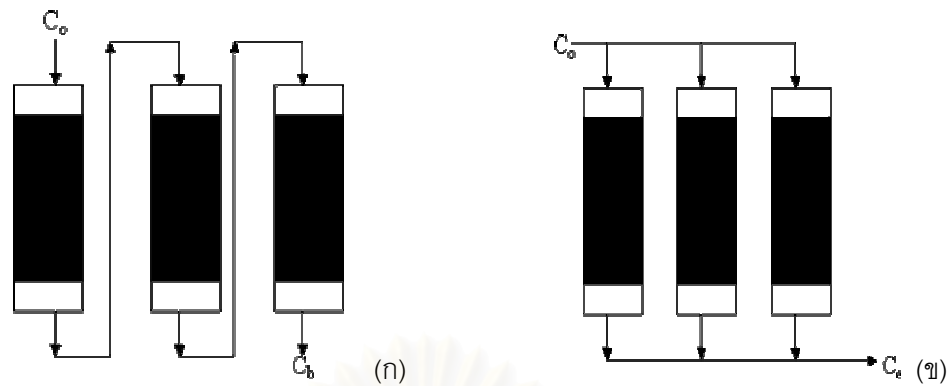
ลักษณะ Breakthrough เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังรูปที่ 2.7 แสดงรูปทั่วไปของเส้นโค้ง Breakthrough จากรูป น้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณสารถูกดูดซับต่ำ สารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับในชั้นต้นๆ ความเข้มข้นที่ออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้น C เมื่อของเหลวไหลผ่านปริมาณมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนความเข้มข้นที่ออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้น C_0 ขึ้นของตัวดูดซับใกล้เคียงสภาพปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาเข้า ความเข้มข้นที่ออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้น C_0 ($C_0 = C_0$) ลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นแบบตัวเอส (S shaped curve) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าเป็น C_0 ลักษณะการดูดซับสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบอนุกรม (series) และแบบขนาน (parallel) ดังรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข)



รูปที่ 2.7 เส้นโค้ง Breakthrough ในการดูดซับแบบคอลัมน์

(ที่มา: <http://www.eco-web.com/cgi->

[local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html](http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html))



รูปที่ 2.8 การต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ (ก) แบบอนุกรม (ข) แบบขนาน

(ที่มา: [http://www.eco-web.com/cgi-](http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html)

[local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html](http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html))

2.11 อุตสาหกรรมชุบโลหะ

(ที่มา: <http://www.bergen.org/AAST/Projects/RapidPrototyping/define.html>)

อุตสาหกรรมชุบโลหะหนักเป็นอุตสาหกรรมที่เพิ่มคุณค่าและประโยชน์ให้กับวัสดุ เช่น การชุบด้วยนิกเกิล ป้องกันการกัดกร่อน และการชุบทองเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ เป็นต้น โดยกระบวนการที่ใช้ในการชุบโลหะ ต้องใช้โลหะหนัก

การชุบโลหะคือ วิธีการนำโลหะมาเคลือบที่ผิววัสดุ มีหลายเหตุผลในการชุบบนผิวของวัตถุ สามารถนำไปใช้กับวัสดุที่มีผิวหยาบได้เกือบทั้งหมด พื้นผิวที่ทำการชุบโดยทั่วไปจะเป็นโลหะและพลาสติก การชุบมีหลายเหตุผลที่แตกต่างกัน วัตถุประสงค์ที่ทำการชุบเพื่อ Sturdiness และทำให้ที่ชั้นผิวมีลักษณะที่แข็งขึ้น สำหรับการชุบนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อน

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชุบโลหะในประเทศไทยมีอยู่เพียงไม่กี่วิธี ได้แก่ Electroplating, electroless plating, metal spraying and vacuum metallizing แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ electroplating โดยจะแสดงรายละเอียดของ Electro Nickel Plating

2.11.1 ทฤษฎีและหลักการ

สำหรับทฤษฎีการชุบโลหะขึ้นอยู่กับประจุบวก, การนำไฟฟ้า และการทำปฏิกิริยาของโลหะที่ใช้ในการชุบและอิเล็กโทรด กรบวนการชุบโลหะแบ่งได้ 4 ส่วนที่สำคัญคือ

- แคโทด เป็นอิเล็กโทรดขั้วลบในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เมื่ออิเล็กตรอนลบเกิดขึ้น ไอออนบวกจะถูกขจัดออก ซึ่งถือเป็นวัตถุประสงค์ในการชุบโลหะ
- แอโนด เป็นอิเล็กโทรดขั้วบวกในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส เมื่อไอออนลบถูกขจัดออก ไอออนบวกจะเกิดขึ้น ซึ่งถือเป็นวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการชุบโลหะ
- อิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวกลางในการนำกระแสไฟฟ้าไปยังวัตถุ ซึ่งสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ กรด, เบส และเกลือ
- กระแสไฟฟ้าตรง เป็นไฟฟ้าที่ผ่านจากแอโนดไปยังอิเล็กโทรไลต์ โดยนำไอออนบวกจากการชุบโลหะไปยังแคโทด ซึ่งเป็นตัวนำไปรวมกับอิเล็กตรอนลบที่เกิดขึ้น จากนั้นย้ายไปเคลือบที่ผิวของโลหะ พันธะโลหะที่เคลือบจะไปยังแคโทด ถือได้ว่ากระบวนการชุบโลหะเป็นอันสำเร็จ

สำหรับทฤษฎีการชุบโลหะสามารถอธิบายด้วยสูตรง่าย ๆ ดังสมการ (2.7)



M คือ การชุบโลหะ (M ประจุจะเปลี่ยนไปขึ้นกับชนิดของโลหะ)

y คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่จำเป็นต้องขจัดออก

M⁰ คือ โลหะที่เคลือบสิ้นสุด

2.11.2 การนำไปใช้

การชุบโลหะสามารถนำไปใช้ได้หลายอย่าง โดยจะใช้เคลือบบน Chemically metalized plastics, steel, brass, zinc, and aluminum ผลิตภัณฑ์ที่มักพบ ได้แก่ ชิ้นส่วนรถยนต์, metallic decorations (like streamers). การชุบโลหะมักเกิดใช้เพื่อ

- เพื่อให้ผิวมีความสว่าง สดใสนิ่ง
- สามารถนำไฟฟ้าได้
- สามารถเคลือบที่ผิวของวัสดุได้มากมายหลายประเภท
- มีความทนทานต่อการใช้งานและการฉีกขาด
- ป้องกันการกัดกร่อน
- มีความยืดหยุ่นสูง

2.12 โลหะหนัก

โลหะหนักที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพราะปรากฏในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่โลหะหนักจะมีอันตรายยิ่งขึ้นถ้ามีในปริมาณมาก อันเนื่องมาจากอุตสาหกรรม โลหะหนักที่เป็นอันตราย ได้แก่ ปรอท สารหนู ทองแดง แบเรียม แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น แหล่งที่มามักจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เช่น โรงชุบโลหะ โรงงานฟอกหนัง โรงงานผลิตโซดาไฟ เป็นต้น ในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของทองแดง และตะกั่วที่สนใจในงานวิจัยนี้

2.12.1 ทองแดง (COPPER) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology (ATSDR)), 2005)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น หิน ทყาย และน้ำ เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อทั้งพืชและสัตว์(รวมทั้งมนุษย์) เนื่องจากมีความสำคัญต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงอาหารในร่างกาย เนื้อเยื่อและระบบประสาทของมนุษย์ ทองแดงสามารถปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดย การทำเหมืองแร่ การเกษตร โรงงานอุตสาหกรรม และการปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำโดยตรง ทองแดงนิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สายไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า ท่อขึ้นรูปเป็นแผ่นโลหะหรือดิ่งเป็นเส้น ทำโลหะผสมต่างๆ เช่น สัมฤทธิ์ ทองเหลือง แมงกานีส เป็นต้น ทองแดงปกติจะเป็นธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อยๆ เนื่องจากมีความจำเป็นต่อร่างกาย หากได้รับทองแดงในปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อร่างกาย หากได้รับทองแดงทางการหายใจทำให้เกิดการกัดกร่อนและระคายเคืองในจมูก ลำคอ เยื่อภายใน และจะกระจายเข้าไปทำอันตรายเส้นเลือดฝอย หากได้รับทองแดงโดยการกลืนกิน จะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียนระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารอย่างรุนแรง และท้องร่วง หากได้รับทองแดงในปริมาณมากสามารถทำลายตับและไต เกิดการตายเฉพาบางส่วนในตับและไตได้ ประสาทส่วนกลางถูกรบกวนและอาจทำให้เสียชีวิต หากมีทองแดงปนเปื้อนในน้ำ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้น้ำนั้นมีรสฝาด

2.12.2 ตะกั่ว (LEAD) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology (ATSDR)), 2005)

ตะกั่วเป็นโลหะอ่อนสีเทาเงิน หรือแกมม่น้ำเงิน เกิดขึ้นตามธรรมชาติในเปลือกโลก (Earth crust) ในระดับความเข้มข้นประมาณ 13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แหล่งสำคัญได้แก่ หินอัคนี และหินแปร ซึ่งมีตะกั่ว 10-20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่วในพื้นดินอาจเกิดจากแหล่งธรรมชาติ

หรือเป็นผลจากภาวะมลพิษก็เป็นได้ ดินที่มีสภาพเป็นกรดจะมีสารตะกั่วน้อยกว่าดินที่เป็นด่าง อินทรีย์สารในดินมีอิทธิพลต่อตะกั่วเนื่องจากดินอาจทำปฏิกิริยากับสารตะกั่ว จากนั้นสารนี้อาจยังคงอยู่ในดินหรืออาจแยกตัวออกจากดินหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับว่าสารประกอบนั้นละลายน้ำได้ดีมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้จะใช้ตะกั่วกันมากในอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่รถยนต์แล้ว ยังใช้เคลือบสายเคเบิลเป็นตัวเชื่อมโลหะทำท่อ ผสมในทองเหลืองและบรอนซ์ ใช้ทำฉากกันกำบังรังสี และใช้มากในการทำสารกันเนื้อมาก โดยทั่วไปตะกั่วจะถูกปล่อยออกสู่อากาศประมาณ 25-27 เปอร์เซ็นต์ของตะกั่วที่ผสมอยู่ในน้ำมัน โดยเฉพาะในแหล่งชุมชนและที่มีการจราจรคับคั่ง ในปัจจุบันพบสารตะกั่วแขวนลอยอยู่ในอากาศที่ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันรถยนต์ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ บางส่วนจะตกลงสู่พื้นถนน แม่น้ำ ลำคลอง ต่างๆ และเมื่อมีฝนตก น้ำฝนจะชะล้างสารตะกั่วส่วนที่เหลือออกจากอากาศและพื้นถนนลงสู่แม่น้ำลำคลอง สารตะกั่วส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำแต่จะตกตะกอนลงไปปนกับโคลน จัดว่าเป็นส่วนที่ไม่มีพิษ ส่วนโลหะตะกั่วและสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วละลายน้ำได้ดีพอควร และเจือปนอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติต่างๆ เป็นสารพิษที่เจือปนเข้าสู่อาหารของมนุษย์และสัตว์ สะสมอยู่ที่ตับ ไต เลือด และเซลล์ต่างๆ ของร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่กระดูกมีตะกั่วสะสมอยู่ได้ง่ายที่สุดในเลือดของคนปกติประมาณ 0.02 มิลลิกรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร ถ้ามีปริมาณตะกั่วในเลือดเท่ากับหรือมากกว่า 0.08 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร จะทำให้เกิดโรคภัยต่างๆ อย่างเห็นได้ชัด เช่น โรคทางระบบประสาท ระบบการสร้างเม็ดเลือด ระบบสืบพันธุ์ โรคหัวใจ โรคตับ โรคไต และโรคทางระบบย่อยอาหาร เป็นต้น

2.13 การนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

วิธีการนำโลหะหนักในน้ำเสียมาใช้ประโยชน์มีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่น่าสนใจ ได้แก่ กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

2.13.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process)

เป็นกระบวนการที่ผ่านกระแสไฟฟ้าลงสู่น้ำเสียโดยผ่านทางขั้วไฟฟ้า เพื่อให้ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไป ทำให้โลหะหนักที่แยกออกมาได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโลหะหนักบริสุทธิ์ จึงเป็นการง่ายที่จะนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

จากกระบวนการบำบัดต่างๆ ที่ได้กล่าวมา พบว่ากระบวนการต่างๆ โดยส่วนมาก ต้องมีการบำบัดรองรับของเสียที่ออกจากกระบวนการ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและยังมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะพบปัญหาน้อยที่สุด โดยเฉพาะในการกำจัดโลหะหนัก ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์เพื่อลดปริมาณและอันตรายที่จะเกิดจากสารอินทรีย์ จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแทนกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ในหัวข้อต่อไปจึงขอกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการเคมีไฟฟ้า

2.13.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า (R.A. Cottis และ A. Llewellyn, 1996)

ก. **เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry)** เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของวิชาเคมี ซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้า กับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่างๆ ของเคมีมากมาย เช่น การศึกษากลไกและจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาสังเคราะห์ทางสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ด้วยไฟฟ้า และการใช้หลักการทางเคมีวิเคราะห์ชีวเคมี ซึ่งปัจจุบันกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้านรวมทั้งการบำบัดน้ำเสียด้วย

ข. **กระบวนการเคมีไฟฟ้า** คือ กระบวนการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปมาระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) 2 ขั้ว ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการทางเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ระหว่างสารละลายและผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้ เกิดขึ้นได้โดยการอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก โดยการให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำในการขับหรือส่งอิเล็กตรอนซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ไอออนโลหะในสารละลายทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์นี้จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะเกาะขั้วไฟฟ้า จึงสามารถแยกโลหะและสารอินทรีย์ออกมาจากสารละลายได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของการทำการวิเคราะห์ โดยการใช้หลักการเคมีไฟฟ้า มีทั้งหมด 3 ส่วน ด้วยกันคือ ส่วนของสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ ส่วนของขั้วไฟฟ้า และส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดไฟฟ้า ส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองซึ่งมักถูกเรียกเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า

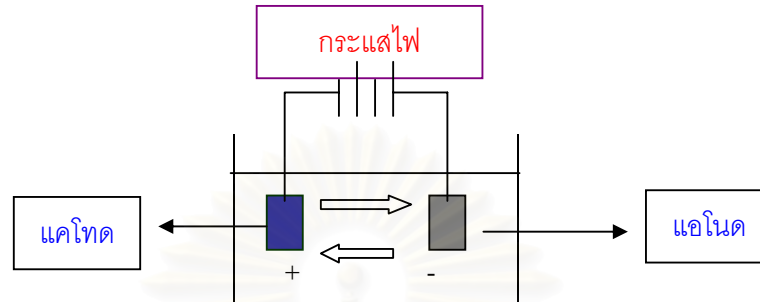
ค. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ซึ่งในแต่ละขั้วนั้นจะเกิดปฏิกิริยา และมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะถูกใช้เป็นเพียงขั้วที่ต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเท่านั้นตามสัจนิยมขั้วนี้มักถูกต่อมาจากขั้วแอโนดเรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่า “ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง” (reference electrode) ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้ามีขั้วเฉพาะที่ไม่แปรตามกระแสการไหลของกระแสในวงจร จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาไรซ์ในอุดมคติ การเปลี่ยนแปลงใดๆ ในสารละลายอันเป็นผลการศึกษาของสารตัวอย่าง จะไม่มีผลต่อศักย์ของอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองออกเซลล์ เรียกว่า “ขั้วไฟฟ้าใช้งาน” (Working electrode) ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้อาจใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) หน้าที่เฉพาะของขั้วไฟฟ้าช่วย คือ เป็นผู้ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร

ง. การระวังรักษาขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหนึ่งๆ มีราคาค่อนข้างสูง การรู้จักระวังรักษา ทั้งในระหว่างการใช้งานเมื่อเลิกใช้งาน จะช่วยยืดอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าได้ ขอแนะนำที่ควรปฏิบัติมีดังนี้

- 1) ในระหว่างการใช้งานขั้วไฟฟ้า ให้ล้างขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำกลั่น และซับแห้งทุกครั้งที่เปลี่ยนสารละลายการวิเคราะห์ใหม่ เพื่อป้องกันการปะปนของสารที่ติดมากับผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า
- 2) ไม่ควรทิ้งขั้วไฟฟ้าไว้ในอากาศนานเกินไป ระหว่างช่วงพักของการใช้งาน ควรแช่ขั้วไฟฟ้าในน้ำกลั่น หรือสารละลายบัฟเฟอร์ ตามข้อกำหนดการใช้ที่แนบมากับขั้วไฟฟ้านั้น
- 3) เมื่อต้องการหยุดใช้งานเป็นเวลานานควรเก็บขั้วไฟฟ้าไว้ในกล่องเก็บ โดยเฉพาะขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทุติยภูมิ ควรใช้ปลอกสวมป้องกันการระเหยของสาร ควรแช่ขั้วไฟฟ้าไว้ในน้ำอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิของน้ำไม่เกิน 80°C องศาเซลเซียส) เพื่อให้ผลึกละลายก่อนจะนำมาใช้งานครั้งต่อไป

จ. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายซึ่งไอออนเหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสผ่านไปขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี สมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยา และกระบวนการ อาทิเช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าพีเอช และอุณหภูมิ

สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อต่อแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเข้ากับขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

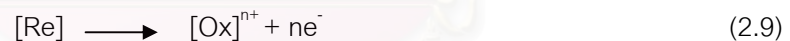


รูปที่ 2.9 แบบจำลองเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ซึ่งกระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดันให้อิเล็กตรอนในเส้นลวดเคลื่อนไปยังขั้วไฟฟ้า (แคโทด) ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารออกซิไดซ์ในสารละลายจะถ่ายโอนเข้าสู่ผิวหน้าของขั้วโดยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.8)



สำหรับปฏิกิริยารีดักชันส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบ ดังสมการ (2.9)



ขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่จากแอโนดผ่านสายไฟของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกสู่ขั้วแคโทด

จ. ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า $[E^\circ]$ ค่า E° เป็นศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพ เฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่า E° ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าดังกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน ซึ่งมีค่า $E = 0.00$ โวลต์

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของขั้วไฟฟ้า แสดงถึงแนวโน้มที่จะเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงตามที่ได้ระบุด้วยปฏิกิริยากำกับไว้ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าจึงมี 2 แบบ คือ ศักย์ไฟฟ้า

มาตรฐานรีดักชัน (Standard reduction potential) กับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานออกซิเดชัน (Standard oxidation potential)

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องแสดงเครื่องหมายบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับแนวโน้มของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาซึ่งกำกับไว้ข้างหน้า เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงแบบรีดักชันของไฮโดรเจนไอออน

ค่า E° จะผันแปรไปตามอุณหภูมิ แต่จะไม่ผันแปรไปตามจำนวนอิเล็กตรอนในสมการของปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เนื่องจากค่า E° เป็นค่าที่นำมาจากอิเล็กตรอน 1 โมล

ข. ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ ซึ่งนำมาหาศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ต่อเมื่อรู้ศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรือเป็นศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงกำหนดเป็นค่าจำกัดความของศักย์ได้ว่า คือ ถ้าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วไว้อย่างชัดเจน ก็เพื่อให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ในความหมายเดียวกัน โดยสัญลักษณ์ของการกำหนด เครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า “ในวงจรรวมของเซลล์เคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ถ้าผลลัพธ์ศักย์ของวงจร ถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น” โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ที่ได้ ถ้าเป็นบวกแสดงว่า วงจรเซลล์เคมีไฟฟ้า ดังกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์ของวงจรเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์กลับทำหน้าที่เป็นแอโนด

ข. หลักการอุณหภูมิตฤษฎีของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า กระแสที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นเสมอ งานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบบ์ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าปฏิกิริยา (Reversible) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบบ์ คือ

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[Re]^b}{[Ox]^a} \quad (2.10)$$

โดยที่ ΔG = ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) หน่วย (J/mol)

ΔG° = พลังงานอิสระของกิบส์ของสารที่สถานะมาตรฐาน

T = อุณหภูมิ (K^o)

R = ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8,314 (J/mol)

$\frac{[Re]^b}{[Ox]^a}$ = อัตราส่วนแอกติวิตีของผลปฏิกิริยาและตัวทำปฏิกิริยา

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่ได้ ดังสมการ (2.11)

$$\Delta G = - nF\Delta E \quad (2.11)$$

โดยที่ $- nF\Delta E$ = งานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ (จูล)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96500 คูลอมป์/อนุภาค)

ΔE = ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ΔE° = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

ฉ. สมการเนิร์นสต์ (Nernst equation) จากสมการปฏิกิริยาของ Van't Hoff ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ปฏิกิริยา



ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลง (ΔG) กับแอกติวิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้น และแอกติวิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะเป็น

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.13)$$

เมื่อ $[C]^c [D]^d$ คือ แอกติวิตีสุดท้ายของผลิตภัณฑ์

$[A]^a [B]^b$ คือแอกติวิตีเริ่มต้นของสารตั้งต้น

จากค่าสมการ $\Delta G = -nF\Delta E$ แทนใน (2.13) จะได้

$$-nF\Delta E = -nF\Delta E^\circ + RT \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.14)$$

นั่นคือ

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.15)$$

จากสมการเนินสท์ ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ใช้หาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ โดยที่ทราบแอกติวิตีของสารต่างๆในปฏิกิริยา ทราบอุณหภูมิ และค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะสังเกตเห็นว่า ถ้าแอกติวิตีเป็นหนึ่ง ค่า E เท่ากับ E° ซึ่งหมายถึง เป็นศักย์ไฟฟ้าอิเล็คโทรด

จากสมการ (2.15) ถ้าแทนค่าคงที่ต่างๆ และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จะได้สมการใหม่เป็น

$$E = E^\circ - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.16)$$

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบ ด้วย 2 ครึ่งเซลล์ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.17)$$

นอกจากนี้แล้วเซลล์เคมีไฟฟ้า ก็เหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก็คือ มีความต้านทานอยู่ คือจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายในนี้ จึงเกิดการไหลผ่านของกระแส ซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เราเรียก ศักย์ของโอห์ม (Ohmic Potential: E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้อง จะต้องรวมค่าศักย์ของโอห์มนี้ไปด้วย จะได้สมการใหม่เป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 + E_R = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} + E_R \quad (2.18)$$

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็คโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อย โดยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็คโทรไลต์ กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไหลผ่าน ซึ่งกฎของฟาราเดย์ มี 2 ข้อ คือ

1. ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็คโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

2. ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆกัน ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นส่วนโดยตรงกับน้ำหนักของสารเหล่านั้น

จากกฎข้อที่ สอง ของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sMwit}{nf} \quad (2.19)$$

เมื่อ

m = มวลของสารนั้น (กรัม)

s = สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี

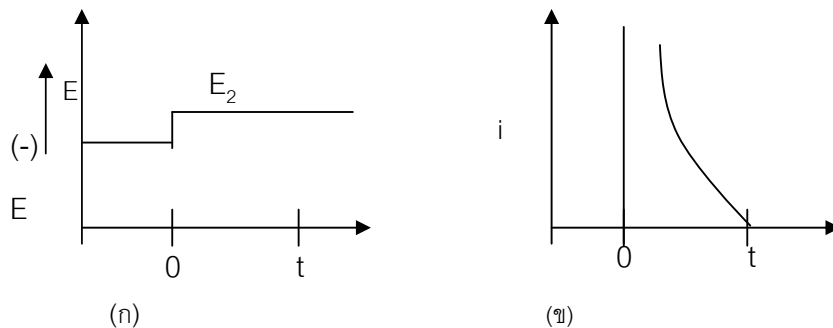
Mw = น้ำหนักอะตอม คือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

i = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

t = เวลาที่ใช้ (วินาที)

ฏ. การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ และการทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ซึ่งหลักการทำงานแต่ละแบบดังนี้

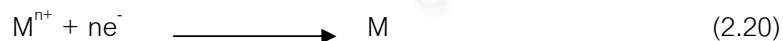
ฏ. การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Potential Method or Potential static Mode) พื้นฐานของการทำงานเป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ให้คงที่ อยู่ที่ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบจะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอไอออนบวกในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้ามีค่าต่ำลง ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด



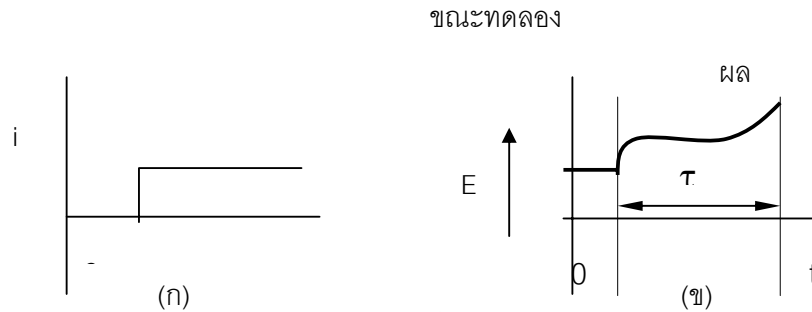
รูปที่ 2.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือค่าความต่างศักย์เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)

ฐ. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode) การทำงานที่ ควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบให้คงที่ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดจะเปลี่ยนไปกับเวลา วิธีการนี้เรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique เมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราคงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปลตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ (2.11)



รูปที่ 2.11 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบไฟฟ้าคงที่

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

ท. ตัวแปรที่มีผลต่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า พิจารณาสมการที่ เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า $Ox + ne \leftrightarrow Red$ การเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยขั้นตอนที่เปลี่ยน ตัวออกซิไดซ์ที่ละลายอยู่ในสารละลายให้กลายเป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วย กระบวนการต่างๆ ดังนี้

