

การกำจัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิม
โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายภาณุวัฒน์ อู่สำห้เพียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF CHROMIUM IONS FROM WASTEWATER OF STAINLESS STEEL INDUSTRY BY
HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Parnuwat Usapein

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้
สนิม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

โดย

นายภาณุวัฒน์ อู่สารห์เพียร

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ประกร รามกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. ประกร รามกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

ภาณุวัฒน์ อุส่าห์เพียร : การกำจัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. (REMOVAL OF CHROMIUM IONS FROM WASTEWATER OF STAINLESS STEEL INDUSTRY BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE). อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. ประกร รามกุล, 99 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการคัดเลือกสกัด Cr(VI) ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้น้ำจากกระบวนการกัดกรดในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นสารละลายป้อน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารสกัด คือ methyl trioctylammonium chloride (Aliquat 336), tri-n-octylamine (TOA), tri-n-butyl phosphate (TBP) และสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดของสารละลายนำกลับหรือสารละลายสตริป คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ และอุณหภูมิของการสกัด การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบสวนทางกัน

ผลการทดลองพบว่า Aliquat 336 สามารถเลือกสกัด Cr(VI) ได้มากกว่าไอออน Fe(III) และ Ni(II) ที่ปนอยู่ในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ระหว่าง 0.1-1 M ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนำกลับระหว่าง 7-12 และอุณหภูมิของการสกัดในช่วง 20-50°C มีผลน้อยต่อเปอร์เซ็นต์การสกัด Cr(VI) จากงานวิจัยนี้เมื่อใช้ภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้นของ Aliquat 336 5%(v/v) ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ 0.5 M ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับเท่ากับ 7 และอุณหภูมิจึง สามารถสกัด Cr(VI) ได้ประมาณ 70 % นอกจากนี้คำนวณค่าพลังงานในการแพร่ของการสกัด Cr(VI) ได้เท่ากับ 15.14 kJ/mol

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

#4970499021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CHROMIUM / EXTRACTION / HOLLOW FIBER / WASTEWATER / ALIQUAT 336

PARNUWAT USAPEIN: REMOVAL OF CHROMIUM IONS FROM WASTEWATER OF STAINLESS STEEL INDUSTRY BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., THESIS COADVISOR : PRAKORN RAMAKUL, Ph.D., 99 pp.

The selective extraction of Cr(VI) from spent pickling solution of the stainless steel-cold rolled plate process by hollow fiber supported liquid membrane (HFSLM) was investigated. The effects of types of organic extractants, i.e., methyl trioctylammonium chloride (Aliquat 336), tri-n-octylamine (TOA), tri-n-butyl phosphate (TBP) and the mixture of Aliquat 336 and TBP; concentration of the selected extractant; types of stripping solutions (NaCl and NaOH); pH and concentration of the selected stripping solution; and the operating temperature were studied. The feed and stripping solutions flowed counter-currently.

Of the extractants used in this study, Aliquat 336 is a specific carrier to selectively extract Cr(VI) ions. The results show that the coexisting contamination of Fe(III) and Ni(II) ions has no significant effect on Cr(VI) extraction. The percentage of Cr(VI) extraction slightly increases with the concentration and pH of NaCl stripping solution, and temperature (0.1-1 M, 7-12 and 20- 50 °C). By using the optimum conditions of 5%(v/v) Aliquat 336, 0.5 M NaCl with pH 7 at room temperature, about 70% Cr(VI) is extracted. In addition, the calculated diffusion energy of Cr(VI) extraction is 15.14 kJ/mol.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering...Student's signature.....
Field of study....Chemical Engineering...Principal Advisor's signature.....
Academic year2008.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ดร. ประกร รามกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาสั่งสอนและให้คำปรึกษาในการทำ
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริทธิสวัสดิ์ หล่อทองคำ สำหรับคำแนะนำในการทำ
ผลงานตีพิมพ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์
ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณคุณคุณวรรณดารา อินทรปัญญา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้
ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือต่างๆ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในกลุ่มวิจัยห้องปฏิบัติการ Mass
Separation ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเคมี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยนี้ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ที่ให้ความ
อนุเคราะห์การวิเคราะห์สารตัวอย่าง และบริษัท ไทยน็อคซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน) ที่ให้ข้อมูล
ต่างๆ และร่วมงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่สนับสนุนการศึกษาและเป็นกำลังใจ
เสมอมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฒ
สัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น.....	4
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น.....	5
2.3 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม.....	7
2.4 เยื่อแผ่นเหลว.....	10
2.4.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	11
2.4.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ.....	12
2.4.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต.....	16
2.5 กลไกการถ่ายเทมวล.....	19
2.5.1 การเคลื่อนที่แบบพาสซีฟ.....	19
2.5.2 การเคลื่อนที่แบบมีตัวพา.....	19
2.6 ชนิดของสารสกัด.....	24
2.6.1 สารสกัดชนิดกรด.....	24
2.6.2 สารสกัดชนิดเบส.....	25
2.6.3 สารสกัดชนิดกลาง.....	26