ธ. การถ่ายโอนมวลสาร (ถ่ายโอนตัวออกซิไดซ์ในสารละลายสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า) การถ่ายโอนมวลสารในสารละลายประกอบด้วย 3 กลไก ด้วยกันคือ ไมเกรชัน (migration), การ แพร่ (diffusion) และการพา (convection) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้

ณ. ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และไอออนลบจะ เคลื่อนที่เข้าหาแอโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ไอออนเข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้ว อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสในวงจร นั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกัน จะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

ด. การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่ ความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณความเข้มข้นต่ำกว่าจนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความ เข้มข้นในสารละลาย อัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

ต. การพา การพาของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของกระแส

- การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า
- การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน
- ปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับ (adsorption)

ปฏิกิริยาการคาย (desorption) ปฏิกิริยาอิเล็กโทรดีโพสิชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าจะซับซ้อนกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพราะปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาเกิดที่พื้นที่ระหว่างผิวขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับการถ่ายโอนมวลสารสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า และผลของพื้นที่ผิวที่อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ในหน่วยของโมลต่อวินาที ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ดังสมการที่ 2.21

$$V(\text{mole} / \text{sec} \cdot \text{m}^2) = \frac{i}{nFA} = \frac{i}{nF} \quad (2.21)$$

เมื่อ I = ความหนาแน่นกระแส (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

ส่วนความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตัวออกซิไดซ์ในสารละลายขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและผิวหน้าของขั้วแคโทด ซึ่งฟังก์ชันกับค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (K_{non}) และเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ โดยที่ตัวแปรทั้งสองต่างก็เป็นฟังก์ชันกับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทด ($\Delta E_{\text{non}}^{\circ}$) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการของเนิร์ส (Nerst's equation) ดังที่กล่าวมาแล้ว

2.14 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539)

ได้มีการกำหนดมาตรฐานของไอออนโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

| ดัชนีคุณภาพน้ำ | ค่ามาตรฐาน | วิธีวิเคราะห์ |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1. ค่าพีเอช (pH value) | 5.5-9.0 | pH Meter |
| 2. โลหะหนัก (Heavy Metal) | | Atomic Absorption Spectroscopy |
| 2.1 สังกะสี (Zn) | ไม่เกิน 5.0 มก. /ล. | Photometry ชนิด Direct Aspiration |
| 2.2 ทองแดง (Cu) | ไม่เกิน 2.0 มก. /ล. | หรือวิธี Plasma Emission |
| 2.3 แคดเมียม (Cd) | ไม่เกิน 0.03 มก. /ล. | Spectroscopy ชนิด Inductively |
| 2.4 ตะกั่ว (Pb) | ไม่เกิน 0.2 มก. /ล. | Coupled Plasma: ICP |
| 2.5 นิกเกิล (Ni) | ไม่เกิน 1.0 มก. /ล. | |

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Schmuhl และคณะ (2001) ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและโคโรเมียมแบบกะโดยใช้ไคโตซานที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง ในช่วงความเข้มข้น 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการดูดซับไอออนโคโรเมียมสูงสุดโดยใช้ไคโตซานที่ไม่เชื่อมขวางเท่ากับ 78 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน และไคโตซานที่เชื่อมขวางเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน อธิบายด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir Model) ส่วนการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดโดยใช้ไคโตซานที่ไม่มีการเชื่อมขวางและที่มีการเชื่อมขวางมีค่ามากกว่า 80 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน ทั้ง 2 ชนิด อธิบายด้วยแบบจำลองเฟรנדลิช (Freundlich Model) การดูดซับไอออนโคโรเมียมที่ดีจะมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 แต่ค่าพีเอชไม่มีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดง

Lee และคณะ (2001) ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงบนไคโตซานไตรพอลิฟอสเฟต พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดที่ 200 มิลลิกรัมต่อกรัมของไคโตซานไตรพอลิฟอสเฟต ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5.1 และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางต่ำมีค่าการดูดซับไอออนทองแดงประมาณ 52 มิลลิกรัมต่อกรัมของไคโตซานไตรพอลิฟอสเฟต ที่เวลาประมาณ 75 ชั่วโมง การใช้ไคโตซานไตรพอลิฟอสเฟตในการดูดซับไอออนทองแดงให้ผลดีมากกว่ากระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

Chu (2002) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงบนโคโตซานในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดเท่ากับ 0.266 และ 0.159 มิลลิโมลต่อกรัมของโคโตซานที่ดั่งหมู่แอสติล และโคโตซานที่ดั่งแคลเซียม ตามลำดับ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 การดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์

Jeon และ Höll (2003) ศึกษาการขจัดไอออนปรอทโดยใช้โคโตซานดัดแปรด้วยสารเคมี พบว่าโคโตซานเอมีนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีกับเอทิลีนไดเอมีน มีความสามารถในการขจัดไอออนปรอทสูงถึง 2.26 มิลลิโมลต่อกรัมของน้ำหนักโคโตซานแห้ง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และเพิ่มขึ้น 47% เมื่อเทียบกับโคโตซานดัดแปรอ้างอิง (โคโตซานที่เติมกลูตาราลดีไฮด์)

Karthikeyan และคณะ (2003) ศึกษาการดูดซับสังกะสีโดยใช้โคโตซานแบบกะ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ พบว่าขนาดยิ่งยวด ความเข้มข้นของสังกะสีที่ดูดซับไว้ลดลงโดยเปรียบเทียบที่ 0.21 และ 0.50 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น การดูดซับเพิ่มขึ้นแต่จะค่อนข้างคงที่ที่ 6 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ให้ผลดีที่สุด ผลของคลอไรด์และไนเตรตต่อการดูดซับ ถ้ามีมากจะทำให้ค่าการดูดซับน้อยลง มีผลต่อการกำจัดโลหะ เวลาขึ้นกับสัดส่วนการดูดซับที่ขนาดต่างกัน เวลาเพิ่ม สัดส่วนการดูดซับเพิ่ม ปริมาณโคโตซานเพิ่ม เวลาเพิ่ม สัดส่วนการดูดซับเพิ่ม การแพร่ภายในโมเลกุล โคโตซานขนาดเล็กจะดูดซับได้มากกว่า และปริมาณที่มากขึ้นจะดูดซับได้ดีขึ้น ผลของอุณหภูมิเมื่อเพิ่ม การดูดซับเพิ่ม ผลของไอออนร่วมต่อการกำจัดโลหะ ปรากฏว่าทองแดงเป็นตัวยับยั้งที่สูง การอธิบายการดูดซับโดยการใส่สมการเฟรन्दลิชและแลงเมียร์ โดยใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ขนาด 0.21 มิลลิเมตร และความเข้มข้นสังกะสี 10 มิลลิกรัมต่อตัวอย่าง 50 มิลลิตร เทียบในช่วงอุณหภูมิ 293-323 เคลวิน พบว่าอุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับเพิ่ม

Reddy และ Reddy (2003) ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยพอลิไทรีนที่เคลือบอยู่กับพอลิเมอไรเซชัน พบว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 6 จะดูดซับได้น้อย แต่ที่ค่าพีเอชมากกว่า 6 จะดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 จะดูดซับตะกั่วและปรอทได้ดี และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 จะดูดซับแคดเมียมและโครเมียมได้ดี

Son และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับของโลหะหนักที่ผสมกันโดยใช้พอลิแซ็กคาไรด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ กรดแอลจินิก โคโตซาน แอลฟา-คาราจีแนน และเซลลูโลส พบว่าการทดลองของโลหะหนักแบบเดี่ยว กรดแอลจินิกสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด โคโตซานสามารถดูดซับปรอทและทองแดงได้ดีที่สุด ส่วนการทดลองแบบโลหะหนักแบบผสม กรดแอลจินิกสามารถดูดซับตะกั่ว

ได้ดีที่สุด ไคโตซานสามารถดูดซับปรอทได้ดีที่สุด การทดลองแบบโลหะหนักแบบผสม โดยใช้กรดแอสจินิก ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ 0.01 มิลลิโมล สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่ 100 มิลลิโมล สามารถดูดซับทองแดงและปรอทได้ดีที่สุด

ทิพย์วิมล เกิดอ้อม (2004) ศึกษาการจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่างๆ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงเท่ากับ 5 สำหรับทุกรูปแบบของไคโตซาน และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมเท่ากับ 5 สำหรับเกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซาน พีเอชเท่ากับ 6 สำหรับไคโตซานรูปแบบอื่นๆ เม็ดแอมิเนตไคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับ 345 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 333 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ การศึกษาสมดุลของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของโคโตซานเรซินสำหรับการเลือกดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียแบบจำลองเพื่อกำจัดโลหะหนักที่ไม่ต้องการเหล่านี้อกจากน้ำเสีย โดยอาจนำมาเป็นข้อมูลในระดับขยายสเกลหรือใช้ประโยชน์ในการศึกษาต่อไป

3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เปลือกกุ้งขาว

3.2.2 สารเคมีสำหรับการเตรียมโคโตซาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโคโตซาน (Analytical reagent)

| ชื่อสารเคมี | สูตรโครงสร้าง | น้ำหนักโมเลกุล | บริษัท |
|--------------------|-------------------------------------------|----------------|--------------|
| กรดแอซีติก | CH_3COOH | 60.05 | BDH |
| กรดไฮโดรคลอริก 37% | HCl | 36.461 | BDH |
| แคลเซียมคลอไรด์ | $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 147.02 | Univar |
| กรดคลอโรแอซีติก | $\text{C}_2\text{H}_3\text{ClO}_2$ | 94.5 | Fluka |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์ | NaOH | 40.0 | BDH |
| กลูตาราลดีไฮด์ 25% | $\text{OHCC}_3\text{H}_6\text{CHO}$ | 100.12 | BDH |
| คอปเปอร์ซัลเฟต | $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | 185.68 | BDH |
| เลดไนเตรต | $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ | 331.20 | BDH |
| เอทานอล | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | 60.10 | Mallinckrodt |
| พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ | | 72000 | BDH |
| เมทานอล | CH_3OH | 32.0 | Lab-scan |
| ฟอร์มัลดีไฮด์ 37% | HCHO | 30.026 | CARLO ERBA |

| | | | |
|-----------------------|------------------------|-------|------------------|
| กรดไทโอไกลโคลิก | CH ₂ SHCOOH | 92.17 | CARLO ERBA |
| สารละลายมาตรฐานทองแดง | | | Fisher Chemicals |
| สารละลายมาตรฐานตะกั่ว | | | Fisher Chemicals |

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมโคโตซาน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมโคโตซาน

| เครื่องมือและอุปกรณ์ | รุ่น |
|-----------------------------------------------|--------------------|
| ตู้อบ (Hot air oven) | TSF |
| แผ่นความร้อน (Hot plate) | SLR |
| เครื่องกวนปรับความเร็วรอบ | RW20N |
| เครื่องกวน+ให้ความร้อน (Motor stirrer) | Schott gerate GMBH |
| เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) | CG840 |
| เครื่องปั๊ม (Peristaltic pump) | Master flex |
| เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar) | - |
| เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส | - |
| เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างหยาบ | METTLER TOLEDO |
| เครื่องแก้วอื่นๆในห้องปฏิบัติการ | - |

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

| เครื่องมือและอุปกรณ์ | รุ่น |
|--------------------------------|---------|
| เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด | Precisa |
| เครื่องเขย่า (Shaker) | GFL3020 |
| เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) | HORIBA |

| | |
|-----------------------------------------|-----------|
| เครื่องปั๊ม (Peristaltic pump) | 7520-47 |
| เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) | EE-1243-3 |
| เครื่องแก้วอื่นๆในห้องปฏิบัติการ | - |

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

| เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ | รุ่น |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| Atomic Absorption Spectrometer | AA 6800 |
| Fourier Transform Infrared Spectrophotometer | FT-IR 1760X |
| Scanning Electron Microscope | JSM-5800LV JSM-6800LV |
| Zeta meter | Zetasier 3000HS |

3.4 การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยในขั้นตอนแรกเป็นการสกัดไคโตซานจากเปลือกกุ้งขาวและเตรียมเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยการจำลองน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งสารละลายมีค่าพีเอช ในช่วง 4.50-5.00

3.4.1 การสกัดไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

ในงานวิจัยนี้จะใช้การสกัดไคโตซานตามวิธีของทิพย์วิมล (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ การกำจัดแร่ธาตุ การกำจัดโปรตีน การกำจัดสีและไขมัน และการกำจัดหมู่แอซิดิล ดังแสดงในรูปที่ 3.1

- 1) นำเปลือกกุ้งที่ได้ล้างทำความสะอาด

2) นำเปลือกกุ้งที่ได้จาก 1) มาทำการกำจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2 โมลาร์

3) นำเปลือกกุ้งที่ได้จาก 2) มาทำการกำจัดโปรตีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์

4) นำเปลือกกุ้งที่ได้จาก 3) มาทำการกำจัดสีและไขมันด้วยเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 70 โดยปริมาตร ส่วนที่ได้ คือ ไคติน

5) นำไคตินที่ได้จาก 4) มาทำการกำจัดหมู่แอสซิติลด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 49 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น ทำการกรอง ส่วนที่ได้ คือ ไคโตซาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

3.4.2 การเตรียมเรซินไคโตซานและตัดแปรด้วยสารเคมี

การเตรียมเรซินไคโตซาน ต้องเตรียมสารละลายไคโตซานก่อน โดยนำเกล็ดไคโตซานที่ได้ละลายด้วยสารละลายกรดแอซีติก ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร (Tanja และคณะ, 2000) จากนั้นเติมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กวนต่อเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายไคโตซานหยดลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อฟอร์มรูปให้เป็นเม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ได้นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อเตรียมไว้ใช้สำหรับเตรียมเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ สำหรับศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียต่อไป สำหรับชนิดของเรซินไคโตซานที่ศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ เรซินไคโตซานชนิดไม่ตัดแปร ใช้สัญลักษณ์ NCCR กลุ่มสารละลายไฮดรอกไซด์เรซินไคโตซาน ใช้สัญลักษณ์ GLACR คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน ใช้สัญลักษณ์ CBCR และ ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ใช้สัญลักษณ์ THIOCR

3.4.2.1 การเตรียมเรซินไคโตซานชนิดไม่ตัดแปร

- 1) นำเม็ดไคโตซานที่ขึ้นรูปแล้ว ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส จะได้ “เรซินไคโตซานชนิดไม่ตัดแปร”

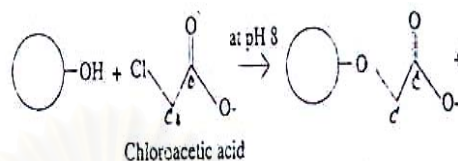
3.4.2.2 การเตรียมกลุ่มสารละลายไฮดรอกไซด์เรซินไคโตซาน

- 1) นำเม็ดไคโตซานที่ขึ้นรูปแล้ว มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลุ่มสารละลายไฮดรอกไซด์
- 2) จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส จะได้ “กลุ่มสารละลายไฮดรอกไซด์เรซินไคโตซาน”

3.4.2.3 การเตรียมคาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน (Choong และ Wolfgang, 2003)

- 1) นำเม็ดไคโตซานที่ขึ้นรูปแล้ว มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดคลอโรแอซีติก

- 2) จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส จะได้ “คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน” ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของคาร์บอกซิเลต

3.4.2.4 การเตรียมไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

- 1) นำเม็ดไคโตซานที่ขึ้นรูปแล้ว มาทำปฏิกิริยากับเมทานอลและสารละลายกลูตาราลดีไฮด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร
- 2) จากนั้นนำมาล้างด้วยเอทานอลและน้ำกลั่น เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.85 โดยปริมาตร จากนั้นเติมสารละลายไทโอไกลโคลิก ความเข้มข้นร้อยละ 1.40 โดยปริมาตร
- 3) จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส จะได้ “ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน”

3.4.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมและความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินไคโตซาน

ในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียของเรซินไคโตซานเป็นการทดลองแบบกะ โดยการจำลองน้ำเสีย ไอออนโลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ ไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว และค่าการดูดกลืนแสงของไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่ความยาวคลื่น 324.8 และ 283.35 นาโนเมตร ตามลำดับ

โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของเรซินไคโตซาน ปริมาณของเรซินไคโตซานที่ใช้ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ค่าพีเอช ระยะเวลา ชนิดของโลหะหนัก และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายโลหะหนักแบบผสม

3.4.3.1 การศึกษาชนิดของเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ลงในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลาย (ในช่วง 4.50-5.00)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ จำนวน 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในสารละลายไอออนทองแดง
- 3) เขย่าสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1,440 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดง โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์ชนิดของเรซินไคโตซานที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับไอออนทองแดง เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนทองแดงเป็นสารละลายไอออนตะกั่ว

3.4.3.2 การศึกษาปริมาณเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ลงในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลาย (ในช่วง 4.50-5.00)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด จำนวน 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในสารละลายไอออนทองแดง
- 3) เขย่าสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บสารตัวอย่างในช่วงเวลา 0 5 10 20 40 60 120 240 360 720 1,440 และ 2,880 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณ

ไอออนทองแดง โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)

- 4) วิเคราะห์ปริมาณของเรซินโคโตซานที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับไอออนทองแดง เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนทองแดงเป็นสารละลายไอออนตะกั่ว และเปลี่ยนชนิดของเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนทองแดงเป็นเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนตะกั่ว

3.4.3.3 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

- 1) นำผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาปัจจัยปริมาณเรซินโคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาช่วงเวลาเข้าสู่สมดุล

3.4.3.4 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 100 250 500 และ 1,000 พีพีเอ็ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ลงในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชของสารละลาย (ในช่วง 4.50-5.00)
- 2) เตรียมเรซินโคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด ปริมาณเรซินโคโตซานที่เหมาะสมที่สุด ใส่ลงในสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้นสารละลายไอออนทองแดงที่ศึกษา
- 3) เขย่าสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างจนถึงช่วงเข้าสู่สมดุล ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับไอออนทองแดง เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป

- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนจากเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนทองแดงเป็นเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนตะกั่ว

3.4.3.5 การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดง ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 2 3 4 5 6 7 และ 8 ลงในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสารละลายไอออนทองแดงที่เหมาะสมที่สุด
- 2) เตรียมเรซินโคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด จำนวน 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในสารละลายไอออนทองแดง ที่ค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงที่ศึกษา
- 3) เขย่าสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างจนถึงช่วงเข้าสู่สมดุล ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดง โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์ค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงที่ดีที่สุด สำหรับการดูดซับไอออนทองแดง เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนจากเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนทองแดงเป็นเรซินที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายไอออนตะกั่ว

3.4.3.6 การศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะหนักผสม

จากการศึกษาตั้งแต่ข้อ 3.4.3.1 ถึง 3.4.3.5 เป็นการศึกษาสารละลายไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยว แต่ในที่นี้จะศึกษาสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม ทำการทดลองแบบกะดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ผสมรวมกันในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด โดยใส่เรซินไคโตซาน จำนวน 100 มิลลิกรัม ลงในสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 3) เขย่าสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างจนถึงช่วงเข้าสู่สมดุล ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ปริมาณไอออนโลหะหนักแบบผสม โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์ความสามารถในการเลือกดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนจากเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงเป็นเปลี่ยนเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะหนักแบบผสมที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

3.4.3.7 การศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่เหมาะสมต่อการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว แบบกะ

สารละลายโลหะหนักแบบเดี่ยว

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและค่าพีเอชที่เหมาะสม
- 2) เตรียมโพแทสเซียมไนเตรตใส่ลงในสารละลายไอออนทองแดง ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 และ 100 มิลลิโมล
- 3) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด โดยใส่เรซินไคโตซาน จำนวน 100 มิลลิกรัม ในแต่ละความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่ศึกษา

- 4) เขย่าสารละลายไอออนทองแดง ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างจนถึงช่วงเข้าสู่สมดุล ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนักแบบผสม โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 5) วิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการดูดซับสารละลายไอออนทองแดง ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 5) แต่เปลี่ยนจากเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงเป็นเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

สารละลายโลหะหนักแบบผสม

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ผสมรวมกันในขวดชมพู ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1: 1 (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมโพแทสเซียมไนเตรตใส่ลงในสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 และ 100 มิลลิโมล (Bong และคณะ, 2004)
- 3) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด โดยใส่เรซินไคโตซาน จำนวน 100 มิลลิกรัม ในแต่ละความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่ศึกษา
- 4) เขย่าสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างจนถึงช่วงเข้าสู่สมดุล ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนักแบบผสม โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 5) วิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการเลือกดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 5) แต่เปลี่ยนจากเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายโลหะหนักแบบผสม

ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงเป็นเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโลหะหนักแบบผสมที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

3.4.3.8 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงแบบต่อเนื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินไคโตซานที่บรรจุในคอลัมน์ และอัตราการไหลของน้ำเสียต่างกัน ในที่นี้จะศึกษาการเลือกการดูดซับสารละลายไอออนทองแดงแบบต่อเนื่องเท่านั้น เพื่อนำปัจจัยที่ศึกษาที่ดีที่สุดไปใช้ในการศึกษาการเลือกดูดซับสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบต่อเนื่องต่อไป

คอลัมน์แก้ว (Glass column) ที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องมีความสูง 20 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ศึกษาแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักแบบผสมมีลักษณะเคลื่อนที่ขึ้น (up flow) จากด้านล่างของคอลัมน์แก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และทำการทดลองดังนี้

ปริมาณเรซินไคโตซานที่บรรจุคอลัมน์

- 1) เตรียมสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด ปริมาณ 1.5 กรัม และ 2.8 กรัม ใส่ลงคอลัมน์
- 3) ผ่านสารละลายโลหะหนักแบบผสมในคอลัมน์โดยใช้ปั๊ม อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 1 2 4 6 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนัก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์ปริมาณเรซินไคโตซานที่บรรจุคอลัมน์ต่อการเลือกดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง เพื่อใช้ในการศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบต่อเนื่องต่อไป

อัตราการไหลของสารละลายไอโหนดเหล็กแบบผสม

- 1) เตรียมสารละลายไอโหนดเหล็ก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเหมาะสม ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอโหนดทองแดง: สารละลายไอโหนดตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอโหนดทองแดงที่ดีที่สุด ปริมาณที่เหมาะสมใส่ลงคอลัมน์
- 3) ผ่านสารละลายไอโหนดเหล็กแบบผสมในคอลัมน์โดยใช้ปั๊ม อัตราการไหล 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที และ 5 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 1 2 4 6 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอโหนดเหล็ก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์อัตราการไหลของสารละลายไอโหนดเหล็กแบบผสมต่อการเลือกดูดซับสารละลายไอโหนดเหล็กแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอโหนดทองแดง เพื่อให้ในการศึกษาการเลือกดูดซับแบบต่อเนื่องต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 การดูดซับสารละลายไอโหนดเหล็กแบบต่อเนื่อง (ก) แบบคอลัมน์เดี่ยว (ข) แบบคอลัมน์คู่

3.4.3.9 การศึกษาการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบต่อเนื่อง

ในการเลือกการดูดซับแบบต่อเนื่อง จะใช้สารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ปริมาณเรซินไคโตซานที่บรรจุในคอลัมน์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่ดีที่สุด และอัตราการไหลของน้ำเสียที่ดีที่สุด ที่ศึกษาจาก 3.4.3.8 ทำการทดลองดังนี้

แบบคอลัมน์เดี่ยว

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเหมาะสม ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด ปริมาณที่เหมาะสมใส่ลงคอลัมน์
- 3) ผ่านสารละลายโลหะหนักแบบผสมในคอลัมน์โดยใช้ปั๊ม อัตราการไหลที่เหมาะสม เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 1 2 3 4 6 8 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนัก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์อัตราการไหลของสารละลายโลหะหนักแบบผสมต่อการเลือกดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 5) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1) ถึง 4) แต่เปลี่ยนจากเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงเป็นเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว ที่ภาวะเหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว

แบบคอลัมน์คู่

- 1) เตรียมสารละลายไอออนโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเหมาะสม ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดงที่ดีที่สุด ปริมาณที่เหมาะสม ใส่ลงคอลัมน์ที่ 1 และเรซินไคโตซานที่ดูดซับไอออนตะกั่วที่ดีที่สุด ปริมาณที่เหมาะสม ใส่ลงคอลัมน์ที่ 2
- 3) ผ่านสารละลายโลหะหนักแบบผสมที่ค่าพีเอชเหมาะสมต่อการเลือกดูดซับไอออนทองแดงในคอลัมน์ที่ 1 โดยใช้ปั๊ม อัตราการไหลที่ดีที่สุด เก็บตัวอย่างที่ช่วงเวลา 1 2 3 4 6 8 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนัก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 4) วิเคราะห์การเลือกดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบผสม ที่ภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง
- 5) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3) ถึง 4) แต่ปรับค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม ที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว ก่อนผ่านสารละลายไอออนโลหะหนักในคอลัมน์ที่ 2 แทน

3.4.3.10 การฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

แบบกะ

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเหมาะสมที่สุด ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว) ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดง 100 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง ใส่ลงในสารละลายโลหะหนักผสม เขย่าสารละลายที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างที่เวลาสมดุลง นำตัวอย่างไป

วิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)

- 3) นำเรซินไคโตซานที่ผ่านการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแล้ว มาล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้ง ทำการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายกรดกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที
- 4) จากนั้นนำเรซินไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูแล้ว ล้าง และอบให้แห้ง ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 5) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดง
- 5) จากนั้นทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึง 4) แต่เปลี่ยนจากสารละลายไอออนทองแดงและสารละลายไอออนตะกั่ว ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงเป็นสารละลายไอออนทองแดงและสารละลายไอออนตะกั่ว ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

แบบต่อเนื่อง

- 1) เตรียมสารละลายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดงและตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเหมาะสม ผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตร (สารละลายไอออนทองแดง: สารละลายไอออนตะกั่ว)
- 2) เตรียมเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่ว บรรจุลงในคอลัมน์
- 3) ผ่านสารละลายโลหะหนักแบบผสมในคอลัมน์โดยใช้ปั๊ม อัตราการไหลที่ดีที่สุด เก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 1 2 3 4 6 8 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะหนัก โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer : AAs)
- 4) นำเรซินไคโตซานที่ผ่านการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแล้ว มาล้างด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้ง ทำการฟื้นฟูโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 โมลาร์
- 5) จากนั้นนำเรซินไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูแล้ว ล้าง และอบให้แห้ง ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 3) วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนตะกั่ว

- 6) ในที่นี้จะใช้เรซินไคโตซานที่ภาวะเหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วเท่านั้น เนื่องจากเรซินไคโตซานที่ภาวะเหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงมีสภาพเป็นกรดสูง เมื่อใช้ไปนานๆ (96 ชั่วโมง) เรซินจะมีการแตกตัว บวม ไม่สามารถนำมาฟื้นฟูคุณภาพได้

3.4.3.11 การศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ไอออนทองแดงที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถแยกออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้เครื่องแยกไอออนทองแดง (Electro Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้คือ แพลทินัม (Pt) ใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สำหรับการแยกไอออนตะกั่วยังไม่ได้ศึกษา เนื่องจากยังไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการแยกไอออนตะกั่ว

- 1) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ได้จาก 3.5.3.10 แบบต่อเนื่อง ไปทดลองด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าเพื่อนำไอออนทองแดงในสารละลายกลับมาใช้
- 2) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ตั้งบนเครื่องแยกไอออนทองแดง
- 3) นำขั้วอิเล็กโทรดยึดกับแท่นวางและให้ระดับของขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในระดับเดียวกันและจมลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- 4) ต่อสายไฟระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเครื่องจ่ายกระแสไฟตรง ใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
- 5) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดง โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer: AAs)
- 6) วิเคราะห์ความหนาแน่นกระแสต่อการแยกไอออนทองแดงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
- 7) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 6) แต่เปลี่ยนจากความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 3.4 การแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วย
เครื่องแยกไอออนทองแดง (Electro Analysis)

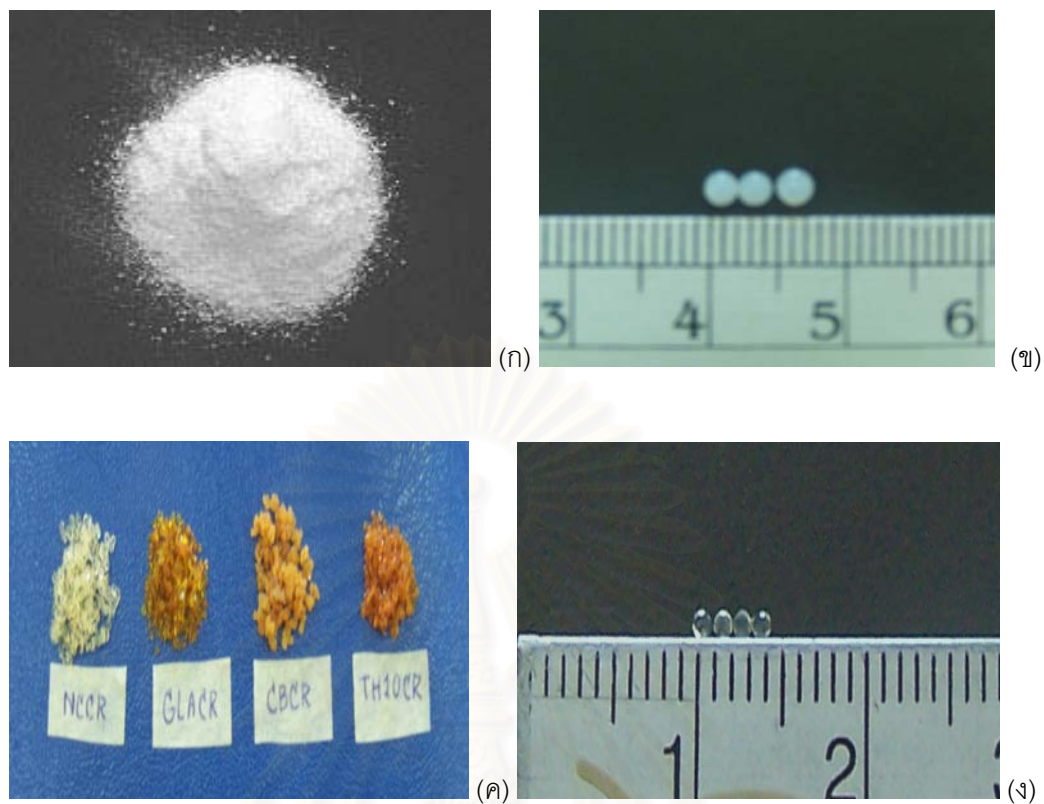
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติของเรซินไคโตซาน

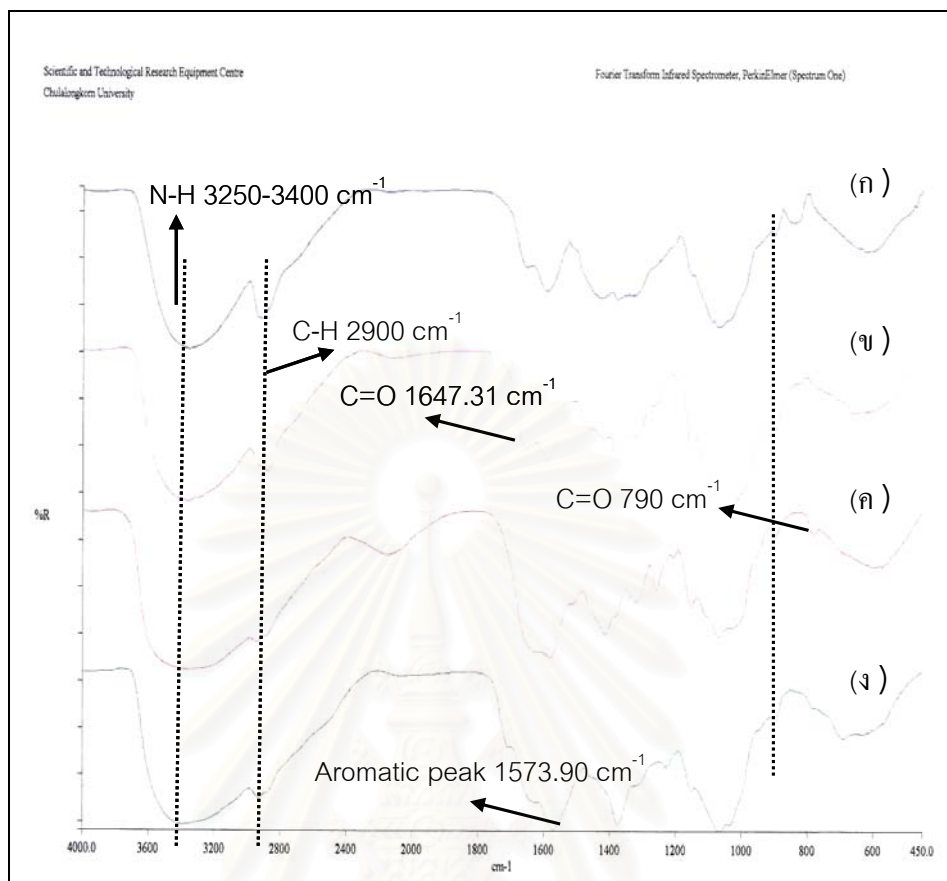
เปลือกกุ้งอบแห้ง 1,500 กรัม สามารถสกัดเป็นไคตินได้ 706.4 กรัม คิดเป็นร้อยละ 47.1 โดยเทียบกับน้ำหนักเปลือกกุ้งแห้งที่ใช้ เมื่อนำไคตินที่ได้ทั้งหมดผ่านเข้าสู่กระบวนการกำจัด หมู่แอซิดิลจะได้ไคโตซาน 622.5 กรัม คิดเป็นร้อยละ 41.5 โดยเทียบกับน้ำหนักเปลือกกุ้งแห้งที่ใช้ ไคตินที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดสีน้ำตาลอ่อน ส่วนไคโตซานที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ด สีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) เมื่อนำไคโตซานที่ได้มาขึ้นรูปเป็นเม็ด ซึ่งจะมีลักษณะกลม สีขาวขุ่น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.23 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ส่วนเม็ดไคโตซานที่ได้จะถูกแบ่งเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกจะนำมาอบแห้ง จะเรียกเม็ดไคโตซานอบแห้งนี้ว่า “เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร” ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมใส ส่วนที่สองจะถูกนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายกลูตาราลดีไฮด์ เพื่อทำการเชื่อมขวางเป็นกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีน้ำตาลใส ส่วนที่สามจะถูกนำมาเตรียมเป็นคาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน ซึ่งจะมีลักษณะกลมสีน้ำตาลขุ่น ส่วนที่สี่จะถูกนำมาเตรียมเป็นไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ซึ่งจะมีลักษณะกลม สีส้มขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค) ซึ่งเรซินไคโตซานจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ง) โดยเรซินไคโตซานชนิดต่างๆที่เตรียมได้ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) พบว่า หมู่ฟังก์ชันของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ โดยปกติจะแสดงช่วงของเอมีน (-NH peak) ชัดเจน ในช่วง $3250 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ เนื่องจากเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของไคโตซาน สำหรับความแตกต่างของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ ได้แก่ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน จะแสดงหมู่ C=O peak ชัดเจน ในช่วง 1647.31 cm^{-1} ส่วนคาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน จะแสดงหมู่ C=O peak ชัดเจนในช่วง 1789.97 cm^{-1} , 1581.78 cm^{-1} และ 790 cm^{-1} ส่วนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน จะแสดงหมู่เอโรแมติกชัดเจนในช่วง 1573.90 cm^{-1} และ 1228.62 cm^{-1} เมื่อเทียบกับเรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของเรซินไคโตซาน (ก) ลักษณะเกล็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากเปลือกกุ้ง (ข) ขนาดเฉลี่ยของไคโตซานชนิดเม็ด (ค) เรซินไคโตซานชนิดต่างๆ และ (ง) ขนาดเฉลี่ยของเรซินไคโตซาน

ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ

| ชนิดเรซินไคโตซาน | ดัดแปรด้วยสารเคมี | หมู่ฟังก์ชัน | ช่วงสเปกตรัม (ซ.ม. ⁻¹) |
|----------------------------|-------------------|--------------|------------------------------------|
| เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร | - | -NH | 3250-3400 |
| กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | กลูตาราลดีไฮด์ | C=O | 1647.31 |
| คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน | กรดคลอโรแอซิดิก | C=O | 1789.97 1581.78 790 |
| ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | ไทโอไกลโคลิก | Aromatic | 1573.90 1228.62 |



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ ได้แก่ สเปกตรัมของ (ก) เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร (ข) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ค) คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน และ (ง) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

4.2 การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

4.2.1 การเลือกชนิดของเรซินไคโตซาน

ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้เรซินไคโตซาน มีปริมาณไอออนทองแดงเหลือเท่ากับ 64.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไอออนตะกั่วเหลือเท่ากับ 9.9 มิลลิกรัมต่อลิตร กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน มีปริมาณไอออนทองแดงเหลือเท่ากับ 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไอออนตะกั่วเหลือเท่ากับ 184.6 มิลลิกรัมต่อลิตร คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน มีปริมาณไอออนทองแดงเหลือเท่ากับ 66.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไอออนตะกั่วเหลือเท่ากับ 212.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน มีปริมาณไอออนทองแดงเหลือเท่ากับ 159.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไอออนตะกั่วเหลือเท่ากับ 19.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคิดเป็นร้อยละการดูดซับไอออน

ทองแดงเท่ากับ 74.2 97.3 77.5 และ 36.2 ตามลำดับ และร้อยละการดูดซับไอออนตะกั่ว 96.1 26.2 14.8 และ 92.2 ตามลำดับ

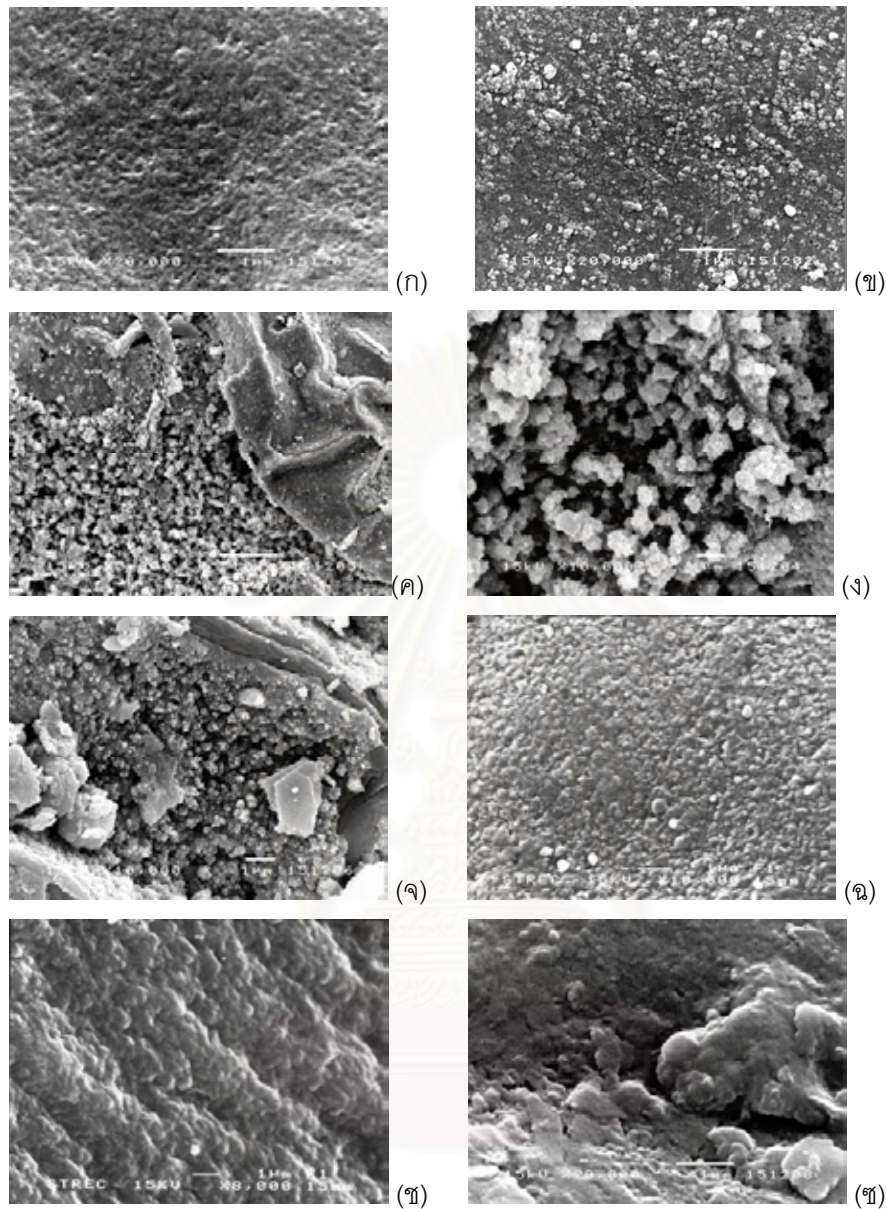
ตารางที่ 4.2 ชนิดของเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

| ชนิดของเรซินไคโตซาน | ชนิดไอออนโลหะหนัก | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%) |
|----------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร | ทองแดง | 64.5 | 74.2 |
| | ตะกั่ว | 9.9 | 96.0 |
| กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | ทองแดง | 6.7 | 97.3 |
| | ตะกั่ว | 184.6 | 26.2 |
| คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน | ทองแดง | 66.4 | 73.4 |
| | ตะกั่ว | 212.9 | 14.8 |
| ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | ทองแดง | 159.4 | 36.2 |
| | ตะกั่ว | 19.5 | 92.2 |

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาชนิดของเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว พบว่า กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานแสดงผลการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดเมื่อเทียบกับเรซินไคโตซานชนิดอื่น และเมื่อเรียงลำดับร้อยละของการดูดซับไอออนทองแดงจากมากไปน้อย โดยแสดงตัวเลขในวงเล็บ ได้ผลดังนี้ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (97.3) เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร (74.2) คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน (73.4) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (36.2) ตามลำดับ ส่วนเรียงลำดับร้อยละของการดูดซับไอออนตะกั่วจากมากไปน้อย ได้ผลดังนี้ เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร (96.0) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (92.2) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (26.2) คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน (14.8) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถึงแม้เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร สามารถดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดเมื่อเทียบกับเรซินไคโตซานชนิดอื่น แต่เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปรก็สามารถดูดซับไอออนทองแดงได้สูงเช่นกัน จึงไม่เหมาะในการนำมาเป็นตัวดูดซับเพื่อเลือกการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ตัวดูดซับที่ใช้เพื่อการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว นั้น

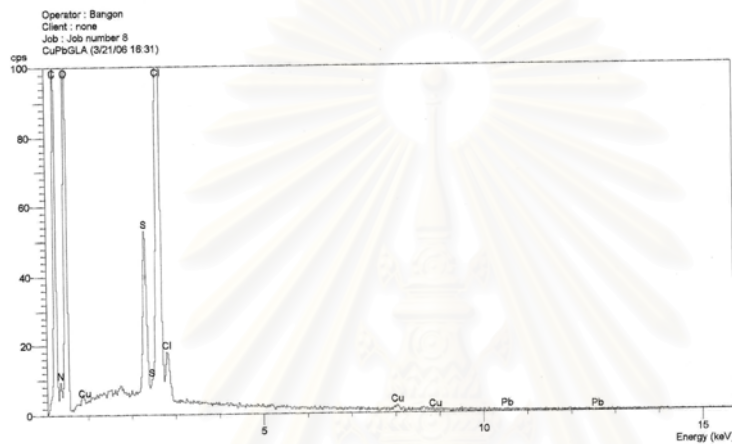
การแสดงผลต่างการดูดซับของไอออนทั้งสองแตกต่างกันอย่างมากจึงจะส่งผลต่อการเลือกดูดซับได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองพบว่า เรซินไคโตซานที่แสดงความแตกต่างของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว โดยที่สามารถดูดซับไอออนทองแดงมากกว่าไอออนตะกั่วคือ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และเรซินไคโตซานที่แสดงความแตกต่างของการดูดซับไอออนตะกั่วและไอออนทองแดง โดยที่สามารถดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าไอออนทองแดงคือ ไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซาน ดังนั้น ตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยการดูดซับไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมต่อไป คือ ไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซานและกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ในการดูดซับไอออนตะกั่วและไอออนทองแดง ตามลำดับ ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซาน เพื่อดูความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยวิเคราะห์ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วได้

จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวของไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซานและกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน โดยไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซานก่อนการดูดซับไอออนตะกั่วมีลักษณะเป็นรูพรุน พื้นผิวเป็นลักษณะเรียบ (Homogeneous surface) เมื่อทำการดูดซับไอออนตะกั่วพบว่า มีจุดขาวเล็กๆ ซึ่งเป็นไอออนตะกั่วจับที่พื้นผิวภายหลังการดูดซับ ส่วนพื้นผิวมีลักษณะเรียบแต่หนาขึ้น และเมื่อทำการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงผสมกัน พบว่า มีจุดขาวเล็กๆ ซึ่งเป็นไอออนตะกั่วจับที่พื้นผิว ลักษณะพื้นผิวมีทั้งเรียบและเป็นคลื่น ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับไอออนตะกั่วเพียงชนิดเดียว โดยส่วนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นคลื่นเกิดจากการดูดซับมีไอออนทองแดงที่พื้นผิวดูดซับ ส่วนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ก่อนการดูดซับไอออนทองแดง มีลักษณะเป็นรูพรุน พื้นผิวเป็นลักษณะเรียบเช่นเดียวกับไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซาน เมื่อทำการดูดซับไอออนทองแดง ลักษณะพื้นผิวเป็นคลื่น เนื่องจากเกิดการดูดซับไอออนทองแดงที่ผิวดูดซับ และเมื่อทำการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงผสมกัน จะแสดงทั้งพื้นผิวเรียบและเป็นคลื่น แต่จะไม่พบจุดขาวเล็กๆ ซึ่งเป็นไอออนตะกั่วจับที่พื้นผิวภายหลังการดูดซับมากนัก เมื่อเทียบกับไทโอไกลคอลิกในการดูดซับไอออนตะกั่ว



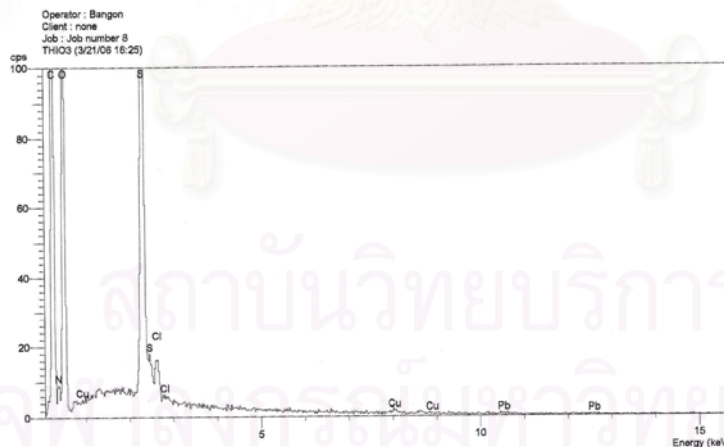
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของเรซินไคโตซาน (ก) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ก่อนการดูดซับไอออนตะกั่ว (ข) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนตะกั่ว (ค) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงแบบผสม (ง) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงแบบผสม (จ) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงแบบผสม (ฉ) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ก่อนการดูดซับไอออนตะกั่ว (ช) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนทองแดง (ซ) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน หลังการดูดซับไอออนตะกั่วและทองแดงแบบผสม

เมื่อนำกฤตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซานจากการวิเคราะห์พื้นผิวที่สังเกตเห็นไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จึงนำมาวิเคราะห์ EDX ยืนยันว่าตัวดูดซับสามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า กฤตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานเลือกดูดซับไอออนทองแดง จะเห็นว่ามีพีคของทองแดงปรากฏอยู่ในปริมาณที่มากกว่าไอออนตะกั่ว เช่นเดียวกับไทโอไกลคอลลิกเลือกดูดซับไอออนตะกั่ว จะเห็นว่ามีพีคของตะกั่วปรากฏอยู่ในปริมาณที่มากกว่าไอออนทองแดง



| ธาตุ | % ธาตุ |
|------------|--------|
| C | 30.08 |
| N | 18.05 |
| O | 44.25 |
| S | 1.55 |
| Cl | 5.63 |
| Cu | 0.27 |
| Pb | 0.17* |
| รวมทั้งหมด | 100.00 |

(ก)



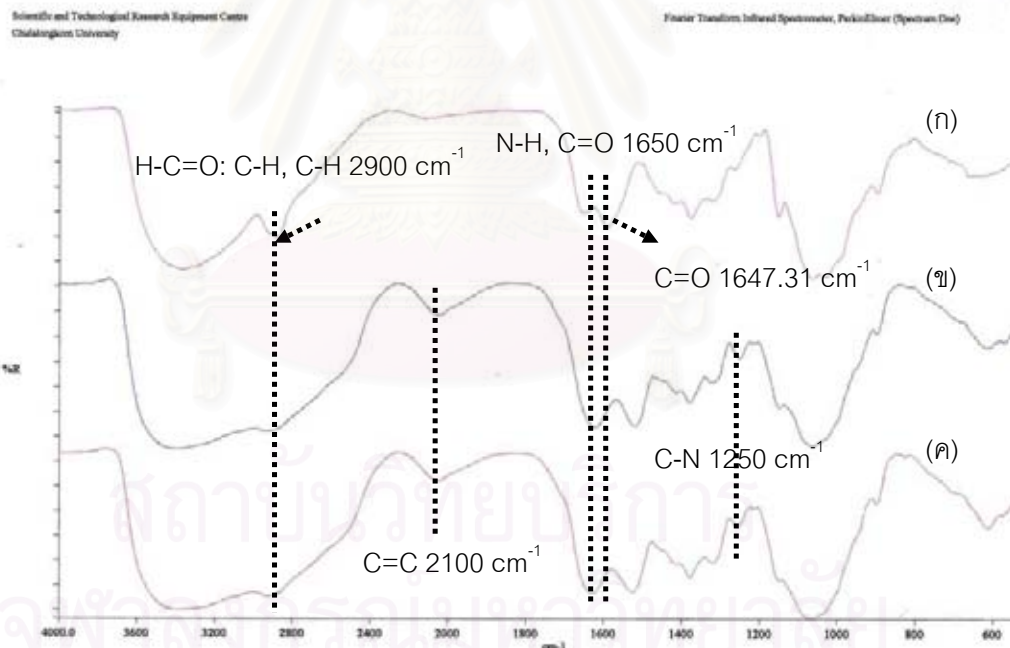
| ธาตุ | % ธาตุ |
|------------|--------|
| C | 34.25 |
| N | 19.03 |
| O | 41.88 |
| S | 3.91 |
| Cl | 0.39 |
| Cu | 0.18* |
| Pb | 0.35 |
| รวมทั้งหมด | 100.00 |

(ข)

* น้อยกว่า 2 ซิกมา

รูปที่ 4.4 EDX (ก) กฤตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานในการเลือกดูดซับไอออนทองแดง และ
(ข) ไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซานในการเลือกดูดซับไอออนตะกั่ว