2.7 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์.....	27
2.8 การถ่ายเทมวลของ Cr(VI) ในงานวิจัยนี้.....	31
2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของ Cr(VI).....	33
2.10 การหาค่าแฟกเตอร์การแยก (Separation Factor).....	33
2.11 การหาค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ.....	34
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	34
2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนโครเมียม.....	36
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	39
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.3.1 การศึกษาผลของชนิดของสารสกัด.....	44
3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....	44
3.3.3 การศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ.....	45
3.3.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ.....	45
3.3.5 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ.....	45
3.3.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิของการสกัด.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	46
4.1 ผลของชนิดของสารสกัด.....	46
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....	51
4.3 ผลของศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับ.....	53
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ.....	54
4.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ.....	56
4.6 ผลของอุณหภูมิของการสกัด.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก. (ข้อมูลดิบ).....	67

ภาคผนวก ข. (ตัวอย่างการคำนวณ).....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	99



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
2.1	สภาวะออกซิเดชันและโครงสร้างของโครเมียม	9
2.2	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	18
2.3	สรุปรายละเอียดของการใช้สารสกัดชนิดต่างๆ.....	27
3.1	คุณสมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2	รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
4.1	องค์ประกอบของน้ำเสียที่ใช้เป็นสารละลายป้อน.....	47
4.2	ร้อยละการสกัด Cr(VI) และ Fe(II) จากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสารสกัด Aliquat 336 และสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลวน 1 รอบ.....	48
4.3	การเปรียบเทียบการสกัด Cr(VI) จากสารละลายป้อนต่างชนิดกันด้วยสารสกัด Aliquat 336 โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยผลการสกัด Cr(VI) จากสารละลายป้อนต่างชนิดด้วย Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] = 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7	50
4.4	การสกัดไอออนซัลเฟตด้วย Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] = 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	50
ก.1	ข้อมูลผลการสกัด Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 5%(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที	67
ก.2	ข้อมูลผลการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 5%(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน	

- ก.10 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 76
- ก.11 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.3 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 77
- ก.12 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 78
- ก.13 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.7 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 79
- ก.14 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 1 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 80
- ก.15 ข้อมูลผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที..... 81
- ก.16 ข้อมูลผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ เท่ากับ 7 สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ..... 82

ก.17	ข้อมูลผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อร้อยละการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ไหลวน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง.....	83
ก.18	ข้อมูลผลชนิดของสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัด Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้อง.....	84
ก.19	ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 4%(v/v) กับ TBP TBP 1%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI)) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้อง.....	85
ก.20	ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 3%(v/v) กับ TBP TBP 2%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI)) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้อง.....	86
ก.21	ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 2.5%(v/v) กับ TBP TBP 2.5%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI)) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้อง.....	87
ก.22	ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้อง.....	88
ก.23	ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที วน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง.....	89

- ก.24 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Fe(III) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที วน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง..... 90
- ก.25 ข้อมูลผลการศึกษาการสกัดไอออนซัลเฟต โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที วนเป็นจำนวน 1 รอบ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลในทิศทางสวนทางกัน ที่อุณหภูมิห้อง..... 91
- ก.26 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้ น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม เจือจาง 3 เท่า สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 5%(v/v) สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที วน 5 รอบ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลในทิศทางสวนทางกัน ที่อุณหภูมิห้อง..... 92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