เมื่อนำกลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน มาวิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จึงนำมาวิเคราะห์ FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากรูปที่ 4.5 พบว่า การดูดซับไอออนทองแดงของกลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน จะแสดงหมู่ C=C stretch ในช่วง 2100 cm^{-1} N-H, C=O stretch ในช่วง 1650 cm^{-1} และ C-N stretch ในช่วง 1250 cm^{-1} เช่นเดียวกับการดูดซับไอออนทองแดงและตะกั่วแบบผสมของ กลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน เมื่อเทียบกับกลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานก่อนการดูดซับ ไอออนโลหะหนัก ทำให้ทราบว่าไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วเข้าทำที่หมู่ฟังก์ชัน H-C=O: C-H, C-H และ C=O หลังการดูดซับไอออนโลหะหนัก จะมีหมู่ฟังก์ชัน C=C N-H C=O และ C-N ของกลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ปรากฏอย่างชัดเจน แต่ระหว่างการดูดซับ ไอออนทองแดงและไอออนโลหะหนักแบบผสม หมู่ฟังก์ชันไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก เนื่องจาก กลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานสามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดงได้ดีกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.3



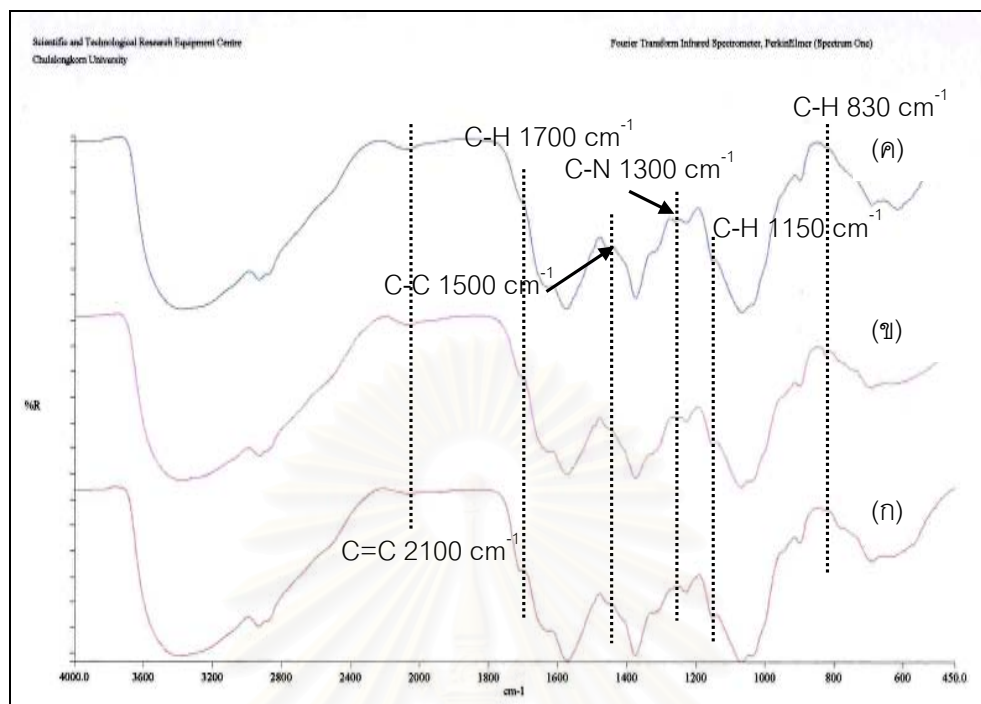
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบสเปกตรัมของกลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม (ก) กลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานก่อนการดูดซับไอออนโลหะหนัก(ข) กลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานหลังการดูดซับไอออนทองแดง (ค) กลูตาาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสม

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบสเปกตรัมของกลูตาออลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับ ไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม

| กลูตาออลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | หมู่ฟังก์ชัน | ช่วงสเปกตรัม (ซ.ม. ⁻¹) |
|------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| ก่อนดูดซับไอออนโลหะหนัก | H-C=O: C-H, C-H | 2900 |
| | C=O | 1647.31 |
| หลังดูดซับไอออนทองแดง | C=C | 2100 |
| | N-H, C=O | 1650 |
| | C-N | 1250 |
| หลังดูดซับไอออนโลหะทองแดง และไอออนตะกั่วแบบผสม | C=C | 2100 |
| | N-H, C=O | 1650 |
| | C-N | 1250 |

จากรูปที่ 4.6 การดูดซับไอออนตะกั่วของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน จะแสดงหมู่ C-H stretch ในช่วง 1700 cm^{-1} และ 830 cm^{-1} ส่วนการดูดซับไอออนทองแดงและตะกั่วแบบผสม จะแสดงหมู่ C-N stretch ในช่วง 1300 cm^{-1} และ C-C stretch ในช่วง 1500 cm^{-1} เมื่อเทียบกับไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานก่อนการดูดซับไอออนโลหะหนักทำให้ทราบว่าไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วเข้าทำที่หมู่ฟังก์ชัน C=C จะมีหมู่ฟังก์ชัน C-N และ C-C ของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานปรากฏอย่างชัดเจน แต่ระหว่างการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนโลหะหนักแบบผสม หมู่ฟังก์ชันไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก เนื่องจากไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานสามารถเลือกดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบสเปกตรัมของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม (ก) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานก่อนการดูดซับไอออนโลหะหนัก (ข) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยว (ค) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบผสม

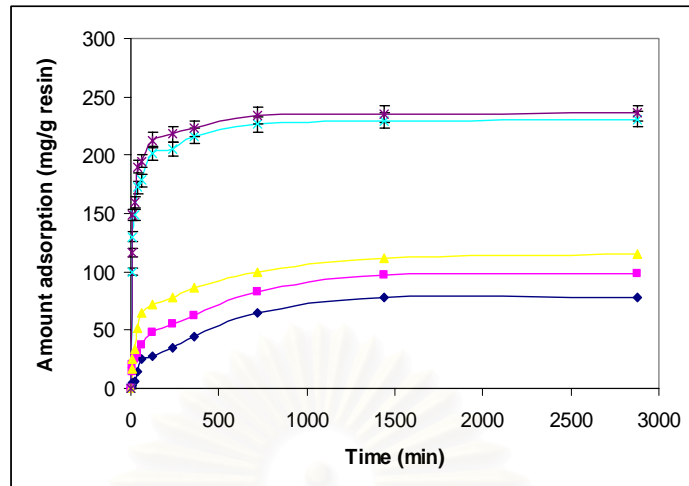
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสเปกตรัมของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยวและแบบผสม

| ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | หมู่ฟังก์ชัน | ช่วงสเปกตรัม (ซ.ม. ⁻¹) |
|-----------------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| ก่อนดูดซับไอออนโลหะหนัก | Aromatic peak | 1573.90 |
| | | 1228.62 |
| หลังดูดซับไอออนตะกั่ว | C-H | 1700 |
| | | 830 |
| | C-C | 1500 |
| | C-N | 1300 |
| หลังดูดซับไอออนโลหะทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสม | C-H | 1700 |
| | | 830 |

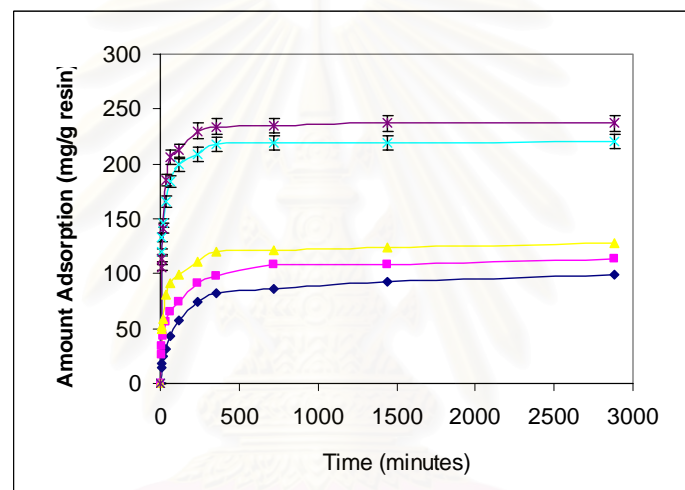
| | | |
|--|-----|------|
| | C-C | 1500 |
| | C-N | 1300 |

4.2.2 ปริมาณเรซินไคโตซานที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้ทราบว่า ลักษณะการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงบนกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน เริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 1,440 นาที และการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน เริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 360 นาที จากผลการศึกษาปริมาณเรซินไคโตซาน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานในการดูดซับไอออนทองแดงและเพิ่มปริมาณไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานในการดูดซับไอออนตะกั่ว จะส่งผลให้การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับไอออนโลหะหนักมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Karthikeyan และคณะ, 2004) ซึ่งปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักเพิ่มขึ้นนี้ ใช้สำหรับศึกษา Kinetics ของการดูดซับต่อไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ปริมาณเรซินไคโตซานชนิดละ 100 มิลลิกรัม และเวลาที่เข้าสู่สมดุล 1,440 นาที สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงบนกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และเวลาที่เข้าสู่สมดุล 360 นาที การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ในการทดลองต่อไป



(ก)

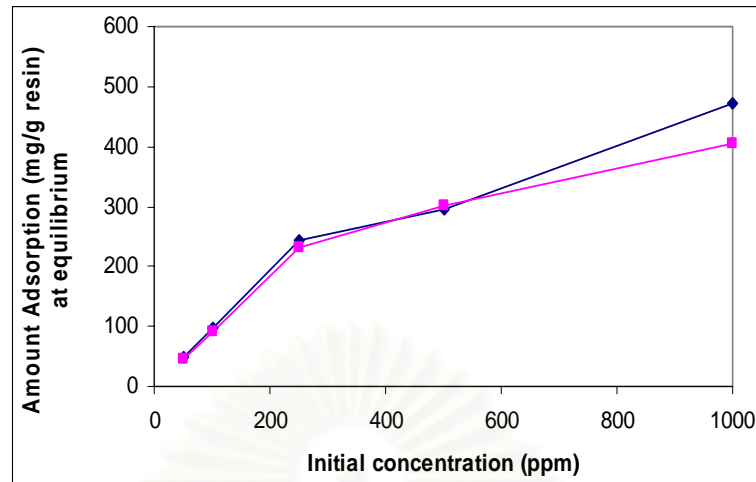


(ข)

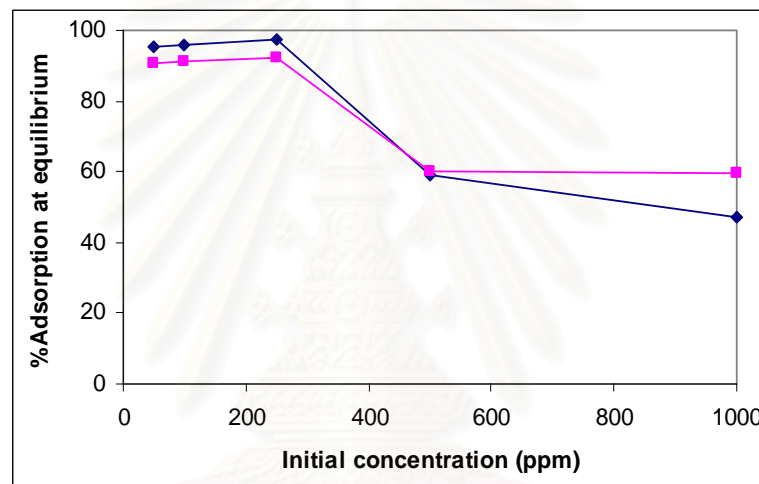
รูปที่ 4.7 ปริมาณเรซินไคโตซานต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน (◆ ปริมาณเรซินไคโตซาน 20 มิลลิกรัม ■ ปริมาณเรซินไคโตซาน 40 มิลลิกรัม △ ปริมาณเรซินไคโตซาน 60 มิลลิกรัม × ปริมาณเรซินไคโตซาน 80 มิลลิกรัม ✱ ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 4.5-5.0

4.2.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

จากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วจาก 50 พีพีเอ็ม ถึง 1000 พีพีเอ็ม โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน อย่างละ 100 มิลลิกรัม ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงต่อกรัมของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนักจะทำให้มีปริมาณไอออนโลหะหนักในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มแรงดึงดูด (Driving force of concentration gradient) ในการดูดซับระหว่างไอออนของโลหะหนักกับตัวดูดซับได้มากขึ้น (Ming และ Hsing, 2002) แต่จากรูปที่ 4.8(ข) พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม และลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนักสูงกว่า 250 พีพีเอ็ม (ความเข้มข้นของสารละลายที่ 500 พีพีเอ็ม และ 1000 พีพีเอ็ม) เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณไอออนโลหะหนักมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Karthikeyan และคณะ, 2004) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักเพิ่มขึ้นนี้ ใช้สำหรับศึกษา Kinetics ของการดูดซับต่อไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ในการทดลองต่อไป



(ก)

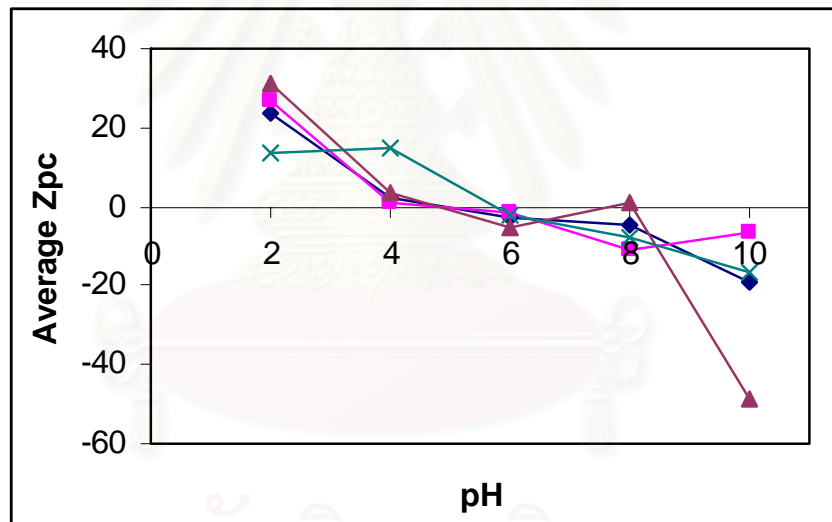


(ข)

รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน (ก) ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ข) เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (◆ การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ■ การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 4.5-5.0

4.2.4 ค่าพีเอชที่ทำให้เรซินไคโตซานชนิดต่างๆมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก

เมื่อทำการพิจารณาค่าประจุที่ผิวหน้าของเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ ณ ค่าพีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปรมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก (pH_{ZPC}) มีค่าเท่ากับ 5.9 กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน และไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 5.0 นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าประจุบนผิวเรซินไคโตซานชนิดต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช โดยเมื่อค่าพีเอชมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเรซินไคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก เรซินไคโตซานนั้นจะมีประจุบวกบนผิวหน้า แต่เมื่อค่าพีเอชสูงกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเรซินไคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกบนผิวหน้า เรซินไคโตซานนั้นจะมีประจุลบบนผิวหน้า



รูปที่ 4.9 ค่าความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกของเรซินชนิดต่างๆ (x เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร ■ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ◆ คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน ▲ ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน)

4.2.5 ค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

เมื่อปรับค่าพีเอชในสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว พบว่า ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 5-8 จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ในสารละลายไอออนโลหะหนัก ซึ่งยิ่งเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ของทองแดงและตะกั่วสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้นในสารละลายมีไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกทำการทดลองในช่วงพีเอช 2-8 เท่านั้น สำหรับตะกอนที่เกิดขึ้นในสารละลายไอออนโลหะหนักจะทำการกรองก่อนจึงนำไปทำการทดลองการดูดซับ จากรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและต่อการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ปริมาณไอออนทองแดงต่อกรัมของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน มีค่าสูงสุดเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 2 (98.1%) และปริมาณไอออนตะกั่วต่อกรัมของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน มีค่าสูงสุดเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 4 (92.5%) ค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 2-4 ซึ่งมีภาวะเป็นกรด จะแสดงผลปริมาณไอออนที่ดูดซับต่อตัวดูดซับสูงกว่าผลที่ได้จากค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 5-8 ซึ่งเป็นช่วงกรดอ่อนและด่าง ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติของพื้นผิวของไคโตซาน (ประจุไฟฟ้า) และองค์ประกอบของสารละลายโลหะหนัก (สมบัติของโลหะหนัก) จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอชในสารละลายโลหะหนัก (Karthikeyan และคณะ, 2004) หรือการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไอออนโลหะหนัก (Cu^{2+} และ Pb^{2+}) และหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน ได้แก่ หมู่เอมีนหรือหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{NH}_2$ or $-\text{OH}$) (Ming และ Hsing, 2002)

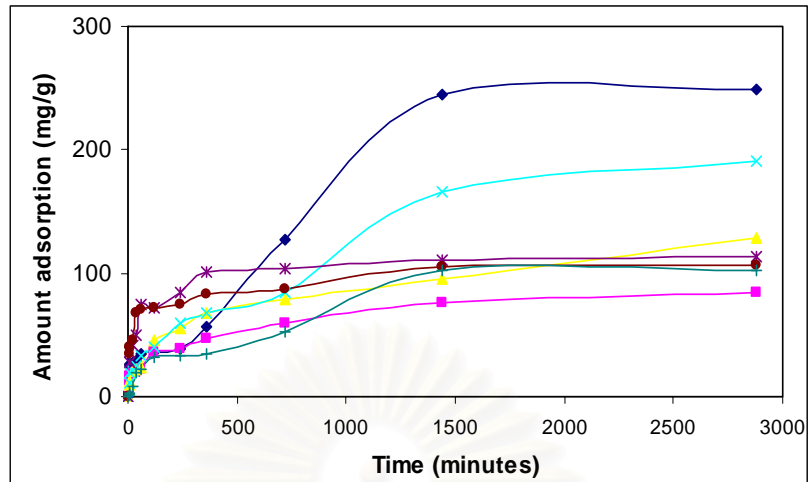
เมื่อพิจารณาการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน พบว่า ที่ค่าพีเอชต่ำๆ หมู่เอมีนในเรซินไคโตซานสามารถรับโปรตอนได้ง่ายและอยู่ในรูปของ NH_3^+ ทำให้เกิดการผลัดกันระหว่าง NH_3^+ กับ Pb^{2+} และในภาวะที่เป็นกรดจะเกิดการแข่งขันระหว่างไอออนตะกั่วและโปรตอน ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงลดลง (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547) เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานสามารถดูดซับได้ดีขึ้นจนถึงค่าพีเอช 4 แต่เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า 4 ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากค่าพีเอชที่ผิวหน้าของไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 5 ค่าพีเอชที่น้อยกว่า 5 จะทำให้ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานมีประจุที่ผิวเป็นบวก จึงเกิดการผลัดกันระหว่างไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานกับไอออนตะกั่ว และเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น (เป็นกรดอ่อนๆ) ทำให้ OH^- เริ่มมีมากขึ้น ไอออนตะกั่วจึงเลือกที่จะจับ OH^- มากกว่า

สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน พบว่า ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชที่ผิวหน้าของ

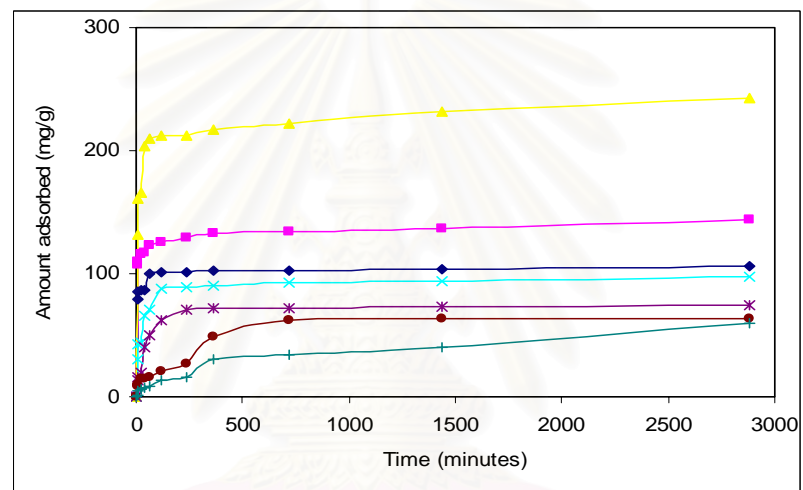
กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานที่มีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 5 แต่ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (H-C=O : C-H และ C=O) ดังแสดงผลในรูปที่ 4.5 (ก) เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว เมื่อเกิดการดูดซับไอออนทองแดงหมู่ฟังก์ชันจะหายไปหรือพบน้อยลง แต่ปรากฏหมู่ C=C N-H C=O และ C-N ชัดเจน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวทำปฏิกิริยากับโปรตอนทำให้เกิดเป็นประจุลบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประจุบวกของไอออนทองแดงชอบที่จับกับประจุลบของหมู่ฟังก์ชัน ตามทฤษฎีของ Pearson's Hard Soft [Lewis] Acid Base ซึ่งกรดแก่ทำปฏิกิริยากับด่างแก่ และกรดอ่อนทำปฏิกิริยากับด่างอ่อน แต่ที่ค่าพีเอชสูงกว่า 5 การดูดซับจะลดลง เป็นไปในลักษณะเดียวกับการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ซึ่งขึ้นกับค่าพีเอชที่ผิวหน้าของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานที่มีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 5 เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น (เป็นกรดอ่อนๆ) ทำให้ OH^- เริ่มมีมากขึ้น ไอออนทองแดงจึงเลือกที่จะจับ OH^- มากกว่า

จากค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานแบบเดี่ยว จึงทำการศึกษาเพื่อหาค่าการเลือกดูดซับระหว่างไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ในช่วงที่ภาวะเป็นกรด คือ พีเอช 2-4 เนื่องจากที่ค่าพีเอช 5-8 สารละลายไอออนโลหะหนักเกิดตกตะกอน จึงไม่นำมาพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) พบว่า เมื่อใช้กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ค่าการเลือกดูดซับแตกต่างกันสูงสุดที่ค่าพีเอช 2 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบเดี่ยว จากนั้นจะนำค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ 2 และ 4 มาใช้ในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์และการเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



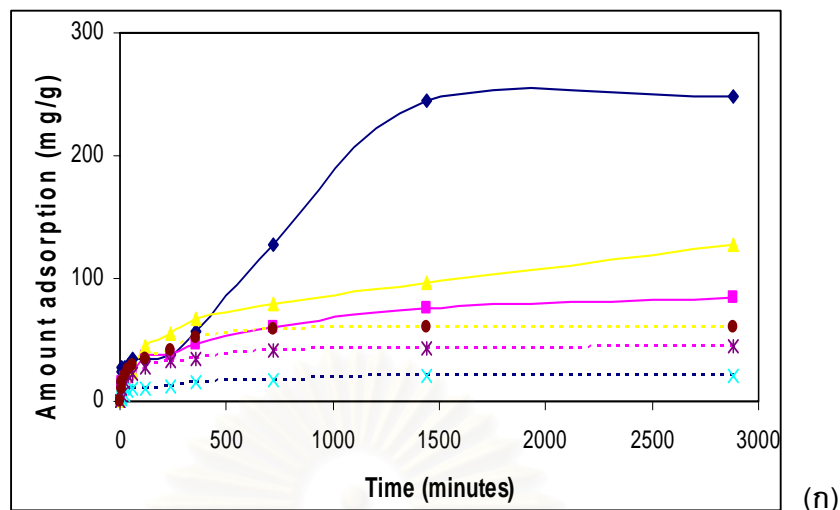
(ก)



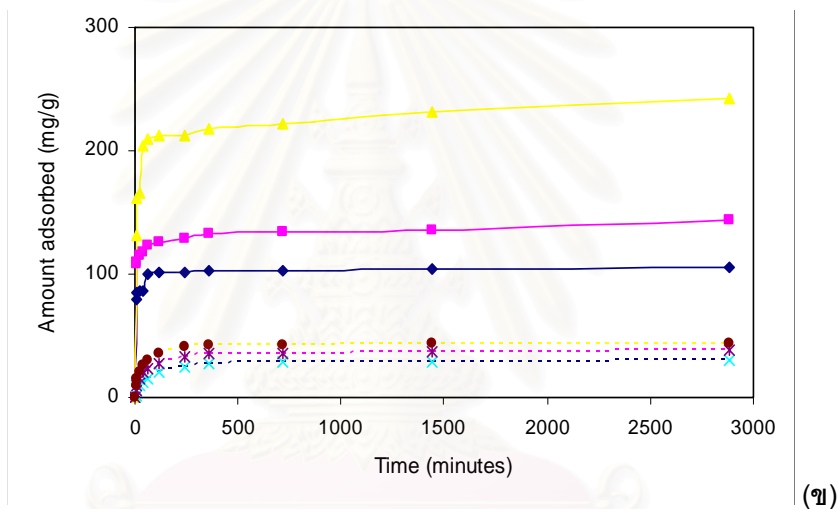
(ข)

รูปที่ 4.10 ค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนัก (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (◆ ค่าพีเอช 2 ■ ค่าพีเอช 3 ▲ ค่าพีเอช 4 ✕ ค่าพีเอช 5 * ค่าพีเอช 6 ● ค่าพีเอช 7 + ค่าพีเอช 8) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



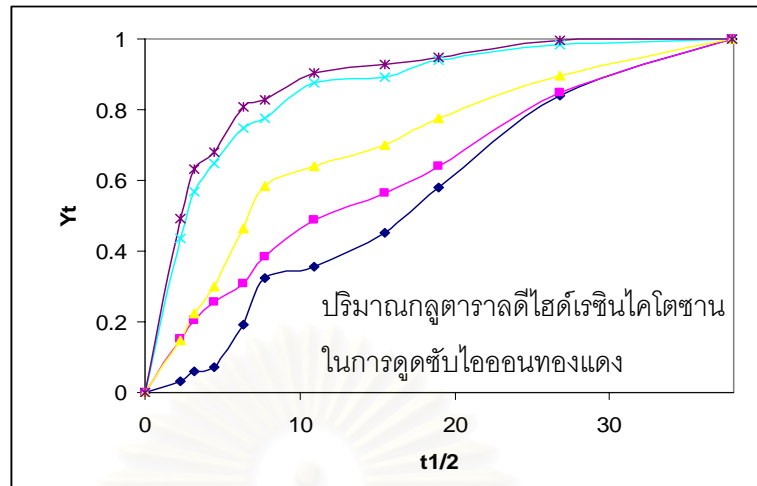
(ข)

รูปที่ 4.11 ความแตกต่างของค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนักในการเลือกดูดซับไอออนโลหะหนักในภาวะเป็นกรด ช่วง 2-4 (ก) การเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (◆ ค่าพีเอช 2 ■ ค่าพีเอช 3 ▲ ค่าพีเอช 4 ✕ ค่าพีเอช 2 ของการดูดซับไอออนตะกั่ว * ค่าพีเอช 3 ของการดูดซับไอออนตะกั่ว และ ● ค่าพีเอช 4 ของการดูดซับไอออนตะกั่ว) (ข) การเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (◆ ค่าพีเอช 2 ■ ค่าพีเอช 3 ▲ ค่าพีเอช 4 ✕ ค่าพีเอช 2 ของการดูดซับไอออนทองแดง * ค่าพีเอช 3 ของการดูดซับไอออนทองแดง และ ● ค่าพีเอช 4 ของการดูดซับไอออนทองแดง) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม

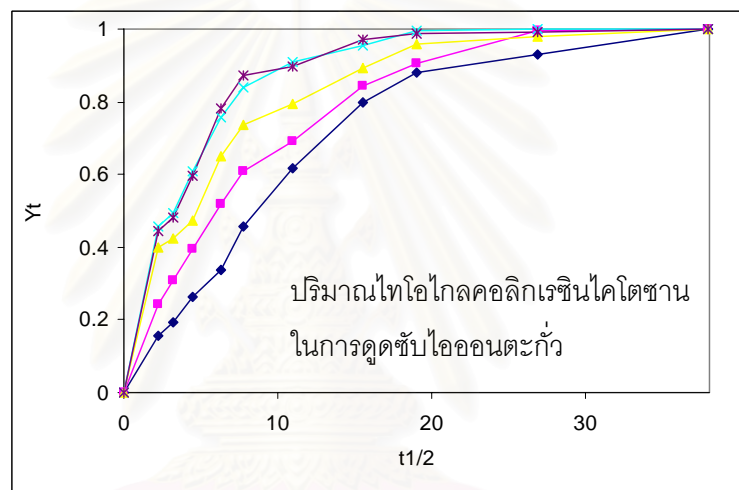
4.2.6 ค่าสัดส่วนการดูดซับขึ้นกับเวลา (Time dependence of fraction of adsorption)

ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนโลหะหนัก ปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณเรซินไคโตซานที่ดีที่สุดในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว สำหรับ Y_t เป็นสัดส่วนการดูดซับไอออนทองแดงบนกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน $t^{1/2}$ เป็น retention time สำหรับค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จะอธิบายถึงขั้นตอนการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ซึ่งสามารถแสดงได้ 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นที่ 1 คือ ไอออนของโลหะหนักในสารละลายแพร่ไปยังผิวของตัวดูดซับ ชั้นที่ 2 คือ ไอออนโลหะหนักจากผิวของตัวดูดซับแพร่ไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ และชั้นสุดท้าย คือ ไอออนโลหะหนักเข้าสู่สมดุล (Karthikeyan และคณะ, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ยิ่งเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้ ขั้นตอนการดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จะชันเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5–10 นาทีแรก สอดคล้องกับการศึกษาปริมาณเรซินไคโตซาน เช่นเดียวกับรูปที่ 4.13 ยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก ขั้นตอนการดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จะชันเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5–10 นาทีแรก สอดคล้องกับการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก และที่ชั้นที่ 2 เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่ใช้ระยะเวลาในการดูดซับยาวนานที่สุด เป็นชั้นที่ไอออนโลหะหนักแพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ ถือได้ว่าชั้นที่ 2 เป็นตัวควบคุมการดูดซับ และที่ชั้นนี้เอง สามารถหาอัตราการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับในการดูดซับไอออนโลหะหนักต่อไปได้

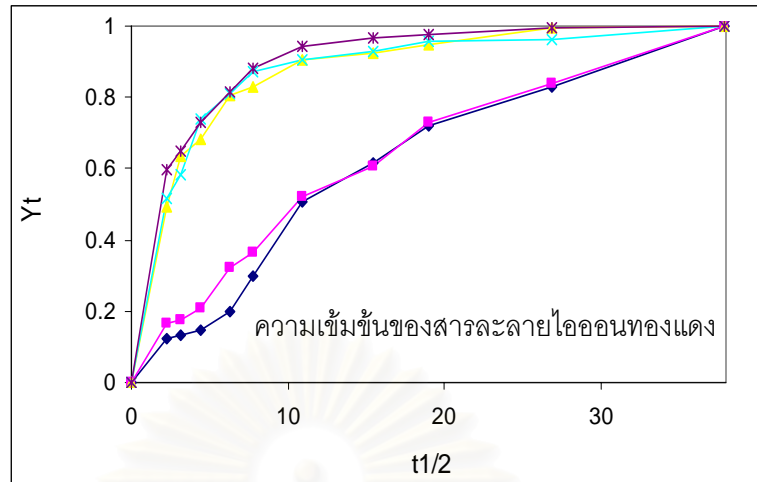


(ก)

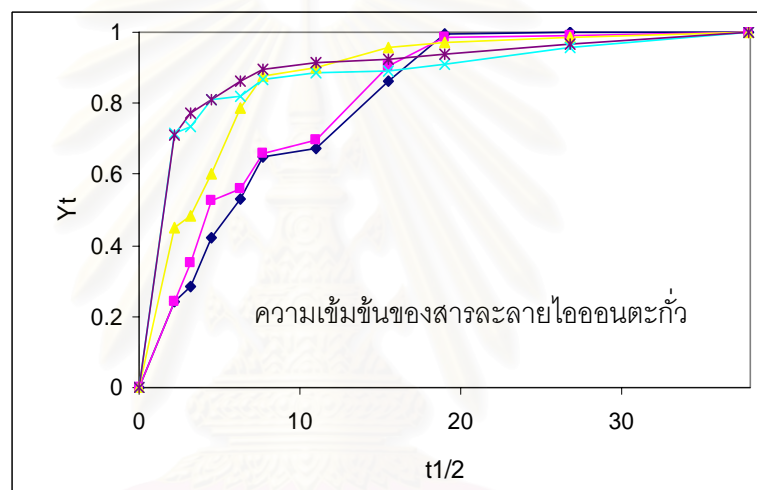


(ข)

รูปที่ 4.12 ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว
(ก) ปริมาณกลูตาแรลดีไฮด์เรซินโคโตซานในการดูดซับไอออนทองแดง (ข) ปริมาณไทโอไกลคอลลิกเรซินโคโตซานในการดูดซับไอออนตะกั่ว (◆) ปริมาณเรซินโคโตซาน 20 มิลลิกรัม (■) ปริมาณเรซินโคโตซาน 40 มิลลิกรัม (▲) ปริมาณเรซินโคโตซาน 60 มิลลิกรัม (▲) ปริมาณเรซินโคโตซาน 80 มิลลิกรัม (▲) ปริมาณเรซินโคโตซาน 100 มิลลิกรัม) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 4.5-5.0



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 ค่าสัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง (ข) ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว (◆ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 50 พีพีเอ็ม ■ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 100 พีพีเอ็ม ▲ พีพีเอ็มความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม ✕ ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 500 พีพีเอ็ม * ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 1000 พีพีเอ็ม) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 4.5-5.0

4.2.7 ค่าการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion)

การดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินไคโตซานมีอิทธิพลต่อการแพร่ของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว โดย k_p เป็นค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Abia และ Igwe, 2005)

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซานมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซานจาก 20 มิลลิกรัม ถึง 100 มิลลิกรัม แต่ปริมาณกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซานที่ 80 มิลลิกรัม และ 100 มิลลิกรัม อัตราการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับค่อนข้างคงที่ เนื่องจากปริมาณไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่แพร่เข้าไปในรูพรุนใกล้ถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณเรซินไคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ที่มีปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักใกล้เคียงกันที่ 80 มิลลิกรัม และ 100 มิลลิกรัม และค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในรูพรุนตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว จาก 50 พีพีเอ็ม ถึง 1000 พีพีเอ็ม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก ปริมาณในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น โดยชี้ให้เห็นว่าอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซาน (Karthikeyan และคณะ, 2004) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนการดูดซับในหัวข้อ 4.2.6

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของอัตราการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion rate constant) ของปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก

| ชนิดสารละลายไอออนโลหะหนัก | ค่าคงที่อัตราของการแพร่ภายในรูพรุน | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| | ปริมาณเรซินไคโตซาน (มิลลิกรัม) | k_p (นาที ^{-1/2}) | ความเข้มข้นของสารละลาย (พีพีเอ็ม) | k_p (นาที ^{-1/2}) |
| สารละลายไอออนทองแดงบน | 20 | 3.03 | 50 | 2.33 |
| กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 40 | 4.00 | 100 | 4.50 |
| | 60 | 6.38 | 250 | 14.39 |

| | | | | |
|---------------------------|-----|-------|------|-------|
| | 80 | 14.17 | 500 | 18.83 |
| | 100 | 14.39 | 1000 | 38.02 |
| สารละลายไอออนตะกั่วบน | 20 | 6.02 | 50 | 0.32 |
| ไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน | 40 | 7.18 | 100 | 6.45 |
| | 60 | 8.18 | 250 | 13.93 |
| | 80 | 13.92 | 500 | 16.40 |
| | 100 | 13.93 | 1000 | 31.87 |

4.2.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน มี 2 ลักษณะคือ แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) และเฟรนดริชไอโซเทอม (Freundlich Isotherm) ดังแสดงผลในตารางที่ 4.6

แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) ใช้อธิบายการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{1}{x/m}\right)$ และ $\left(\frac{1}{C_e}\right)$ จะได้เป็นกราฟเส้นตรง (ดูในภาคผนวก จ) และเฟรนดริชไอโซเทอม (Freundlich Isotherm) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ และ $\log(C_e)$ จะได้เป็นกราฟเส้นตรง สามารถหาค่าปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (Q) ค่า b คือ ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว และ 1/n คือ ความชอบในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า R^2 (Correlation coefficient) ในการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของแลงเมียร์ไอโซเทอมมากกว่าเฟรนดริชไอโซเทอม แสดงว่า การดูดซับไอออนโลหะหนักที่ศึกษาเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี พื้นผิวเป็นลักษณะเดียวกัน (Homogeneous surface) แต่สำหรับการศึกษาปริมาณเรซินไคโตซานในการดูดซับตะกั่ว พบว่า ค่า b ในแลงเมียร์ไอโซเทอม และค่า 1/n ในเฟรนดริชไอโซเทอมมีค่าเป็นลบ ดังแสดงในตาราง 4.5 ซึ่งไม่นิยมนำมาอธิบายในรูปของไอโซเทอม ดังนั้นไอโซเทอมสามารถอธิบายได้ในรูปของความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายที่ใช้ขนาดของตัวดูดซับ (Ming และ Hsing, 2002) อุณหภูมิในการดูดซับ (Karthikeyan และคณะ, 2004) ชนิดของโลหะหนัก (Iuzun และ Guzel, 2000) เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่แลงเมียร์ไอโซเทอมและเฟรนดริชไอโซเทอม

| ปัจจัยที่ศึกษา | โลหะหนัก | แลงเมียร์ไอโซเทอม | | | เฟรนดริชไอโซเทอม | | |
|---------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------------------------------------------------------|--------|----------------|
| | | $\left(\frac{1}{(x/m)}\right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0}\left(\frac{1}{C_e}\right)$ | | | $\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n}\log(C_e)$ | | |
| | | Q° (มก./มก.) | K (ลิตร/มก.) | R ² | K (ลิตร/มก.) | 1/n | R ² |
| ความเข้มข้นเริ่มต้น | ทองแดง | 0.7569 | 0.0336 | 0.9296 | 63.4454 | 0.3529 | 0.7514 |
| | ตะกั่ว | 0.6120 | 0.0142 | 0.9527 | 33.3273 | 0.4727 | 0.8711 |

4.3.9 ค่าคงที่อัตราการดูดซับของไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซาน

อัตราการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลิกเรซินไคโตซาน มี 2 ลักษณะคือ อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo - first order) และอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo - second order)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงได้ดังสมการที่ 4.1 (Ming และ Hsing, 2002) สามารถเขียนกราฟสมการเส้นตรงระหว่าง $\log(q_e - q)$ กับ t ซึ่งสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมอธิบายได้ดีในช่วงท้ายของการดูดซับ ไม่ครอบคลุมช่วงเวลาการดูดซับทั้งหมด

$$\log(q_e - q) = \log q_e - (k_1 t / 2.303) \quad (4.1)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q = ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงได้ดังสมการที่ 4.2 สามารถเขียนกราฟสมการเส้นตรงระหว่าง t/q กับ t ซึ่งสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สามารถใช้ในการอธิบายช่วงการดูดซับทั้งหมด และใช้ได้ดีเมื่อการดูดซับเป็นแบบเคมีหรือแลงเมียร์ไอโซเทอม โดยเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดวาเลนซ์ (Valence forces) หรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างโลหะหนักกับตัวดูดซับ

$$t/q = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (4.2)$$

- เมื่อ q_0 = ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q = ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_2 = อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม.นาท)

จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการดูดซับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พบว่า ค่า R^2 (Coefficient of determination) ของอัตราการดูดซับแบบอันดับหนึ่งเทียมมีค่าน้อยกว่าค่า R^2 ของอัตราการดูดซับแบบอันดับสองเทียม แสดงว่าอัตราการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน เมื่อศึกษาทั้งปัจจัยของปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสอง คือ อัตราการดูดซับเกิดได้รวดเร็วและใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลสั้น ปริมาณไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับในปริมาณที่มากในช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลสั้นๆ เป็นตัวชี้ให้เห็นว่าตัวดูดซับและไอออนโลหะหนักมีระดับความชอบในการดูดซับสูง โดยไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานมีความชอบในการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่ากลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานในการดูดซับทองแดง เห็นได้จากปริมาณไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานถูกดูดซับได้มาก ในช่วงเวลาเข้าสู่สมดุลที่สั้นกว่าปริมาณไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยที่ศึกษาข้างต้น สำหรับค่าคงที่อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1) ค่อนข้างแปรปรวนเนื่องจากไม่สามารถอธิบายปฏิกิริยาในช่วงเวลาดูดซับทั้งหมดได้ แต่จะใช้อธิบายช่วงท้ายของการดูดซับ ทำให้ค่าที่ได้ไม่เป็นตามความจริง ถ้าเทียบกับค่าคงที่อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2) ซึ่งสามารถอธิบายปฏิกิริยาช่วงเวลาดูดซับทั้งหมดของการดูดซับ เห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก ค่า k_2 จะลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่า q_0 กับ (Ming และ Hsing, 2002) พบว่า ค่า q_0 ที่ได้จากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการดูดซับของไอออนแบบอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก

| ชนิดไอออนโลหะหนัก | ปริมาณเรซินไคโตซาน (มิลลิกรัม) | ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม | | | ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม | | |
|--------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|--------|-------------------------|------------------|--------|
| | | K_1 (ต่อ นาที) | q_e (มก./ก.) | R^2 | k_2 (ก/มก. ต่อ นาที) | q_e (มก./ก.) | R^2 |
| การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 20 | 2.3×10^{-3} | 72.13 | 0.9798 | 1.4×10^{-4} | 83.33 | 0.9889 |
| | 40 | 2.3×10^{-3} | 75.86 | 0.9612 | 1.0×10^{-4} | 101.01 | 0.9937 |
| | 60 | 2.8×10^{-3} | 76.75 | 0.8860 | 7.0×10^{-5} | 117.65 | 0.9978 |
| | 80 | 5.1×10^{-3} | 82.42 | 0.8800 | 2.0×10^{-5} | 232.56 | 0.9999 |
| | 100 | 6.0×10^{-3} | 87.72 | 0.8980 | 2.0×10^{-5} | 238.10 | 0.9999 |
| การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 20 | 3.7×10^{-3} | 66.22 | 0.9120 | 1.0×10^{-4} | 101.01 | 0.9981 |
| | 40 | 5.3×10^{-3} | 67.47 | 0.8803 | 8.0×10^{-5} | 113.64 | 0.9993 |
| | 60 | 7.6×10^{-3} | 81.49 | 0.9853 | 6.0×10^{-5} | 128.21 | 0.9998 |
| | 80 | 1.11×10^{-2} | 88.00 | 0.9011 | 2.0×10^{-5} | 222.22 | 1.0000 |
| | 100 | 7.9×10^{-3} | 88.33 | 0.9383 | 2.0×10^{-5} | 232.56 | 1.0000 |
| | 1000 | 9.2×10^{-3} | 177.26 | 0.8929 | 3.0×10^{-6} | 588.24 | 1.0000 |
| ชนิดไอออนโลหะหนัก | ความเข้มข้นเริ่มต้น (พีพีเอ็ม) | ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม | | | ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม | | |
| | | K_1 (ต่อ นาที) | q_e (มก./ก.) | R^2 | q_e (มก./ก.) | K_1 (ต่อ นาที) | R^2 |
| การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 50 | 2.5×10^{-3} | 39.72 | 0.9960 | 4.0×10^{-4} | 49.75 | 0.9997 |
| | 100 | 2.5×10^{-3} | 74.63 | 0.9840 | 1.0×10^{-4} | 98.04 | 0.9998 |
| | 250 | 6.0×10^{-3} | 87.72 | 0.9535 | 2.0×10^{-5} | 238.10 | 0.9999 |
| | 500 | 3.7×10^{-3} | 91.22 | 0.9587 | 1.0×10^{-5} | 312.50 | 0.9997 |
| | 1000 | 6.9×10^{-3} | 186.42 | 0.9033 | 3.0×10^{-6} | 625.00 | 0.9998 |
| การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 50 | 1.04×10^{-2} | 34.02 | 0.9518 | 4.7×10^{-4} | 46.08 | 0.9996 |
| | 100 | 8.5×10^{-3} | 66.01 | 0.9227 | 1.1×10^{-4} | 93.46 | 0.9998 |
| | 250 | 7.9×10^{-3} | 88.33 | 0.9383 | 2.0×10^{-5} | 232.56 | 1.0000 |
| | 500 | 7.4×10^{-3} | 150.61 | 0.8070 | 1.0×10^{-5} | 303.03 | 1.0000 |

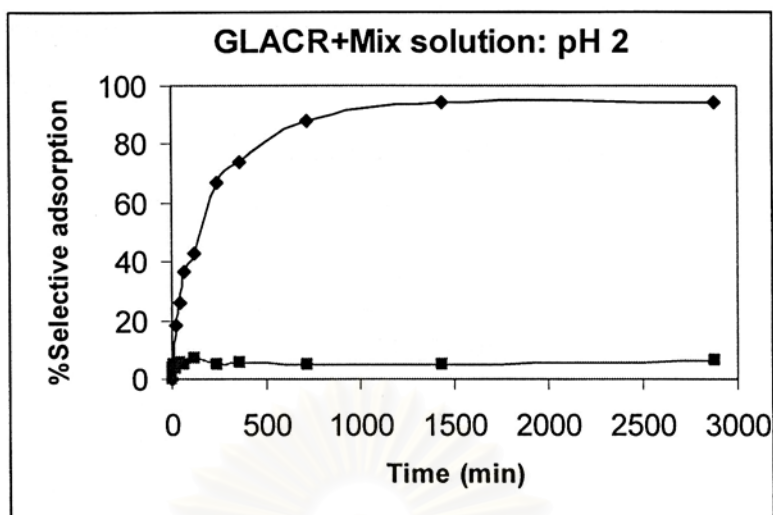
4.2.10 การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม

จากภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของสารละลายไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยว คือ การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 และการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม) นำมาศึกษาการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม

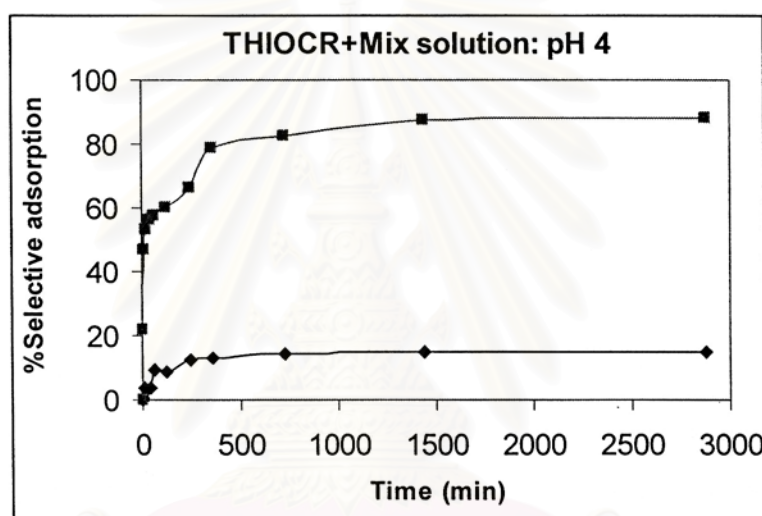
จากรูปที่ 4.14 พบว่า กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซานสามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมได้ชัดเจน เช่นเดียวกับไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซานที่สามารถเลือกดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมได้ แต่การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซานในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซานในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม มีการแข่งขันดูดซับระหว่างไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการการดูดซับในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยว (Bong และคณะ, 2004 และ Genc และคณะ, 2002) ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนโลหะหนักผสม

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินโคโตซาน | ค่าพีเอชของสารละลายไอออนโลหะหนักเริ่มต้น | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ประสิทธิภาพในการเลือกดูดซับ (%) | |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | | | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| สารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม | กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน | 2 | 125 | 125 | 6.85 | 118.43 | 94.73 | 5.27 |
| สารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม | ไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน | 4 | 125 | 125 | 93.15 | 15.15 | 14.63 | 85.37 |



(ก)



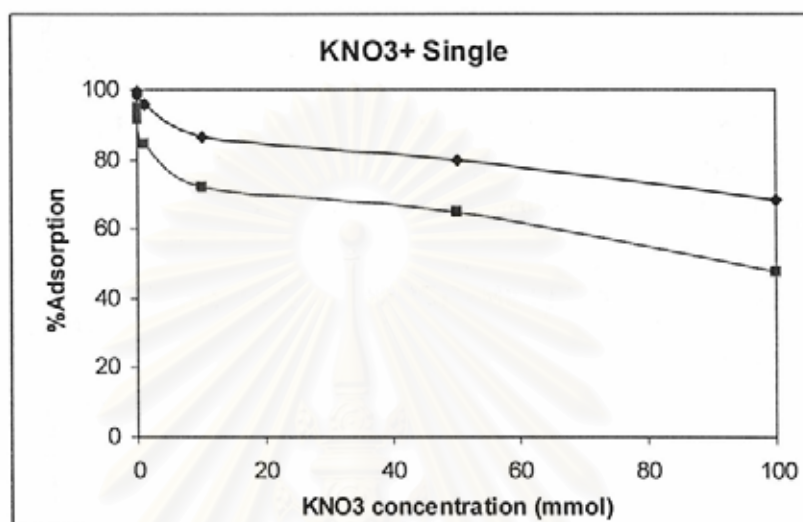
(ข)

รูปที่ 4.14 ร้อยละของการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบน (ก) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 2 และการเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบน (ข) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 4 (◆ ไอออนทองแดง ■ ไอออนตะกั่ว) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม)

4.2.11 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต

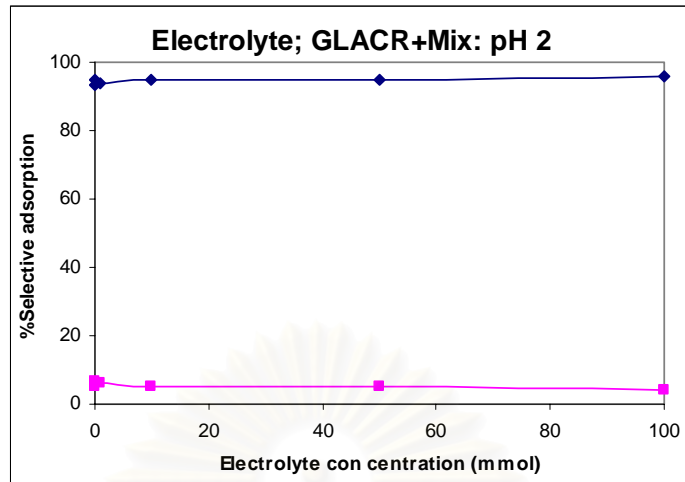
จากการศึกษาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบเดี่ยว พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่พีเอช 2 และ 4 ตามลำดับ จะลดลง ดังในรูปที่ 4.15 เนื่องจากหมู่โพแทสเซียมไอออน (K^+) ของโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) มีความเป็นกรดแก่มากกว่าไอออนของโลหะหนัก จึงชอบที่จะจับ

ต่างแก่มากกว่า ตามทฤษฎีของเพียร์สัน (Pearson's Hard Soft Lewis Acid Base) และหมู่โพแทสเซียมไอออน (K^+) มีขนาดเล็กกว่าประจุของไอออนโลหะหนัก จึงยับยั้งการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ทำให้ปริมาณการดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วลดลง (Karthikeyan และคณะ, 2004 และ Tanja และคณะ, 2000)