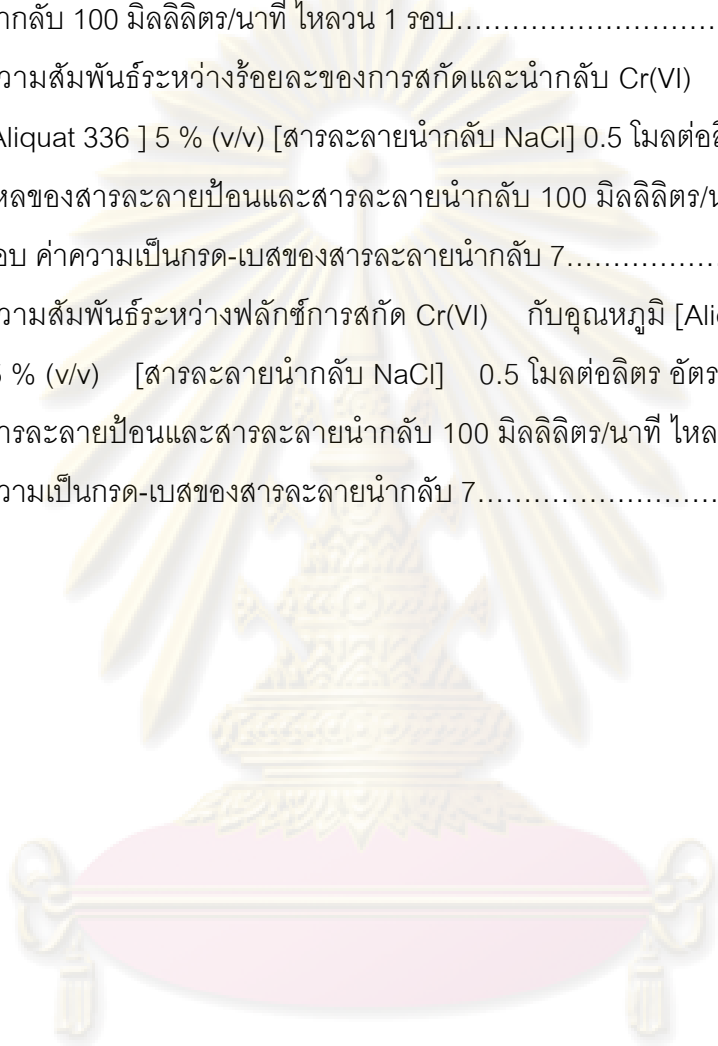
ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทรีดเย็น.....	5
2.2	กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรดในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น.....	6
2.3	รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	10
2.4	เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	11
2.5	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน.....	13
2.6	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน.....	14
2.7	เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	15
2.8	ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	15
2.9	ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต.....	17
2.10	ลักษณะการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกัน.....	21
2.11	การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกันของไอออนโครเมียมกับสารสกัด Aliquat 336.....	21
2.12	ลักษณะการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบบสวนทาง.....	22
2.13	การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบบสวนทางของไอออนโคบอลต์กับสารสกัด LIX84-I.....	23
2.14	การเคลื่อนที่ของไอออนโครเมียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 และสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์.....	31
3.1	อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2	มอดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.3	สูตรโครงสร้างของสารสกัด.....	42
3.4	การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลแบบสวนทางกัน.....	43

4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับชนิดของสารสกัด: สารละลาย ป้อนและสารละลายนำกลับไหลวน 5 รอบ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ที่ อุณหภูมิห้อง [สารละลายนำกลับ] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส ของ สารละลายนำกลับ 7.....	47
4.2	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนกับเวลาเมื่อใช้สารสกัด Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและ สารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	49
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	51
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมล ต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	52
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับเวลาของสารละลายนำกลับ โซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 M ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของ สารละลายนำกลับ 7.....	53
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับความเข้มข้นของโซเดียมคลอ ไรด์ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความ เป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	55
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารละลาย นำกลับโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการ ไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7.....	55

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับ pH ของสารละลายนำกลับ
ไฮเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) [สารละลายนำกลับ
NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลาย
นำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1 รอบ..... 56

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) กับอุณหภูมิ
[Aliquat 336] 5 % (v/v) [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการ
ไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1
รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7..... 57

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์การสกัด Cr(VI) กับอุณหภูมิ [Aliquat 336]
5 % (v/v) [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของ
สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1 รอบ ค่า
ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7..... 58



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

M	ไอออนโลหะ
S	สารสกัดชนิดโซลเวท
$K_{ex,1}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดหลัก
$K_{ex,2}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดช่วย
$K_{ex,(1+2)}$	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดผสม
k_B	ค่าคงที่ Boltzmann
K_{Cr}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของโครเมียมไอออน
K_M	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโลหะตัวอื่น
A	พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ
C_{in}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมไอออนของสารละลายป้อน
C_{out}	ความเข้มข้นของโครเมียมไอออนขาออกของสารละลายป้อน
C	ความเข้มข้นของโครเมียมไอออนที่เวลา t ใดๆ
V	ปริมาตรของสารละลาย
SF	สัมประสิทธิ์การคัดเลือก
S.C.	ค่าสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์
π	ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3.1414
β	ค่าคงตัวความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลว
η	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของเรื่อง

การพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศอย่างรวดเร็วกระทบต่อการใช้ทรัพยากรและทำให้มีปริมาณของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องมีระบบการจัดการอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยของเสียเหล่านี้ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะอัลลอย อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมการพิมพ์จะใช้โลหะหนัก เช่น นิกเกิล โครเมียม เหล็ก เป็นต้น ในกระบวนการผลิต ดังนั้นโรงงานเหล่านี้จึงต้องมีมาตรการกำจัดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยเฉพาะของเสียที่มีโลหะหนักอย่างเข้มข้น โครเมียมที่พบในน้ำเสียจากโรงงานที่ผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมักจะอยู่ในรูปของโครเมียม (III) และโครเมียม (VI) ซึ่งโครเมียม (VI) จะอยู่ในรูปของโครเมต (CrO_4^{2-}) และไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ในภาวะที่น้ำเสียมีความเป็นเบสและกรดตามลำดับ (พิชิต, 2544) การรั่วไหลของโครเมียมเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของโครเมียมในดินและแหล่งน้ำใต้ดิน วิธีการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียที่ใช้อย่างแพร่หลาย คือ การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation) ซึ่งเหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนโลหะสูง การตกตะกอนผลึกทางเคมีจะเปลี่ยนโครเมียม (VI) ให้อยู่ในรูปของโครเมียม (III) โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulphate) หรือสารละลายกรดซัลไฟต์ (Acidic Sulfites) จากนั้นเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อให้อยู่ในรูปของโครเมียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถตกตะกอนได้ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการตกตะกอน ต้องการอุปกรณ์และเครื่องจักรในการเตรียมและผสมสารเคมีกับน้ำเสีย มีภาระต่อในการกำจัดตะกอนเคมีเกิดขึ้น นอกจากนี้ใช้เวลาในการตกตะกอนนาน เสียค่าสารเคมีและค่าการกำจัดตะกอนค่อนข้างสูง (อัญชลี, 2535; เกรียงศักดิ์, 2547; Tchobanoglous and Burton, 1991) การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยวิธีอื่น เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-liquid Extraction) (Zhang, 2007) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) (Galan et al., 2008) การดูดซับ (Adsorption) (Ansari, 2006) วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) (Martinez et al., 2007) และเทคนิคเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane) (ไพศาล, 2541; Ramakul et al., 2004; Eliceche et al., 2004; Galan et al., 2008)

เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดไอออนโลหะในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไอออนโลหะปริมาณน้อย สามารถสกัดและนำกลับไอออนโลหะได้ในกระบวนการเดียว สามารถเลือกตัวถูกละลายในสารละลายป้อนได้หลากหลาย เช่น อาจเป็นไอออนโลหะ กรดเบส หรือสารประกอบอินทรีย์ เทคนิคนี้พัฒนามาจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและการ

เกิดปฏิกิริยาเคมี สารละลายนำกลับหรือสารละลายสไตริปอาจะมีทิศทางการไหลทิศทางเดียวกับ สารละลายป้อนหรือตรงข้าม (Co-current Flow หรือ Counter-current Flow) รูปแบบของเทคนิค เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane: SLM) ถูกออกแบบไว้เพื่อลด ข้อจำกัดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane: ELM) โดยทำให้เฟสของ สารละลายสกัดซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวตั้งอยู่กับที่โดยไม่มีการกระจายในรูพรุนจุลภาค (Micropore) ของตัวรองรับ เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับมี 3 ลักษณะ ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวแบบ แผ่น (Thin Sheet) เยื่อแผ่นเหลวแบบเกลียว (Spiral Type) และเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวง (Hollow Fiber) เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีข้อดีกว่าเยื่อแผ่นเหลวแบบมี ตัวรองรับชนิดอื่น คือ มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ นอกจากนี้ยังมี ข้อดีอื่นๆ อีก เช่น มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกหรือแฟกเตอร์การแยก (Separation Factor: SF) สูง สามารถใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะต่ำได้ (เกษม, 2543; เอกพิชญ์, 2548) งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาเกี่ยวกับเยื่อแผ่นเหลวมักใช้แยกและนำกลับไอออนโลหะจากสารละลาย ป้อนที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ มีจำนวนน้อยที่ศึกษากับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจริง ในงานวิจัย นี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane: HFSLM) กำจัดไอออนโครเมียมออกจากน้ำเสียจากกระบวนการ กัดกรดในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามข้อกำหนดของน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของกระบวนการ ผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.3 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิต แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

- ชนิดของสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน คือ เมทิลไตรออกทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Metyl trioctylammonium chloride: Aliquat 336) ไตรออกทิลเอมีน (Tri-octyl amine: TOA) ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butyl phosphate: TBP) และสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

- ความเข้มข้นของสารสกัด 1-6 % (v/v)

- ชนิดของสารละลายนำกลับหรือสารละลายสตรีป คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.1 – 1 โมลต่อลิตร (โมลาร์)

- ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายนำกลับ 7-12

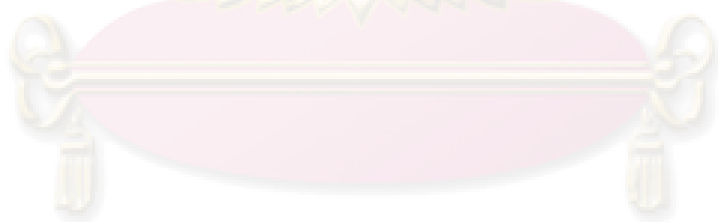
- อุณหภูมิของการสกัด 20-50 องศาเซลเซียส

1.3.4 จำนวนเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในการสกัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

1.4.2 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมและขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ข้อมูลทั่วไปของไอออนโครเมียม กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ กระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนโครเมียมที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น

ขั้นตอนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น (Cold-rolled Plate Stainless Steel) มีดังนี้

1) วัตถุดิบคือเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนที่เรียกว่า “คอยล์ดำ (Black coil)” จะถูกปรับสมบัติให้เหมาะสมด้วยการอบอ่อน สำหรับการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก (Ferritic) จะอบในเตาอบแบบกะ (Batch Annealing Furnace) และการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic) จะผ่านกระบวนการอบแบบต่อเนื่อง (Annealing Furnace) เมื่ออบอ่อนเสร็จแล้วจะนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมากำจัดออกไซด์ที่ผิวด้วยการกัดกรด (Pickling) ชนิดของกรดที่ใช้ในแต่ละอย่างจะแตกต่างกัน จากรูปที่ 2.1 หมายเลข 1 และ 3 ใช้กรดซัลฟิวริกสำหรับกระบวนการอิเล็กโตรไลติก หมายเลข 2 และ 4 ใช้กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริก

2) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนที่ปรับสมบัติและทำความสะอาดจากขั้นตอนแรกแล้ว จะถูกรีดเย็นโดยใช้แรงกดทับของลูกกลิ้ง 10 คู่ เพื่อลดขนาดความหนาตามที่ลูกค้าต้องการ

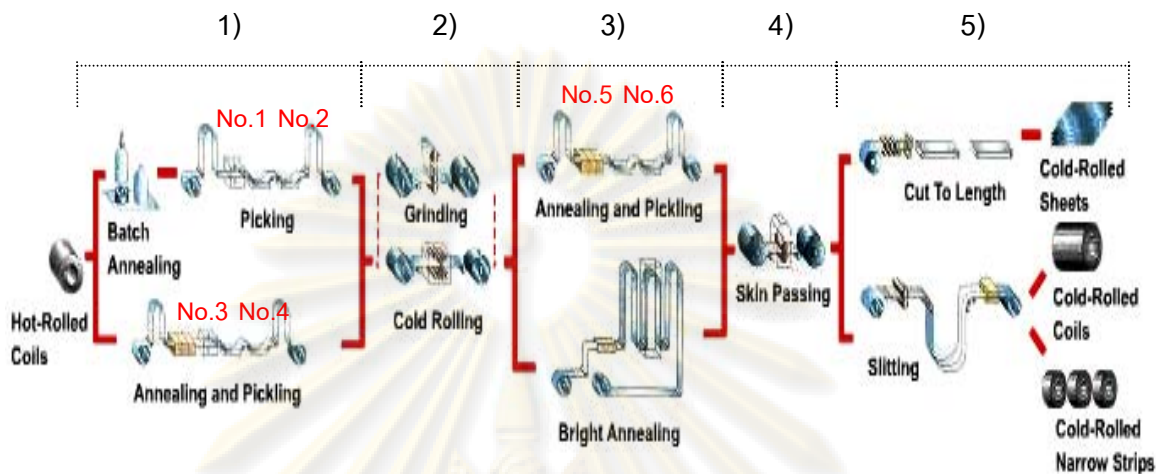
3) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นที่รีดลดขนาดความหนาแล้ว จะถูกนำไปอบอ่อนเพื่อทำให้นิ่มลงเพื่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ การอบอ่อนแบ่งเป็น 2 วิธี