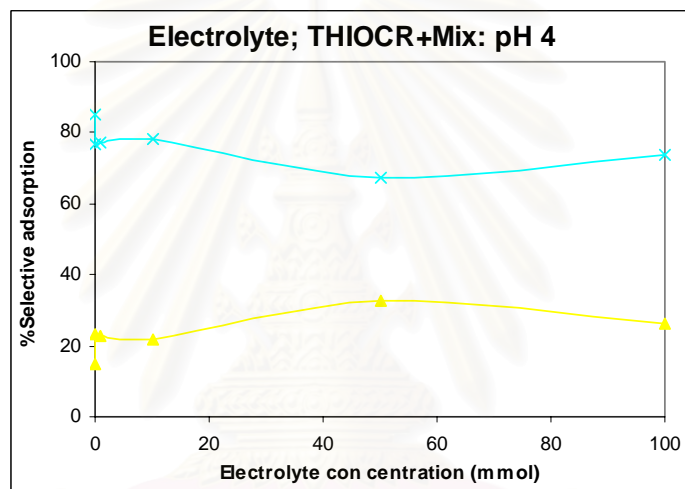


รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน และการดูดซับไอออนตะกั่วไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน ที่ความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว 250 มิลลิกรัม (◆ การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน ที่ค่าพีเอช 2 ■ การดูดซับไอออนตะกั่วไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน ที่ค่าพีเอช 4) ปริมาณเรซินโคโตซาน 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 250 พีพีเอ็ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อ (ก) การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ค่าพีเอชเท่ากับ 2 และ (ข) ต่อการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ค่าพีเอชเท่ากับ 4 ◆ การเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ■ การเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน × การเลือกดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ▲ การเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน) ปริมาณเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม)

จากรูปที่ 4.16 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่พีเอช 2 และ 4 ตามลำดับ จะลดลง เนื่องจากหมู่

โพแทสเซียมไอออน (K^+) ของโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) มีความเป็นกรดแก่มากกว่าไอออนของโลหะหนัก จึงชอบที่จะจับต่างแก่มากกว่า ตามทฤษฎีของเพียร์สัน (Pearson's Hard Soft Lewis Acid Base) ทำให้ปริมาณการดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วลดลง เช่นเดียวกับการดูดซับสารละลายโลหะหนักแบบเดี่ยว แต่เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การเลือกดูดซับ ดังตารางที่ 4.9 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ที่พีเอช 2 มีความสามารถในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 50.0 และ 100.0 มิลลิโมล ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่ำๆ หรือไม่มี แต่สำหรับไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ที่พีเอช 4 ความสามารถในการเลือกดูดซับไอออนตะกั่วจะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต เนื่องจากสารละลายโลหะหนักที่ค่าพีเอช 4 มีความสามารถในการเลือกดูดซับไอออนทองแดงที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่ำๆ หรือไม่มี ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

| ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต (มิลลิโมล) | กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | | ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | |
|----------------------------------------------|----------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | %การเลือกดูดซับ | | %การเลือกดูดซับ | |
| | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| 0 | 94.9 | 5.1 | 14.6 | 85.4 |
| 0.1 | 93.2 | 6.8 | 23.1 | 76.9 |
| 1 | 93.8 | 6.2 | 22.9 | 77.1 |
| 10 | 94.8 | 5.2 | 21.9 | 78.1 |
| 50 | 95.1 | 4.9 | 32.6 | 67.4 |
| 100 | 95.9 | 4.1 | 26.0 | 74.0 |

4.2.12 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode Experiment)

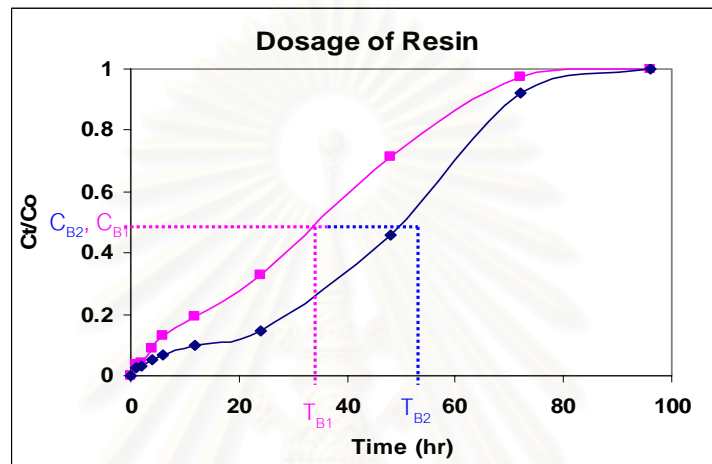
จากการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 2 แบบกะ เห็นได้ว่าสามารถที่จะเลือกดูดซับไอออนทองแดงออกจากไอออนตะกั่วได้ จึงได้นำมาทำการทดลองแบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลของปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้ แปรเป็น 1.5 กรัม (ความสูง 1.90 เซนติเมตร) และ 2.8 กรัม (ความสูง 3.50 เซนติเมตร) โดยให้อัตราการไหลคงที่ที่ 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที และศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ แปรเป็น 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 5 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะพิจารณาค่าขอบเขตการถ่ายโอนมวล (MTZ, mass transfer zone) เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับไอออนทองแดง ช่วงก่อนขอบเขตการถ่ายโอนมวลการดูดซับไอออนทองแดงของบนกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานจะเริ่มอิ่มตัว ช่วงหลังขอบเขตการถ่ายโอนมวลกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานยังไม่เกิดการดูดซับ ค่าขอบเขตการถ่ายโอนมวลจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของตัวถูกดูดซับ ลักษณะของตัวถูกดูดซับ และอัตราการไหลของตัวถูกดูดซับ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาปริมาณตัวถูกดูดซับ และอัตราการไหลของตัวถูกดูดซับ

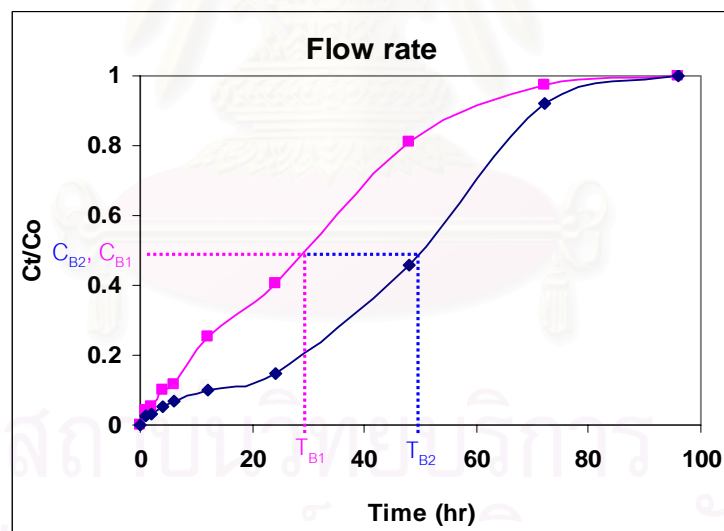
ผลการทดลองที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่ผ่านการดูดซับบนกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน โดยปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้ แปรเป็น 1.5 กรัม และ 2.8 กรัม โดยให้อัตราการไหลคงที่ที่ 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที และศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ แปรเป็น 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 5 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที ข้อมูลจากการทดลองนำมาเขียนเส้นโค้งเบรคทรูจ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นของทองแดงขาออกกับปริมาณไอออนทองแดงที่กำจัดได้ หรือเวลาสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเวลาเริ่มต้น ไอออนทองแดงที่ออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณไอออนทองแดงต่ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกดูดซับบนกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานในขั้นต้นๆ และเมื่อสารละลายไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้มีปริมาณไอออนทองแดงขาออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของกลุ่ตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานหมดสภาพ ปริมาณไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในคอลัมน์ขาออกจนมีค่าเท่ากับปริมาณไอออนทองแดงขาเข้าคอลัมน์ รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับเวลา เมื่อ C คือ ความเข้มข้นไอออนทองแดงขาออกจากคอลัมน์ที่เวลา t และ C_0 คือ ความเข้มข้นขาเข้าคอลัมน์แสดงขอบเขตการถ่ายโอนมวลเมื่อปริมาณตัวดูดซับและอัตราการไหลแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.17 เส้นโค้ง Breakthrough มีลักษณะเป็น s-shape (n) เมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณเรซินไคโตซานที่ 1.5 กรัม จะทำให้ Breakthrough time ที่เกิดขึ้นสั้นและขอบเขตการถ่ายโอนมวลมาก เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการ

ดูดซับลดลง เนื่องจากปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้มีปริมาณน้อย ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง ส่วน (ข) เมื่อปริมาณเรซินที่ใช้คงที่ 2.8 กรัม ที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้ Breakthrough time ที่เกิดขึ้นสั้นและขอบเขตการถ่ายโอนมวลมาก เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากเวลาที่เรซินไคโตซานสัมผัสกับสารละลายโลหะหนักมีน้อยลง ประสิทธิภาพของเรซินไคโตซานจะพิจารณาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough ดังแสดงในตารางที่ 4.7



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 เส้นโค้ง Breakthrough ของปัจจัยการเลือกดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม)

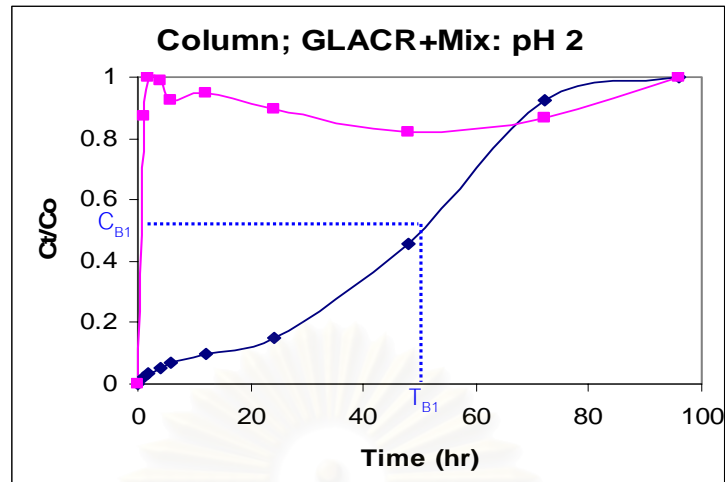
ตารางที่ 4.10 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)

| ปัจจัยที่ศึกษา | | เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) | ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร) |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|
| ปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้ | 1.5 กรัม | 35 | 1.2 |
| | 2.8 กรัม | 50 | 1.7 |
| อัตราการไหล | 2±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที | 50 | 1.7 |
| | 5±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที | 30 | 2.4 |

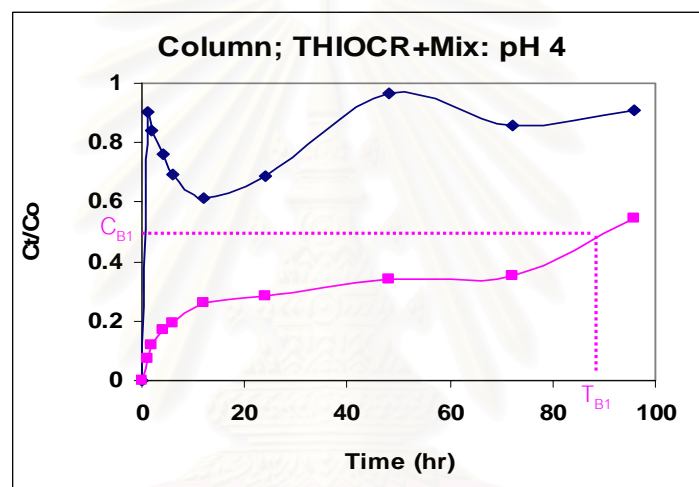
4.2.13 การเลือกจุดขับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบต่อเนื่อง (คอลัมน์เดียว)

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานแบบต่อเนื่อง คือ ปริมาณเรซินไคโตซานที่ใช้ 2.8 กรัม และอัตราการไหล 2±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นจะนำมาทำการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4

จากรูปที่ 4.18 เส้นโค้ง Breakthrough มีลักษณะเป็น s-shape เมื่ออัตราการไหลคงที่ที่ 2±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณเรซินไคโตซานคงที่ที่ 2.8 กรัม พบว่า (ก) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานเรซินสามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดงได้ดีในช่วงเวลาดังกล่าว ตั้งแต่ 0-40 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานดีกว่า (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน แต่หลังจากที่ 40 ชั่วโมงขึ้นไป ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานค่อนข้างคงที่ และที่เวลา 96 ชั่วโมงเช่นเดียวกันไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานยังไม่หมดประสิทธิภาพในการดูดซับเมื่อเทียบกับกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน เนื่องจากภาวะของสารละลายโลหะหนักที่ใช้ในการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานมีสภาพเป็นกรดสูง เมื่อใช้เป็นระยะเวลาานาน กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานจะเกิดการบวมตัว ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงลดลง ในขณะที่การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานในสารละลายโลหะหนักเป็นกรดอ่อน (พีเอช 4) ทำให้สามารถใช้ได้ยาวนานกว่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 เส้นโค้ง Breakthrough ของการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์ เรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 2 และการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ที่ค่าพีเอช 4 (◆ ไอออนทองแดง ■ ไอออนตะกั่ว) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร) แบบคอลัมน์เดี่ยว

| เรซินโคโตซานที่ใช้ | เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) | ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร) |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|
| การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน | 50 | 1.7 |
| การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน | 90 | - |

4.2.14 การเลือกดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบกึ่งต่อเนื่อง (คอลัมน์คู่)

นำสารละลายผสมระหว่างไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในอัตราส่วน 1: 1 ไหลผ่านคอลัมน์ที่ 1 ซึ่งบรรจุกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซานหนัก 2.8 กรัม และคอลัมน์ที่ 2 ซึ่งบรรจุไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซานหนัก 2.8 กรัม โดยที่พีเอชของสารละลายขณะผ่านเข้าสู่คอลัมน์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2 และทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 4 ก่อนผ่านเข้าสู่คอลัมน์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากการแบบต่อเนื่องสามารถใช้สนับสนุนผลการทดลองที่ได้จากข้างต้น โดยกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซานในคอลัมน์ที่ 1 เลือกดูดซับไอออนทองแดงได้สูงถึง 97.6 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ไอออนทองแดงเหลือในสารละลายเพียง 3.30 พีพีเอ็ม ซึ่งค่านี้อย่างเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง จึงทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็น 5.6 กรัม พบว่าไอออนทองแดงถูกดูดซับจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งค่านี้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (ตารางที่ 2.6) นั่นคือความเข้มข้นไอออนทองแดงในน้ำทิ้งน้อยกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซานในคอลัมน์ที่ 2 สามารถเลือกดูดซับได้สูงถึง 92.42 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ไอออนตะกั่วเหลือเพียง 9.47 พีพีเอ็ม ซึ่งค่านี้อย่างเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง จึงทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็น 5.6 กรัม พบว่าไอออนตะกั่วถูกดูดซับจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง นั่นคือความเข้มข้นไอออนตะกั่วในน้ำทิ้งน้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

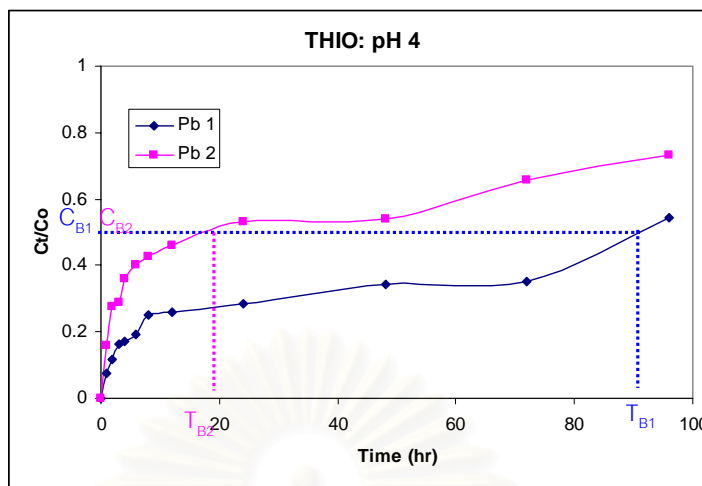
4.3.15 การฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียจำลองแล้ว สามารถทำการฟื้นฟูคุณภาพได้ด้วยการชะล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ จากนั้นนำมาทำการดูดซับน้ำเสียอีกครั้ง โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด โดยทำการทดลองแบบกะ ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และแบบต่อเนื่อง ใช้เวลาในการทดลอง 96 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานหลังผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ แบบกะ

| ชนิดเรซินไคโตซาน | ความเข้มข้นเริ่มต้น (พีพีเอ็ม) | | ปริมาณการดูดซับครั้งที่ 1 | | ปริมาณการดูดซับครั้งที่ 2 | | % การดูดซับครั้งที่ 1 | | % การดูดซับครั้งที่ 2 | |
|----------------------------|--------------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 125 | 125 | 118.15 | 8.21 | 114.9 | 19.07 | 94.52 | 5.25 | 91.92 | 15.25 |
| ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | | | 31.85 | 109.85 | 8.84 | 104.36 | 15.06 | 87.88 | 7.07 | 83.48 |

จากตาราง พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานหลังผ่านการฟื้นฟูประสิทธิภาพ แสดงว่ากลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วได้น้อยลง เนื่องจากการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกไม่สามารถดึงไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วออกจากผิวได้หมด ทำให้ตำแหน่งในการจับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและตำแหน่งในการจับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานลดลง



รูปที่ 4.19 เส้นโค้ง Breakthrough ของการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานแบบต่อเนื่องหลังฟื้นฟูประสิทธิภาพ (◆ การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซาน ■ การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานหลังฟื้นฟูคุณภาพ) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วแบบผสมในอัตราส่วน 1: 1 (ชนิดละ 250 พีพีเอ็ม) ที่ค่าพีเอช 4 ของสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสม

เนื่องจากการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานใช้ในภาวะที่เป็นกรดสูง เมื่อใช้เป็นระยะเวลาานาน ตัวดูดซับจะเกิดการรวมตัวและไม่อยู่ในลักษณะเป็นเม็ด ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในการฟื้นฟูได้ จึงไม่สามารถที่จะนำมาดูดซับได้อีกครั้ง จึงแสดงเฉพาะเส้นโค้ง Breakthrough ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานแบบต่อเนื่องหลังฟื้นฟูประสิทธิภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.10 พบว่าเส้นโค้ง Breakthrough ล้นกว่าก่อนการฟื้นฟูคุณภาพของไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานแสดงว่าไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วได้น้อยลง เนื่องจากการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกไม่สามารถดึงไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วออกจากผิวได้หมด ทำให้ตำแหน่งในการจับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและตำแหน่งในการจับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกรีซินไคโตซานลดลง

ตารางที่ 4.13 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร) ของการฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซาน

| การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานครั้งที่ | เวลาที่ 50% ของเส้นโค้ง Breakthrough (ชั่วโมง) | ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร) |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 90 | - |
| 2 | 19 | - |

4.2.16 การแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของเรซินไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

โดยการนำไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานและกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานในการดูดซับไอออนโลหะหนักที่ค่าพีเอช 4 แบบคอลัมน์คู่ มาทำการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเท่านั้น เนื่องจากกอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานที่ค่าพีเอช 2 มีสภาพบวมและแตกตัวจึงไม่นำมาทำการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นนำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ชะล้างไปวัดความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่ออกมาได้ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำการแยกด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Electro Analysis ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้คือขั้วแพลตินัม (Pt) ใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 0.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าที่เครื่อง Electro Analysis กำหนด และแปรความหนาแน่นกระแสเพิ่มเป็น 0.4 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสต่อการแยกไอออนทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาได้และร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง

| ชนิดเรซินไคโตซาน | อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที่) | ความหนาแน่นกระแส (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) | ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง |
|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|
| กอลลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 2±0.05 | 0.2 | 100.32 | 96.69 |
| | | 0.4 | | 98.97 |
| ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 2±0.05 | 0.2 | 62.44 | 98.50 |
| | | 0.4 | | 99.97 |

จากตารางที่ 4.14 พบว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่ชะล้างออกมาจากเรซินไคโตซานนั้นมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงต่างกัน เมื่อทำการแยกไอออนทองแดงโดยใช้ความหนาแน่นกระแสที่ต่างกัน พบว่า ความหนาแน่นของกระแสที่มากกว่า สามารถที่จะแยกไอออนทองแดงออกมาได้ดีกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.17 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

ได้ทำการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้ กับจากงานวิจัยอื่น ที่มีการศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักชนิดต่างๆ ถึงปัจจัยและผลการทดลองที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

| ปัจจัยที่ศึกษา | Rabindra และคณะ 2005 | Bong และคณะ 2004 | Kathikeyyan และคณะ 2004 | Choong และ Wolfgang 2003 | Tanja และคณะ 1999 | งานวิจัยนี้ |
|----------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ตัวดูดซับ | แอลจินิก, กรดเพกติก | แอลจินิก, ผงไคโตซาน, คาราจีแนน | เกล็ดไคโตซาน | ไคโตซานชนิดเม็ด | ไคโตซานชนิดเม็ด | เรซินไคโตซาน |
| ไอออนโลหะหนัก | ตะกั่ว, สังกะสี, ทองแดง | ตะกั่ว, พรอท, ทองแดง | สังกะสี | พรอท | นิกเกิล, สังกะสี, แคดเมียม | ตะกั่ว, ทองแดง |
| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | แบบเดี่ยว, แบบผสม | แบบเดี่ยว, แบบผสม | แบบเดี่ยว | แบบเดี่ยว | แบบเดี่ยว | แบบเดี่ยว, แบบผสม |
| การเลือกดูดซับ | กรดแอลจินิก: เลือกดูดซับไอออนตะกั่ว (81.0%) | แอลจินิก: เลือกดูดซับไอออนตะกั่ว (69.4%), ผงไคโตซาน: เลือกดูดซับไอออนพรอท (63.1%), คาราจีแนน: เลือกดูดซับไอออนทองแดง (7.1%) | เกล็ดไคโตซาน: ดูดซับไอออนสังกะสี (54.8%) | แอมิเนตไคโตซาน: ดูดซับไอออนพรอท (47.0%), | ไคโตซาน Derivative 5: เลือกดูดซับไอออนนิกเกิล (17.8%) ไคโตซาน derivative 6: เลือกดูดซับไอออนแคดเมียม (19.5%) | ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน: เลือกดูดซับไอออนตะกั่ว (85.4%), กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน: เลือกดูดซับไอออนทองแดง (94.7%) |

| การทดลอง | แบบกะ, แบบต่อเนื่อง | แบบกะ, แบบต่อเนื่อง | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ, แบบต่อเนื่อง |
|------------------------------|------------------------|---------------------|-------|-------|-------|--------------------------|
| อิเล็กโทรไลต์ | โพแทสเซียมไนเตรต | - | - | - | - | โพแทสเซียมไนเตรต |
| การฟื้นฟูคุณภาพ | - | - | - | - | - | กรดไฮโดรคลอริก |
| การนำไอออนโลหะหนัก กลับมา | - | - | - | - | - | เครื่อง Electro Analysis |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา การเตรียมเรซินไคโตซานสำหรับการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในน้ำเสีย โดยไคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งขาว ซึ่งน้ำเสียที่ใช้เป็นการสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ชนิดของเรซินไคโตซานที่เตรียมไว้สำหรับการเลือกดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วมี 4 ชนิด คือ เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน และไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน เรียงลำดับความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงจากมากไปน้อย ได้ผลดังนี้ คือ กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (97.3) เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร (74.2) คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน (73.4) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (36.2) ตามลำดับ และเรียงลำดับความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วจากมากไปน้อย ได้ผลดังนี้ คือ เรซินไคโตซานชนิดไม่ดัดแปร (96.0) ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (92.2) กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (26.2) คาร์บอกซิเลตเรซินไคโตซาน (14.8) ตามลำดับ

5.1.2 การเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซานและความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนัก

5.1.3 สำหรับเวลาสมดุลที่ใช้ในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ตามลำดับ คือ 1,440 นาที และ 360 นาที

5.1.4 ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วของกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน และไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน ตามลำดับ คือ 2 และ 4

5.1.5 สัดส่วนการดูดซับของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว สามารถแสดงให้เห็นขั้นตอนการดูดซับและการแพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้ ยิ่งเพิ่มปริมาณเรซินไคโตซาน

และความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ปริมาณการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็ว เห็นได้จากความชันในชั้นที่ 1 จะชันอย่างชัดเจน

5.1.6 ค่าการแพร่ภายในรูพรุนของการดูดซับ สามารถบอกได้ถึงอัตราเร็วของการดูดซับ สารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วเข้าไปภายในตัวดูดซับ ยิ่งเพิ่มปริมาณเรซินโคโคซาน และความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว อัตราการแพร่ภายในรูพรุน (K_p) จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ที่ 100 มิลลิกรัมของกลูตาราลดีไฮด์และไทโอไกลโคลิกเรซินโคโคซาน และความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว 250 พีพีเอ็ม มีค่าคงที่อัตราของการแพร่ภายในรูพรุนเท่ากับ 14.39 และ 13.93 นาที^{-1/2} ตามลำดับ

5.1.7 ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว สามารถอธิบายได้โดยใช้ แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) โดยสามารถดูดซับไอออนทองแดง 0.7569 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม และดูดซับไอออนตะกั่วได้ 0.6120 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม

5.1.8 อัตราการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วเป็นอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo - second order) คือ สามารถดูดซับได้เร็ว และใช้เวลาสั้นในการเข้าถึงสมดุล นิยมใช้อธิบายตลอดช่วงเวลาของการดูดซับทั้งหมด

5.1.9 ชนิดของเรซินโคโคซานและค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว มีผลต่อการเลือกดูดซับชนิดของสารละลายโลหะหนักแบบผสม โดยกลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโคซาน สามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 (94.73%) และไทโอไกลโคลิกเรซินโคโคซานสามารถเลือกดูดซับไอออนตะกั่ว ที่ค่าพีเอช 4 (85.37%)

5.1.10 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วจะลดลง ได้แก่ ที่ 100 มิลลิโมล เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงเหลือเพียง 68.6 และเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนตะกั่วเหลือเพียง 47.5 แต่สามารถเลือกดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายไอออนโลหะหนักแบบผสมได้

5.1.11 กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโคซานและไทโอไกลโคลิกเรซินโคโคซานที่ผ่านการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วในการศึกษาแบบกะและแบบต่อเนื่อง สามารถฟื้นฟูคุณภาพ

เรซินไคโตซานด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วนำมาใช้ได้อีก แต่ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่วลดลง (การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานจาก 94.52% เป็น 91.92% และการดูดซับไอออนทองแดงบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซานจาก 87.88% เป็น 83.48%)

5.1.12 ไอออนทองแดงที่ได้จากการชะล้างออกจากกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน จะนำมาแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะได้ทองแดงกลับคืนมาได้มากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ไม่ควรเก็บเรซินไคโตซานที่เตรียมไว้นานเกินกว่า 6 เดือน อาจทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

5.2.2 ควรดัดแปรเรซินไคโตซานสำหรับใช้ในการดูดซับไอออนโลหะหนักชนิดอื่น เช่น นิกเกิล เหล็ก เป็นต้น

5.2.3 แบ่งช่วงเวลาในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแต่ละช่วงเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบไหน

5.2.4 ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่ม นอกเหนือจากหมู่ไนเตรต (NO_3^-) เช่น หมู่ซัลเฟต (SO_4^-) หมู่คลอไรด์ (Cl^-) เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ทิพย์วิมล เกิดอิม. การจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.

เยาวพา ไหวพริบ. การผลิตไคตินและไคโตแซนจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.

วิสิฐ จະวะสิต และลูกจันทร์ ภัครัชพันธ์. ไคโตแซน (CHITOSAN) โพลีเมอร์ตัวใหม่จากของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ. วารสารอุตสาหกรรมเกษตร 1, (1) (มกราคม-เมษายน 2533).

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ภาษาอังกฤษ

Abia A. A. and Igwe J.C. Sorption kinetics and intraparticulate diffusives of Cd, Pb and Zn ions on maize cob. African Journal of Biotechnology 4 (6) (2005): 509-512.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology (ATRDR), September 2004.

Alber B. A Modified Langmuir Model of Adsorption; Stability of flows. [Online]. Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, 23 May 2003. Available from: <http://www.wias-berlin.De/people/albers> [2005, July]

Balkaya N. and Cesur H. Influence of operating parameters on lead removal from wastewater phosphogypsum. Environmental Technology 24 (2002): 727-733.

Bergan. Design and manufacturing for metal plating. [Online] Available from:

<http://www.bergen.org/AAST/Projects/RapidPrototyping/define.html> [2005, July]

Biopolymers; Making materials nature's way. 2- Technical overview of biopolymer field:
39 - 42.

Bong Chul Son, Kyungmoon Park, Seung Hoon Song and Young Je Yoo†. Selective Biosorption of Mixed Heavy Metal Ions using Polysaccharides. Korean J. Chem. Eng 21 (6) (2004): 1168-1172.

Choong Jeon, Wolfgang H. Holl. Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. Water Research 37 (2003): 4770-4780.

Dalwoo. Structure of Chitin / Chitosan and Cellulose. 2002. [Online] Available from:

<http://dalwoo.com/chitosan/structure.htm> and

<http://www.wellable.com/product/chitin.gif> [2005, May]

Dalwoo. Structure of Chitin / Chitosan and Cellulose. 2002. [Online] Available from:

<http://dalwoo.com/chitosan/structure.htm> and

<http://www.wellable.com/product/chitosan.gif> [2005, May]

Dalwoo. Preparation of chitin and chitosan. 2002. [Online] Available from:

<http://dalwoo.com/chitosan/preparation.htm> and

<http://user.chollian.net/~chitin/prechitosan.gif> [2005, May]

Dalwoo. Spectra of chitin / chitosan. 2002. [Online] Available from:

<http://dalwoo.com/chitosan/spectra.htm> [2005, May]

Electrochemical Products. Metal Plating Chemicals from EPI. 2006. [Online] Available from:
<http://www.epi.com/electroplating/?source=google&campaign=1&group=1>

ENSC 4734 Topic VI Sorption Phenomena on soils. [Online] Available from:

<http://soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf> [December 2005]

HO, T.-L. "Hard and Soft Acids and Bases Principle in Organic Chemistry". 1977.
. Academic Press, New york.

Ilhan Uzun, Fuat G"Uzel. Adsorption of Some Heavy Metal Ions from Aqueous Solution

- by Activated Carbon and Comparison of Percent Adsorption Results of Activated Carbon with those of Some Other Adsorbents. Turk J Chem 24 (2000): 291-297.
- Kathikeyan G., Anbalagan K. and Muthulakshmi Andal N. Adsorption dynamics and equilibrium studies of Zn (II) onto chitosan. Journal Chemical Science 116 (2) (2004): 119-127.
- Knorr D. User of chitinous polymer in food. Food Technology 38 (1984): 85.
- Lee V. Solution and Shear properties of chitin and chitosan. Ann Arbor 29 (1974): 446.
- Marczewski A.W. A Practical Guide to Isotherms of ADSORPTION on Heterogeneous Surfaces. 2002 [online] Available from: <http://adsorption.org/awm/ads/Iso-list.htm> [2006, Jan]
- McKay G., Ho Y. S. Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochem 34 (1999): 451-465.
- Ming-Shen Chiou, Hsing-Ya Li. Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross-linked chitosan beads. Journal of Hazardous Materials 1393 (2002): 233-248.
- Muzzarelli, R.A.A. Chitin. Toronto: Pergamon of Canada Ltd; 1977.
- Pacific Northwest Pollution Prevention Resource Center. Pollution Prevention in Metal Finishing: Plating. 1999. [Online] Available from: http://www.pprc.org/pubs/metalfin/rt_appc.html [2005, December]
- Rabindra Prasad Dhakal, Kedar Nath Ghimire, Katsutoshi Inoue, Masayuki Yano, Kenjiro Makino. Acidic polysaccharide gels for selective adsorption of lead (II) ion. Separation and Purification Technology 42 (2005): 219-225.
- Ravikumar Reddy A and Hussain Reddy K. Heavy metal ion uptake properties of polystyrene-supported chelating polymer resins. Proc Indian Acad Sci. (Chem. Sci) 115 (3) (2003): 155-160.
- Roberts. The Sorbents: Chitin, Chitosan and derivatives. 1992. [Online] Available from: http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0619102-193943/05CAPITOL3.pdf
- Saudi Fisheries Company. Checking Shrimp Quality. 2005. [Online] Available from: <http://www.saudi-fisheries.com/EN/Company/Facts/checking.htm> [2006, Feb]

- Schmuhl R, Krieg HM and Keizer K. Adsorption of Cu (II) and Cr (VI) ions by chitosan: Kinetics and equilibrium studies. Water SA 27 (1) (2001): 1-7.
- Sung-Tao Lee, Fwu-Long Mi, Yu-Ju Shen, Shin-Shing Shyu. Equilibrium and kinetic studies of copper (II) ion uptake by chitosan-tripolyphosphate chelating resin. Polymer 42 (2001): 1879-1892.
- Tanja Becker, Michael Schlaak, Henry Strasdeit. Adsorption of nickel (II), zinc (II) and cadmium (II) by new chitosan derivatives. Reactive & functional polymers 44 (2000): 289–298.
- Thailabonline.com. CHITON and CHITOSAN. 1999-2000. [online] Available from: <http://thailabonline.com/news3chitin-chitosan.htm> [2006, Jan]
- The Society of the Plastics Industry 1999. Definitions of plastic resins. [Online] Available from: <http://www.plasticsindustry.org/industry/defs.htm> [2006, Feb]
- Thomas Freier, Hui Shan Koh, Karineh Kazazian, Molly S. Shoichet. Controlling cell adhesion and degradation of chitosan films by N-acetylation. Biomaterials 26 (2005): 5872–5878.
- Vasanth Kumar K., Subanandam K., Ramamurthi V. and Sivanesan S. Solid Liquid Adsorption for Wastewater Treatment: Principle Design and Operation. February 2004. [Online] Available from: <http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html>
- Wikipedia TBE. Encycopedia. Adsorption. 2006 [online] Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorption>, [2006, March]
- Wong Y.C, Szeto Y.S, Cheung W.H. and McKay G. Adsorption of acid dye on chitosan-equilibrium isotherm analyses. Process Biochemistry 39 (2004): 693–702.
- Yan-Hui Li, Zechao Di, Jun Ding, Dehai Wu, Zhaokun Luan, Yanqiu Zhu. Adsorption thermodynamic, kinetic and desorption studies of Pb²⁺ on carbon nanotubes. Water Research 39 (2005): 605–609.
- Yoshinari Baba, Koichi Masaaki, Yoshinobu Kawano. Synthesis of a chitosan derivative recognizing planar metal ion and its selective adsorption equilibria of copper (II) over iron (III). Reactive & Functional Polymers 36 (1998): 167-172.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

1. ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

1.1 ค่าพีเอช (pH) ย่อมาจาก positive potential of the hydrogen ions เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\log [H^+]$ pH เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงให้ทราบสภาพค่าพีเอชของน้ำ กล่าวคือเมื่อ pH มีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าน้ำมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่า pH มีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าสภาพน้ำนั้นเป็นกรดหรือค่า pH มีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสภาพน้ำนั้นเป็นด่าง โดยทั่วไปค่า pH ของน้ำในสภาพปกติจะมีค่าในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

1.2 พีพีเอ็ม (ppm) ย่อมาจาก part per million เป็นหน่วยที่แสดงความเข้มข้นของสารละลายมีค่าเป็นหนึ่งในล้านส่วน หรือสามารถใช้หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรแทนได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การหาค่าสมบัติของเรซินไคโตซานและน้ำเสีย

สมบัติของเรซินไคโตซาน

1. Scanning Electron Microscopy (SEMs)

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy รุ่น JSM-5800LV และ JSM-5410LV

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์วางบนแท่นของลักษณะกลม ภายใต้ความดันที่ลดลง
2. เลือกตำแหน่งที่ต้องการดูลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับ

2. Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับ โดยใช้เครื่อง FTIR spectrophotometer รุ่น FT-IR 1760X

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ผสมกับ KBr และอัดให้เป็นลักษณะเม็ด
2. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับโดยแสดงในรูป spectra

สมบัติของน้ำเสีย

1. pH

วิธีวิเคราะห์ : วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter HORIBA

หมายเหตุ : รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

2. โลหะหนัก (Heavy metal)

การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Atomic Absorption Spectrometer รุ่น AA 6800) ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ต้องการวิเคราะห์โลหะหนักจะถูกเปรียบเทียบกับสารละลายโลหะหนักมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance กับค่าของสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน ซึ่งจะใช้เป็น Calibration Curve ในการหาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียที่ต้องการวิเคราะห์

อุปกรณ์ที่ใช้

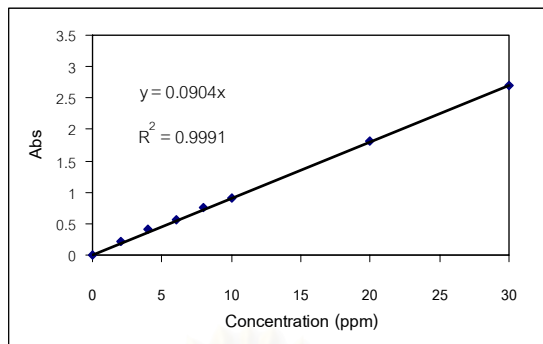
1. Atomic Absorption Spectrometer รุ่น AA 6800

สารเคมีที่ใช้

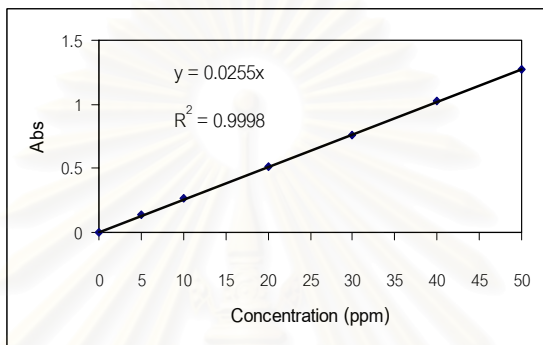
สารละลายทองแดงมาตรฐานและสารละลายตะกั่วมาตรฐาน เตรียมความเข้มข้นที่ต้องการ โดยใช้น้ำหนักปรับปริมาตร

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 10 20 และ 30 พีพีเอ็ม
2. นำสารละลายมาตรฐานทองแดงทั้งหมดมาทำการวัด Absorbance ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer โดยใช้ความยาวคลื่นในการวัดคือ 324.8 นาโนเมตร
3. เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้น 5 10 20 30 40 และ 50 พีพีเอ็ม
4. นำสารละลายมาตรฐานตะกั่วทั้งหมดมาทำการวัด Absorbance ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer โดยใช้ความยาวคลื่นในการวัดคือ 283.35 นาโนเมตร
5. นำน้ำเสียก่อนและหลังการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยใช้เรซินไคโตซานในแต่ละปัจจัยที่ศึกษา มาวัดค่า Absorbance จะทราบค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่วิเคราะห์



(ก)



(ข)

รูปที่ ข. 1 Calibration Curve ของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (ก) ทองแดง (ข) ตะกั่ว

3. ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ดูดซับ

การคำนวณ

$$Q = \frac{C_o V_o - C_e V_e}{W}$$

เมื่อ Q = ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

v_o = ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (ลิตร)

c_o = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

v_e = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายโลหะหนัก (ลิตร)

c_e = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

w = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

4. เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (R %)

สัดส่วนการลดลงของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักหลังจากดูดซับ

$$R\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

เมื่อ R% = เปอร์เซ็นต์การดูดซับ

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

5. ค่าการคายการดูดซับของโลหะหนักด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

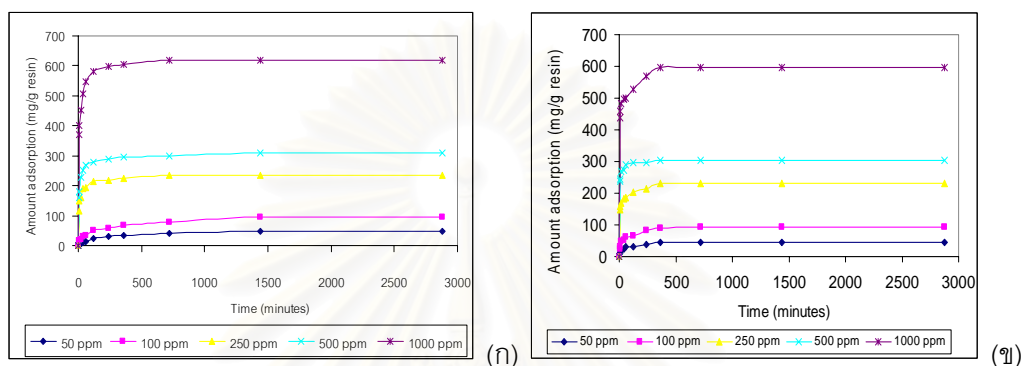
การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคายการดูดซับ} = \frac{\text{ปริมาณไอออนโลหะหนักที่คายการดูดซับ}}{\text{ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับ}} \times 100$$

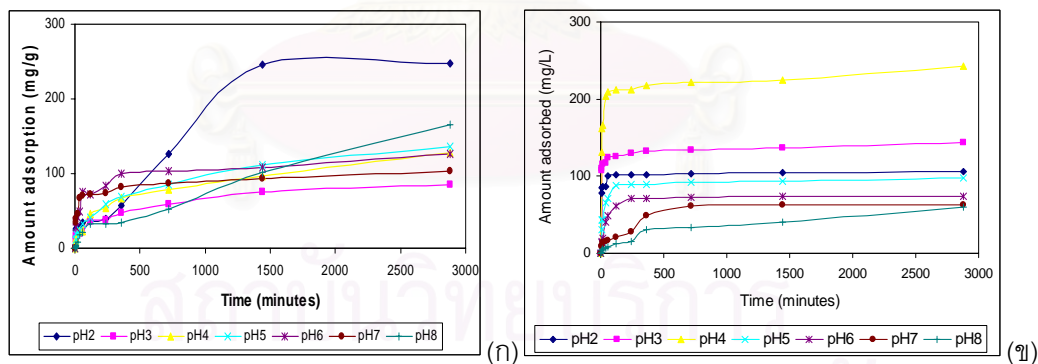
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ผลของการดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซานและการดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน ที่ช่วงเวลาต่างๆ

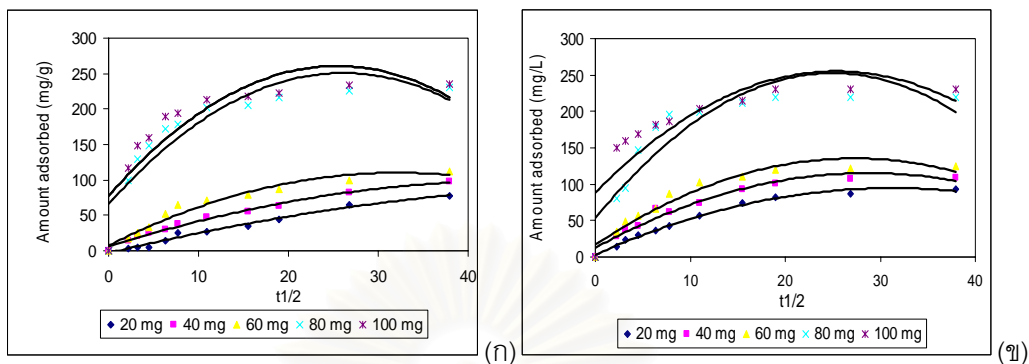


รูปที่ ค.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน

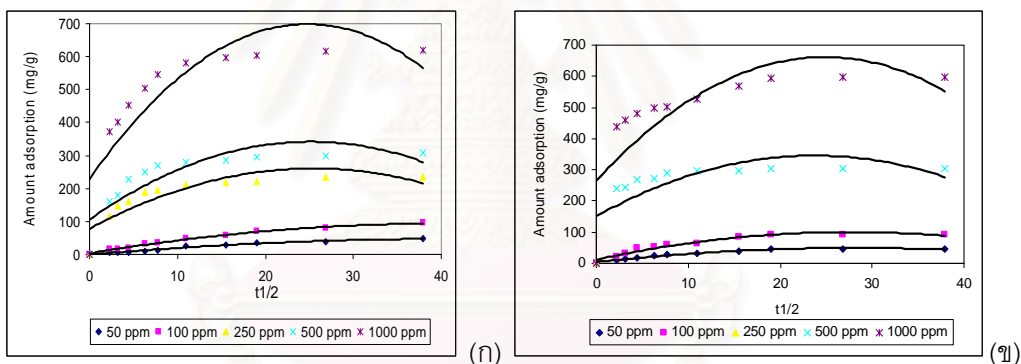


รูปที่ ค.2 ค่าพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโตซาน

อัตราการแพร่ภายในรูปพรุนของตัวดูดซับในสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

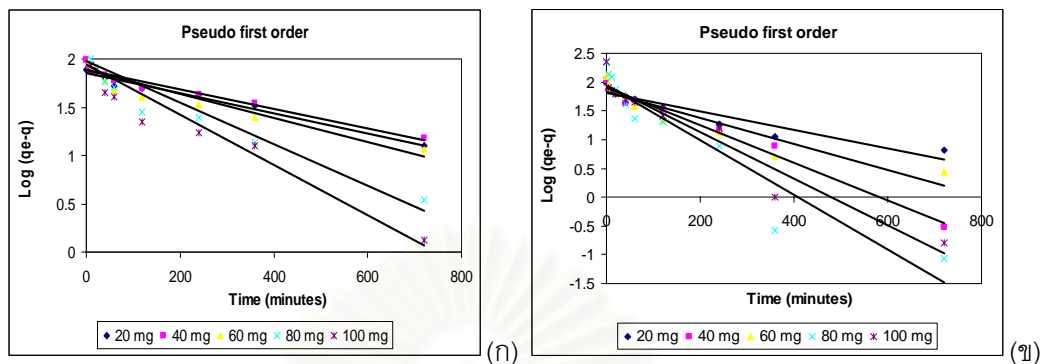


รูปที่ ค.3 ค่าการแพร่ภายในรูปพรุนของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

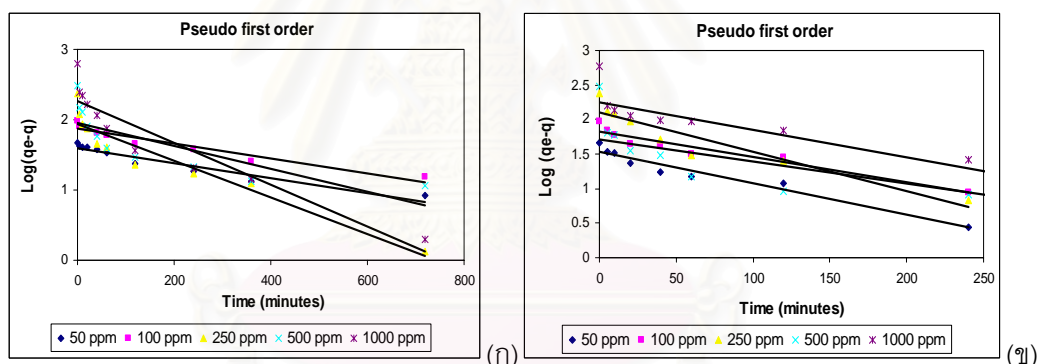


รูปที่ ค.4 ค่าการแพร่ภายในรูปพรุนของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

อัตราการเกิดปฏิกิริยอันดับหนึ่งเทียมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

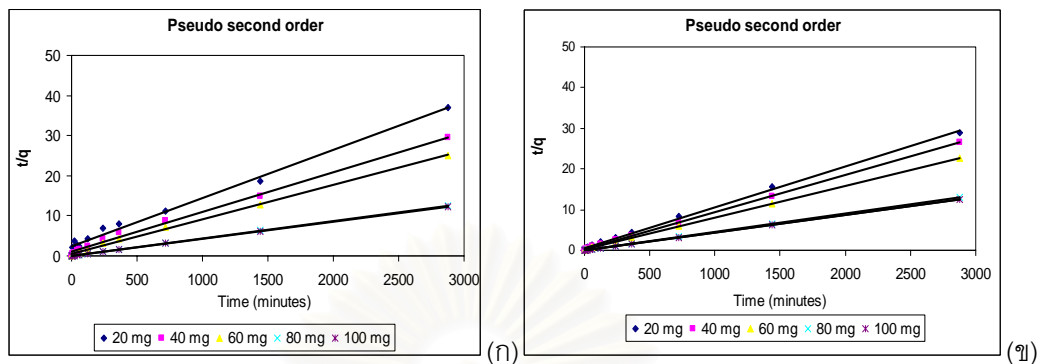


รูปที่ ค.5 อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

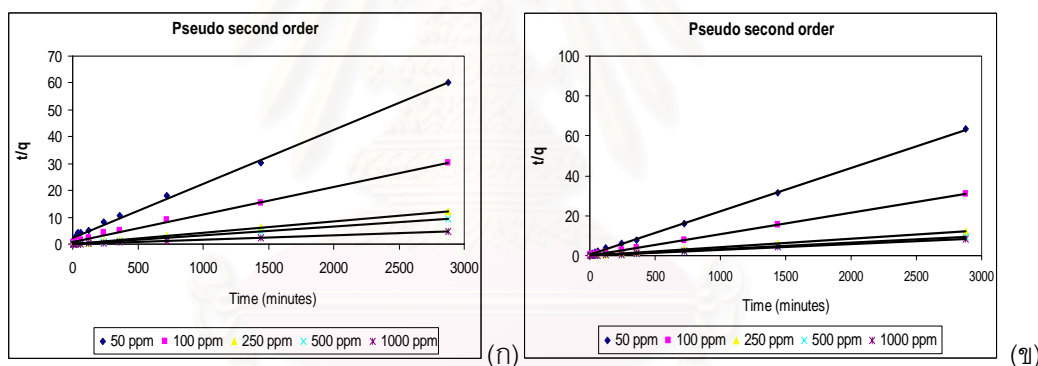


รูปที่ ค.6 อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

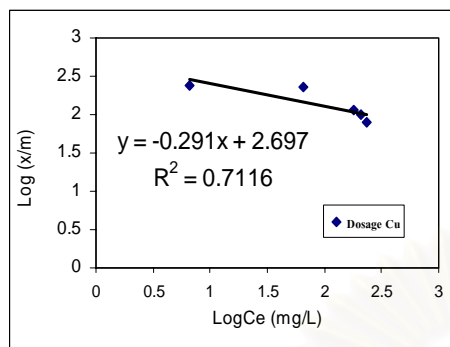


รูปที่ ค.7 อัตราการดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

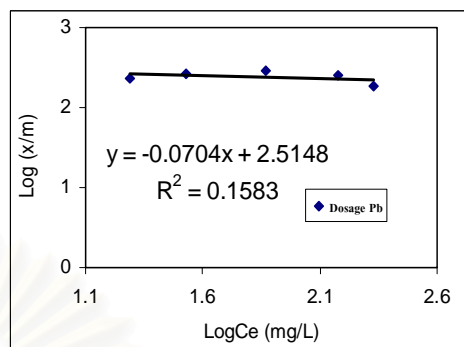


รูปที่ ค.8 อัตราการดูดซับอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

เฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

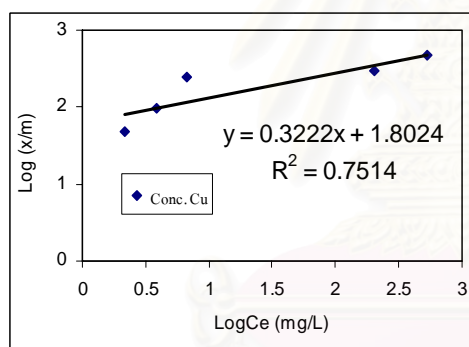


(ก)