วิธีที่หนึ่ง คือ การอบอ่อนในบรรยากาศ หลังจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออกมาจากเตาอบต้องผ่านการกัดกรดเพื่อทำความสะอาดผิวหรือกำจัดออกไซด์ที่ผิว ซึ่งการกัดกรดในกระบวนการนี้ใช้สารละลายไฮเดียมซัลเฟตในอ่างหมายเลข 5 และใช้กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริกในอ่างหมายเลข 6

วิธีที่สอง ล้างน้ำมันที่ติดมาจากขั้นตอนที่สองในรูปที่ 2.1 ออกก่อน แล้วอบอ่อนในเตาอบโดยใช้พลังงานไฟฟ้าในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เกิดออกไซด์ที่ผิวโลหะจึงไม่จำเป็นต้องผ่านการกัดกรด

4) หลังการรีดเย็นและปรับสมบัติให้เหมาะสมด้วยการอบอ่อนแล้ว แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จะถูกนำมาปรับความเรียบและความเงา (Skin Passing) อีกครั้งเพื่อป้องกันรอยย่นจากการขึ้นรูป

5) นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาตัดเป็นแผ่น (Cut to Length) หรือนำมาตัดเป็นแถบ (Slitting Line) แบบชนิดม้วนหน้าแคบหรือชนิดม้วนหน้ากว้างเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป

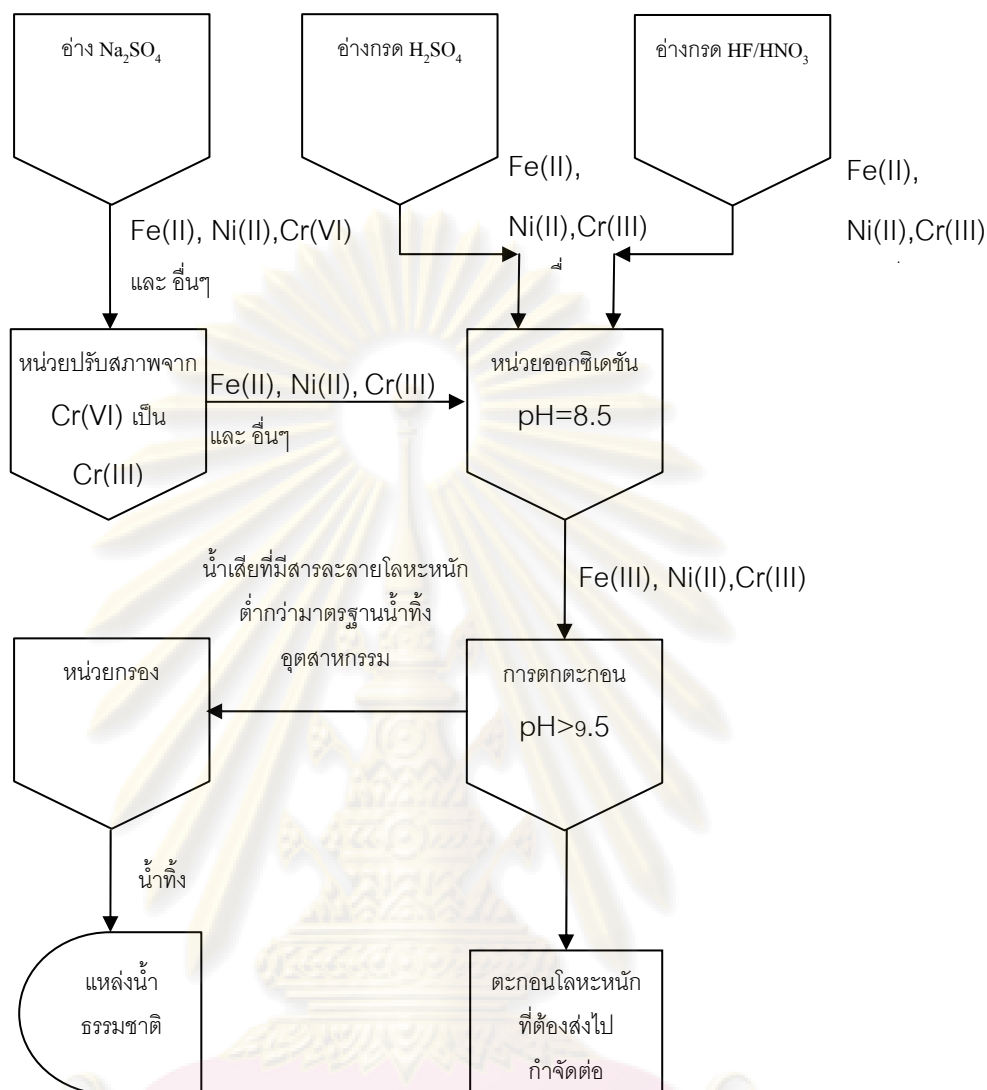


รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น (www.thainox.co.th)

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น

น้ำเสียส่วนใหญ่ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเกิดจากกระบวนการกัดกรด ซึ่งการกัดกรดจะใช้สารละลาย 3 ประเภท คือ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดไนตริกผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริก และสารละลายโซเดียมซัลเฟต น้ำเสียจากการกัดกรดมีโลหะหนักหลายชนิด องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไอออนเหล็ก โครเมียม และ นิกเกิล การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรดของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรด
ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรดของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) น้ำเสียจากอ่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีองค์ประกอบหลัก คือ ไอออนเหล็กโครเมียม และ นิกเกิล ซึ่งไอออนโครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมียม (VI) ที่มีความเป็นพิษสูง จึงต้องผ่านหน่วยปรับสภาพเปลี่ยนโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) ที่มีความเสถียรสูงและเป็นอันตรายน้อยกว่าโดยการใส่ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.2 สำหรับน้ำเสียที่มาจากอ่างสารละลายกรดซัลฟิวริก และอ่างสารละลายกรดไนตริกผสมกับกรด

ไฮโดรฟลูออริก ไอออนโครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมียม (III) จึงไม่จำเป็นต้องเข้าหน่วยปรับสภาพนี้

2) ขั้นตอนการออกซิเดชันโดยใช้การเป่าอากาศ เพื่อเปลี่ยนไอออนเหล็กเฟอร์รัสไปเป็นไอออนเหล็กเฟอร์ริกที่มีความเสถียรและตกตะกอนง่ายกว่า ซึ่งขั้นตอนนี้จะควบคุมความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.5

3) น้ำเสียที่ผ่านหน่วยออกซิเดชันแล้วจะนำไปตกตะกอนในสภาพเบสโดยการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต และใส่สารจำพวกพอลิเมอร์เพื่อช่วยเร่งการตกตะกอน

4) ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการกรองน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากช่วงขาเข้าของหน่วยปรับสภาพเปลี่ยนโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) มีความเข้มข้นของสารละลายไอออนโครเมียมสูงประมาณ 300-500 ppm (มิลลิกรัม/ลิตร)

2.3 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม (<http://en.wikipedia.org/wiki/Chromium>)

โลหะโครเมียม (Chromium, Cr) เป็นธาตุแรกของกลุ่ม VIB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน ถูกค้นพบโดย Vauquelin ในปี ค.ศ. 1797 ในแร่ Crocoite ($PbCrO_4$) จากไซบีเรีย ซึ่งเป็นแร่ตะกั่วมีสีแดง ในปีต่อมา Vauquelin สามารถสกัดโครเมียมจากโครไมต์ (Cr_2O_3) โดยวิธีดิวิซ์ Cr_2O_3 โดยผงถ่าน ในปี ค.ศ. 1893 Moissan สกัดโครเมียมได้โดยวิธีดิวิซ์ Cr_2O_3 ด้วยถ่านหินในเตาไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 1898 Goldschmidt สกัดโครเมียมอิสระปราศจากคาร์บอนเจือปน โดยนำ Cr_2O_3 มารีดิวซ์ด้วย Al การใช้แร่ของโครเมียมในอุตสาหกรรมเริ่มประมาณปี ค.ศ. 1800 โดยนำมาผลิตเคมีภัณฑ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหนังสัตว์ และสี ชื่อของธาตุนี้มาจากคำกรีก "Chromos" แปลว่าสี เนื่องจากสารประกอบของโครเมียมหลายชนิดมีสี

การใช้ประโยชน์

- 1) ใช้ทำโลหะเจือโดยผสมกับโลหะอื่น ๆ เช่น กับเหล็กและนิกเกิล เพื่อทำเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)
- 2) ใช้เคลือบโลหะและพลาสติกต่าง ๆ เช่น เหล็กและเหล็กกล้า เพื่อป้องกันการผุกร่อนของโลหะเหล่านั้น กระบวนการเคลือบหรือชุบโลหะเรียกว่า electroplating
- 3) ทำ refractory brick
- 4) ใช้ในงานวิจัยทางนิวเคลียร์และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง

โลหะโครเมียมและสารประกอบที่ไอออนโครเมียมมีเลขออกซิเดชัน +3 ไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย แต่สารประกอบที่ไอออนโครเมียมมีเลขออกซิเดชัน +6 จะทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง เป็นพิษต่อร่างกาย การหายใจฝุ่นของโครเมตหรือไอของกรดโครมิกเป็นอันตรายต่อระบบหายใจได้ ระดับการปนเปื้อนของโครเมตในอากาศได้คือ 0.001 ppm ของอากาศ

น้ำหนักอะตอม	51.996 amu
จุดหลอมเหลว	1,875°C
จุดเดือด	2,199°C
ความหนาแน่น	7.19 g/cc ที่ 20°C
เลขออกซิเดชัน	+2, +3 และ +6

โครเมียมเป็นธาตุในหมู่ VIB ประกอบไปด้วยโครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) ทังสเตน (W) และอยู่ในคาบเดียวกับ วานาเดียม (V) สังกะสี (Zn) นิกเกิล (Ni) และ ทองแดง (Cu) โครเมียมเป็นโลหะสีชาวจเงิน เป็นมันวาวและแข็งมากสามารถต้านทานการผุกร่อน คงความเป็นเงาได้นานในอากาศ จึงใช้ทำโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม นอกจากนี้โครเมียมยังรวมตัวกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงและสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันและฮาโลเจน โครเมียมสามารถละลายในกรดไฮโดรคลอริกและซัลฟิวริก แร่สำคัญของโครเมียมในธรรมชาติ คือ โครไมต์ (Cr_2O_3) หรือ โครมไอรอน ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นออกไซด์ผสม การรีดิวซ์โครไมต์ด้วยคาร์บอนจะได้เหล็กเจือ (เหล็ก-โครเมียม) ซึ่งใช้เติมลงในเหล็กกล้าโดยตรงเพื่อทำเหล็กกล้าเจือโลหะ ในการเกิดเป็นองค์ประกอบกับสารอื่นๆ โครเมียมจะใช้อิเล็กตรอนชั้น 3d และ 4s สามารถแสดงสถานะออกซิเดชันได้ตั้งแต่ -2 ถึง +6 ส่วนมากเลขออกซิเดชันที่พบจะเป็น +2, +3 และ +6 ในทางการค้าจะพบโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชัน +6 สถานะเลขออกซิเดชันที่ค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

รูปแบบของโครเมียมในน้ำเสีย

- โครเมียม (VI) ออกไซด์ (CrO_3) เป็นออกไซด์ที่เป็นกรด โครเมียม (VI) ในสารละลาย สะเทินหรือสารละลายต่างอยู่ในรูปโครเมต (CrO_4^{2-}) มีสีเหลือง และในสารละลายกรด จะอยู่ในรูปไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) มีสีส้ม หรือ HCrO_4^-
- โครเมียม (III) ออกไซด์ (Cr_2O_3) หรือโครไมต์ เป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ สารละลายเกลือโครเมียม (III) อยู่ได้นาน โดยไม่เกิดออกซิเดชันหรือรีดักชัน
- โครเมียม (II) ออกไซด์ (CrO) เป็นเบสิกออกไซด์ โครเมียม (II) ถูกออกซิไดส์เป็นโครเมียม (III) ได้ง่าย แม้แต่ทิ้งไว้ในอากาศ จึงเป็นรีดิวซิงค์เอเจนต์ที่ดี

อันตรายของโครเมียม

ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการใช้โครเมียมอยู่มากพอสมควร ดังนั้นโอกาสที่โครเมียมจะปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงมีมาก ผู้ประกอบการจึงต้องตระหนักถึงการควบคุมระดับโครเมียมก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อความปลอดภัยของประชาชนส่วนใหญ่ที่ใช้น้ำอุปโภคบริโภค ดังนั้นกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมจึงได้กำหนดระดับของโครเมียมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร ถ้ามีการสะสมของโครเมียมในร่างกายเป็นประจำและเป็นเวลานาน จะทำให้เป็นอันตรายต่อระบบผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ หากมีการสะสมปริมาณมากโครเมต (III) จะทำให้เป็นมะเร็งปอดได้ เนื่องจากไดโครเมตสามารถผ่านเนื้อเยื่อของเซลล์ได้ง่าย และถูกรีดิวซ์เป็นโครเมต (III) ในไซโตพลาสซึม และจะจับกับโปรตีนและทำปฏิกิริยากับกรดนิวคลีอิกในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต พิษของโครเมียม (VI) ยังเป็นอันตรายต่อและปลาสัตว์น้ำหลายชนิดเมื่อมีโครเมียม (VI) สะสมในปริมาณ 1.