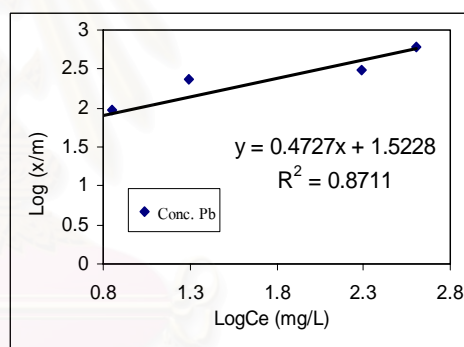


(ข)

รูปที่ ค.9 เฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน



(ก)

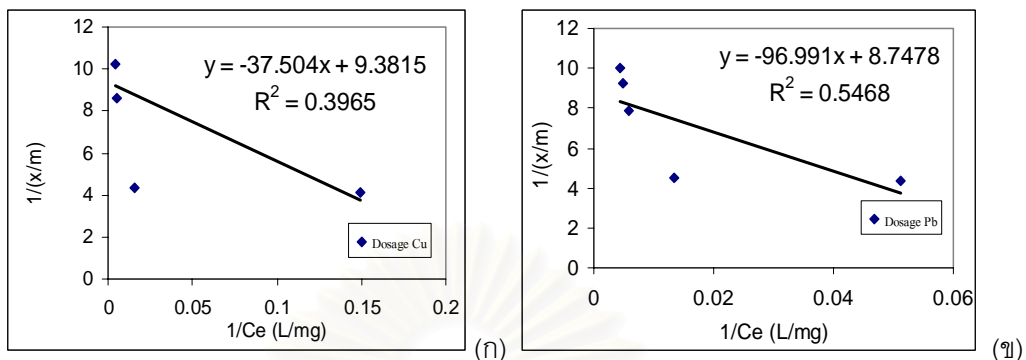


(ข)

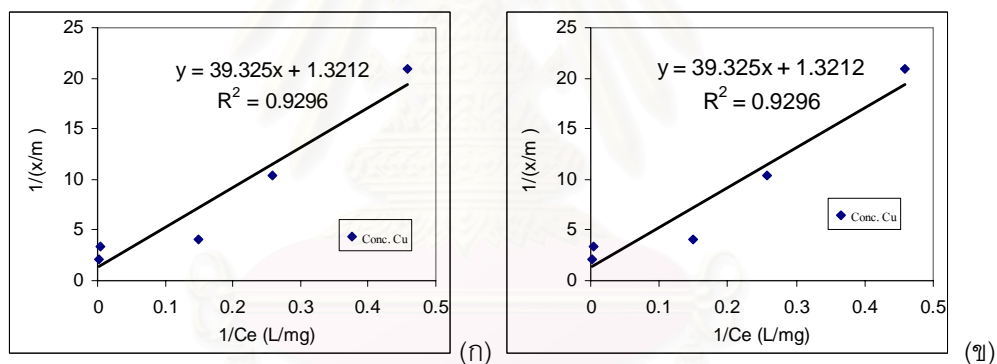
รูปที่ ค.10 เฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว

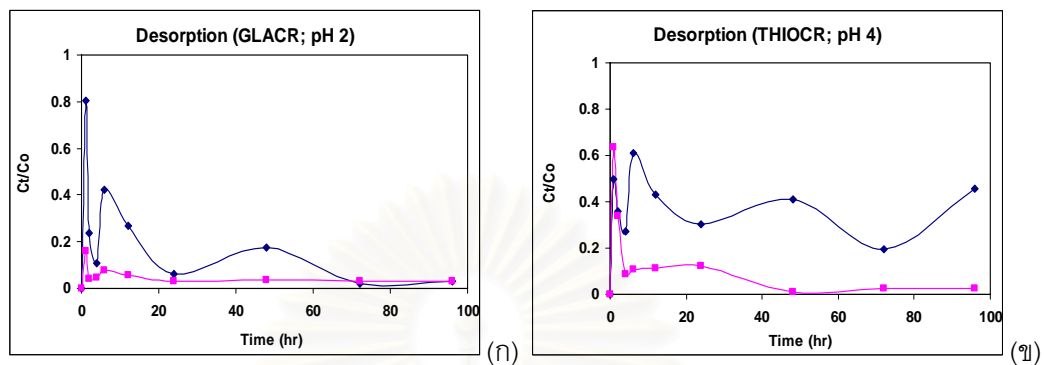


รูปที่ ค.11 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน



รูปที่ ค.12 แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว (ก) การดูดซับไอออนทองแดงบนกลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน (ข) การดูดซับไอออนตะกั่วบนไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน

การฟื้นฟูคุณภาพเรซินไคโตซานด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์
แบบต่อเนื่อง ที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ ค.13 การฟื้นฟูคุณภาพเรซินไคโตซานด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์
แบบต่อเนื่อง (ก) คอลัมน์ที่ 1 ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน (ข) คอลัมน์ที่ 2 กลูตาราลดีไฮด์เรซิน
ไคโตซาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ปริมาณเรซินโคโตซานที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินโคโตซาน | ปริมาณเรซินโคโตซาน (มิลลิกรัม) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%) |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| ทองแดง | กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน | 20 | 250 | 234.47 | 6.21 |
| | | 40 | 250 | 210.81 | 15.68 |
| | | 60 | 250 | 180.62 | 27.75 |
| | | 80 | 250 | 65.23 | 73.91 |
| | | 100 | 250 | 6.68 | 97.33 |
| ตะกั่ว | ไทโอไกลโคลิกเรซินโคโตซาน | 20 | 250 | 230.06 | 7.98 |
| | | 40 | 250 | 206.67 | 17.33 |
| | | 60 | 250 | 173.65 | 30.54 |
| | | 80 | 250 | 74.02 | 70.39 |
| | | 100 | 250 | 19.50 | 92.19 |

ตารางที่ ง.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินไคโตซาน | ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้น (พีพีเอ็ม) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%) |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| ทองแดง | กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 50 | 50 | 2.18 | 95.45 |
| | | 100 | 100 | 3.88 | 96.07 |
| | | 250 | 250 | 6.68 | 97.33 |
| | | 500 | 500 | 203.37 | 59.18 |
| | | 1000 | 1000 | 525.53 | 47.12 |
| ตะกั่ว | ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 50 | 50 | 4.4872 | 90.72 |
| | | 100 | 100 | 7.13 | 91.15 |
| | | 250 | 250 | 19.50 | 92.20 |
| | | 500 | 500 | 195.17 | 60.22 |
| | | 1000 | 1000 | 402.33 | 59.54 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินไคโตซาน | ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้น (พีพีเอ็ม) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%) |
|----------------------|----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| ทองแดง | กลูตาราลดีไฮด์เรซินไคโตซาน | 2 | 250 | 4.64 | 98.14 |
| | | 3 | 250 | 174.64 | 30.14 |
| | | 4 | 250 | 154.03 | 38.39 |
| | | 5 | 233.38 | 67.49 | 71.07 |
| | | 6 | 178.66 | 68.31 | 61.76 |
| | | 7 | 171.09 | 66.27 | 61.27 |
| | | 8 | 170.86 | 68.91 | 59.67 |
| ตะกั่ว | ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 2 | 250 | 145.96 | 41.62 |
| | | 3 | 250 | 113.90 | 54.44 |
| | | 4 | 250 | 18.85 | 92.46 |
| | | 5 | 144.06 | 50.43 | 67.08 |
| | | 6 | 112.06 | 28.63 | 65.59 |
| | | 7 | 113.13 | 64.97 | 42.56 |
| | | 8 | 102.31 | 61.75 | 39.64 |

ตารางที่ ง.4 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง และไอออนตะกั่ว แบบเดี่ยว

| ชนิดของเรซินไคโตซาน | ความเข้มข้นของ โพแทสเซียมไนเตรต (มิลลิโมล) | %การดูดซับ | |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|--------|
| | | ทองแดง | ตะกั่ว |
| กูดาราลดีไฮด์เรซินไคโต ซาน พีเอช 2 | 0 | 99.14 | |
| | 0.1 | 98.21 | |
| | 1 | 95.61 | |
| | 10 | 86.35 | |
| | 50 | 79.64 | |
| | 100 | 68.59 | |
| ไทโอไกลคอลลิกเรซินไคโต ซานพีเอช 4 | 0 | | 92.20 |
| | 0.1 | | 91.72 |
| | 1 | | 84.31 |
| | 10 | | 72.23 |
| | 50 | | 64.94 |
| | 100 | | 47.51 |

ตารางที่ ง.5 ค่าคงที่แลงเมียร์ไอโซเทอมและเฟรนดริชไอโซเทอม

| ปัจจัยที่ศึกษา | โลหะหนัก | แลงเมียร์ไอโซเทอม | | | เฟรนดริชไอโซเทอม | | |
|-------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|---------|----------------|
| | | $\left(\frac{1}{(x/m)}\right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0} \left(\frac{1}{C_e}\right)$ | | | $\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log(C_e)$ | | |
| | | Q° (มก./มก.) | K (ลิตร/มก.) | R ² | K | 1/n | R ² |
| ปริมาณเรซิน | ทองแดง | 0.1066 | -0.2501 | 0.3965 | 497.7371 | -0.291 | 0.7116 |
| | ตะกั่ว | 0.1201 | -0.1417 | 0.5468 | 327.1900 | -0.0724 | 0.1583 |
| ความเข้มข้น เริ่มต้น | ทองแดง | 0.7569 | 0.0336 | 0.9296 | 63.4454 | 0.3529 | 0.7514 |
| | ตะกั่ว | 0.0087 | 111.7630 | 0.9183 | 37.84 | 0.4867 | 0.8097 |

ตารางที่ ง.6 ชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก แบบคอลัมน์เดี่ยว (กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน)

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินโคโตซาน | ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนัก | เวลา (ชั่วโมง) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ประสิทธิภาพในการเลือกดูดซับ (%) | |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | | | | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| สารละลายโลหะหนักแบบผสม | กลูตาราลดีไฮด์เรซินโคโตซาน | 2 | 1 | 125 | 125 | 4.94 | 108.78 | 96.05 | 12.98 |
| | | | 2 | | | 6.61 | 124.94 | 94.71 | 0.05 |
| | | | 4 | | | 12.62 | 23.36 | 89.91 | 1.31 |
| | | | 6 | | | 14.78 | 15.59 | 88.18 | 7.53 |
| | | | 12 | | | 31.81 | 118.37 | 74.55 | 5.30 |
| | | | 24 | | | 50.76 | 112.25 | 59.40 | 10.20 |
| | | | 48 | | | 101.25 | 102.71 | 19.00 | 17.83 |
| | | | 72 | | | 121.68 | 108.33 | 2.66 | 13.33 |
| | | | 96 | | | 125.00 | 125.00 | - | - |

ตารางที่ ง.7 ชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนัก แบบคอลัมน์เดี่ยว (ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน)

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินไคโตซาน | ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนัก | เวลา (ชั่วโมง) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ประสิทธิภาพในการเลือกดูดซับ (%) | |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | | | | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| สารละลายโลหะหนักแบบผสม | ไทโอไกลโคลิกเรซินไคโตซาน | 4 | 1 | 125 | 125 | 112.87 | 9.47 | 9.70 | 92.42 |
| | | | 2 | | | 104.93 | 14.58 | 16.06 | 88.33 |
| | | | 4 | | | 95.15 | 21.34 | 23.88 | 82.93 |
| | | | 6 | | | 86.83 | 24.05 | 30.54 | 80.76 |
| | | | 12 | | | 76.73 | 32.32 | 38.61 | 74.14 |
| | | | 24 | | | 85.80 | 35.35 | 31.36 | 71.72 |
| | | | 48 | | | 121.06 | 42.93 | 3.15 | 65.66 |
| | | | 72 | | | 106.90 | 44.13 | 14.48 | 64.70 |
| | | | 96 | | | 113.45 | 67.87 | 9.24 | 45.71 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

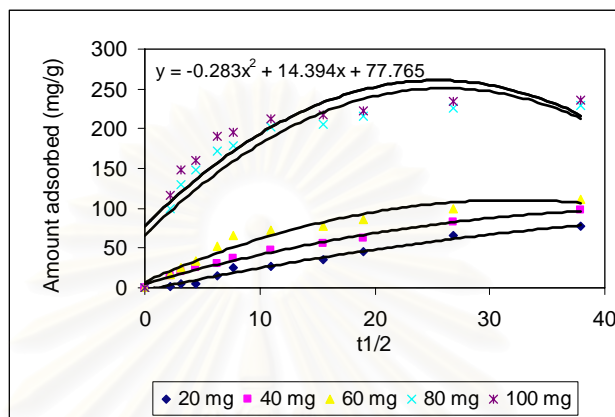
ตารางที่ ๗.8 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักแบบคอลัมน์คู่

| ชนิดของไอออนโลหะหนัก | ชนิดของเรซินไอออนแลกเปลี่ยน | ค่าพีเอชของสารละลายโลหะหนัก (พีพีเอ็ม) | เวลา (ชั่วโมง) | ปริมาณไอออนโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ปริมาณไอออนโลหะหนักสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร) | | ประสิทธิภาพในการเลือกดูดซับ (%) | |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | | | | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว | ทองแดง | ตะกั่ว |
| ไอออนโลหะหนักผสมกัน | ซินไคโตซาน (คอลัมน์ที่ 1) | 2 | 1 | 125 | 125 | 3.30 | 108.78 | 97.6 | 12.98 |
| | | | 2 | | | 5.00 | 24.94 | 96.00 | 0.05 |
| | | | 3 | | | 5.61 | 123.99 | 95.51 | 0.81 |
| | | | 4 | | | 6.81 | 123.36 | 94.55 | 1.31 |
| | | | 6 | | | 8.32 | 121.91 | 93.34 | 2.47 |
| | | | 8 | | | 8.68 | 20.58 | 93.06 | 3.54 |
| | | | 12 | | | 12.45 | 118.37 | 90.04 | 5.30 |
| | | | 24 | | | 18.49 | 112.25 | 85.21 | 10.20 |
| | | | 48 | | | 57.14 | 102.71 | 54.29 | 17.83 |
| | | | 72 | | | 115.32 | 108.33 | 7.74 | 3.33 |
| 96 | 125.00 | 18.06 | - | 67.83 | | | | | |
| ไอออนโลหะหนักผสมกัน | ไฮโดรไลติกเรซินไคโตซาน (คอลัมน์ที่ 2) | 2 | 1 | 125 | 125 | 5.65 | 50.19 | 95.48 | 36.54 |
| | | | 2 | | | 6.10 | 51.26 | 95.12 | 36.02 |
| | | | 3 | | | 9.71 | 56.00 | 92.23 | 33.71 |
| | | | 4 | | | 62.89 | 56.57 | 49.69 | 33.43 |
| | | | 6 | | | 54.56 | 62.75 | 56.35 | 30.41 |
| | | | 8 | | | 63.11 | 68.31 | 49.51 | 27.69 |
| | | | 12 | | | 76.73 | 2.54 | 38.62 | 25.63 |
| | | | 24 | | | 85.80 | 76.45 | 31.36 | 23.71 |
| | | | 48 | | | 108.16 | 85.67 | 13.47 | 19.21 |
| | | | 72 | | | 113.35 | 95.52 | 9.32 | 14.40 |
| 96 | 119.90 | 105.68 | 4.08 | 9.44 | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---|----|-----|-----|--------|---------|---------|---------|
| สาร ลาย โลหะ หนัก ผสม กัน | ไฮโอ ไกลโค ลิกเรซิน โคโต ซาน (คอลัมน์ ที่ 1) | 4 | 1 | 125 | 125 | 112.87 | 9.47 | 9.71 | 92.42 |
| | | | 2 | | | 104.93 | 14.58 | 16.06 | 88.33 |
| | | | 3 | | | 98.96 | 20.3914 | 20.8312 | 83.6869 |
| | | | 4 | | | 95.15 | 21.384 | 23.88 | 2.93 |
| | | | 6 | | | 86.83 | 24.05 | 30.54 | 80.76 |
| | | | 8 | | | 86.89 | 31.19 | 30.49 | 75.05 |
| | | | 12 | | | 76.73 | 32.32 | 38.62 | 74.14 |
| | | | 24 | | | 85.80 | 35.35 | 31.36 | 71.72 |
| | | | 48 | | | 121.06 | 42.93 | 3.15 | 65.66 |
| | | | 72 | | | 106.90 | 44.13 | 14.48 | 64.70 |
| | | | 96 | | | 113.45 | 67.87 | 9.24 | 45.71 |
| สาร ลาย โลหะ หนัก ผสม กัน | กลูตา ราลดี ไฮด์เร ซินโคโต ซาน (คอลัมน์ ที่ 2) | 4 | 1 | 125 | 125 | 11.29 | 14.02 | 90.97 | 88.79 |
| | | | 2 | | | 10.49 | 17.36 | 91.61 | 86.11 |
| | | | 3 | | | 18.59 | 16.86 | 85.13 | 86.52 |
| | | | 4 | | | 20.59 | 20.52 | 83.53 | 83.59 |
| | | | 6 | | | 36.62 | 25.63 | 70.70 | 79.49 |
| | | | 8 | | | 42.33 | 29.92 | 66.13 | 76.06 |
| | | | 12 | | | 56.34 | 34.97 | 54.93 | 72.02 |
| | | | 24 | | | 63.60 | 38.57 | 49.12 | 69.14 |
| | | | 48 | | | 83.76 | 41.41 | 32.99 | 66.87 |
| | | | 72 | | | 91.77 | 47.22 | 26.59 | 62.22 |
| | | | 96 | | | 110.22 | 51.39 | 11.82 | 58.89 |

ภาคผนวก จ

อัตราการแพร่ภายในรูพรุน



จากรูปแสดงการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับในการดูดซับสารละลายไอออนทองแดง และไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน สมการที่ได้เป็นของเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม

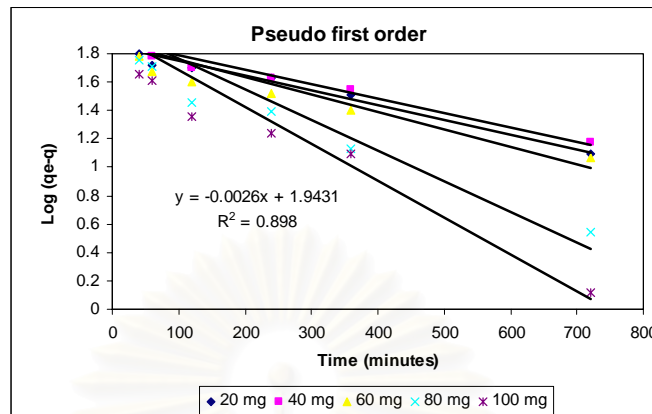
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ (q) กับ retention time ($t^{1/2}$) โดยให้ (q) เป็น แกน y และ retention time ($t^{1/2}$) เป็นแกน x

จากกราฟ $y = -0.283x^2 + 14.394x + 77.765$

ค่า k_p คือ 14.394

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



จากรูปแสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับสารละลายไอออนทองแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน สมการที่ได้เป็นของเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม

จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม $\log (q_e - q) = \log q_e - (k_1 t / 2.303)$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (q_e - q)$ กับ t โดยให้ $\log (q_e - q)$ เป็นแกน y และ t เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับเท่ากับ $-(k_1 / 2.303)$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

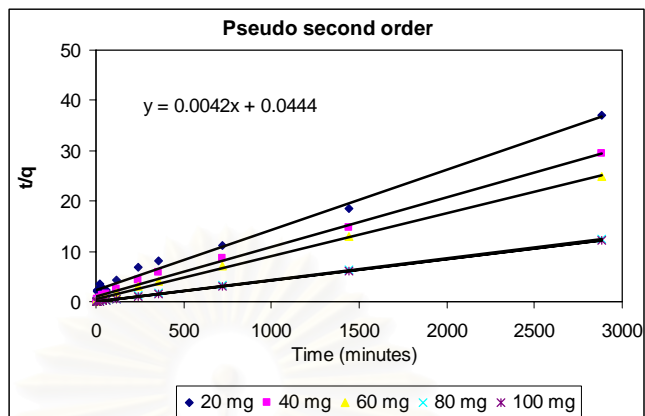
จากกราฟ $y = -0.0026x + 1.9431$

$$k_1 = -2.303 \times 0.0026 = 0.0060$$

$$q_e = 87.7208$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



จากรูปแสดงปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับสารละลายไอออนทองคำแดงและไอออนตะกั่ว ของปริมาณเรซินไคโตซาน สมการที่ได้เป็นของเรซินไคโตซาน 100 มิลลิกรัม

จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม $t/q = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q กับ t โดยให้ t/q เป็นแกน y และ t เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับเท่ากับ $1/(k_2 q_e^2)$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ t/q_e

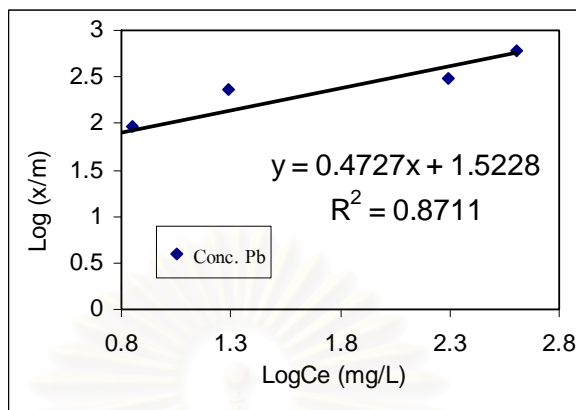
จากกราฟ $y = 0.0042x + 0.0444$

$$q_e = t/q_e = 1/0.0042 = 238.0952$$

$$k_2 = 1/(k_2 q_e^2) = 1/(238.0952)^2 = 0.00002$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เฟรนดริชไอโซเทอม



จากรูปแสดงเฟรนดริชไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว สมการที่ได้เป็นของไทโอไกลคอลลิกเรซินโคโตซาน

$$\text{จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม } \log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log(C_e)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ และ $\log(C_e)$ โดยให้ $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ เป็นแกน y และ $\log(C_e)$ เป็นแกน x จะได้ความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$

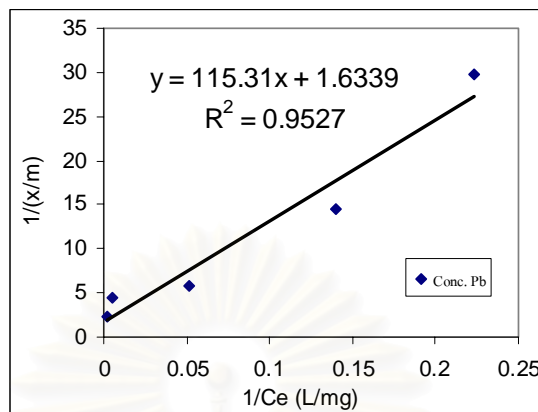
จากกราฟ $y=0.4727x+1.5228$

ความชันคือ 0.4727

จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K = 1.5228$, $K = 33.3273$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แลงเมียร์ไอโซเทอม



จากรูปแสดงแลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายไอออนตะกั่ว ของความเข้มข้นของสารละลายไอออนตะกั่ว สมการที่ได้เป็นของไทโกลคอลลีเกรชันโคโตซาน

$$\text{จากสมการแลงเมียร์ไอโซเทอม} \left(\frac{1}{(x/m)} \right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0} \left(\frac{1}{C_e} \right)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\frac{1}{(x/m)} \right)$ และ $\left(\frac{1}{C_e} \right)$ โดยให้ $\left(\frac{1}{(x/m)} \right)$ เป็นแกน y และ $\left(\frac{1}{C_e} \right)$ เป็นแกน x จะได้ความชันเท่ากับ $\frac{1}{KQ^0}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$

จากกราฟ $y=115.31x+1.6339$

ความชันคือ 115.31

จุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Q^0} = 1/1.6339 = 0.0142$

ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

$$MTZ = H*(t_s - t_B)/t_s$$

เมื่อ M คือ ขอบเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)

H คือ ความสูงของเบด (เซนติเมตร)

t_s คือ เวลาที่เม็ดโคโตะซานอิ่มตัว (นาที)

t_B คือ Breakthrough time (นาที)

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ความสูงของเบด 3.5 เซนติเมตร (เรซินโคโตะซาน 2.8 กรัม) เวลาที่โคโตะซานอิ่มตัวเท่ากับ 96 ชั่วโมง (11520 นาที) และ Breakthrough time เท่ากับ 40 ชั่วโมง (2400 นาที)

$$\begin{aligned} MTZ &= 3.5*(11520-2400)/11520 \\ &= 2.04 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ปริมาตรช่องว่าง (V_{void}) และ Resident time

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเรซินโคโตะซาน (d) เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอลัมน์แก้ว (D) เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร

ความสูงของเบด (H) เท่ากับ 3.5 เซนติเมตร (2.8 กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง

$$\text{ปริมาตรคอลัมน์ (} V_{\text{column}} \text{)} = (\pi D^2 H)/4 = 41.703 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรเรซินโคโตะซาน (} V_{\text{resin}} \text{)} = (4 \pi r^3)/3 = 0.001 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรช่องว่าง (} V_{\text{void}} \text{)} = 41.703 - 0.001 = 41.702 \text{ ml}$$

การคำนวณหา Resident time

อัตราการไหล 2 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที Resident time = 20.85 นาที

อัตราการไหล 5 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อนาที Resident time = 8.34 นาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุภาพร ห้วยหงษ์ทอง เกิดวันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งพนักงานหน่วยควบคุมเอกสาร บริษัทเอ็นเบิร์กฟู้ดไทยจำกัด และได้ลาออกเพื่อเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นของ ปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย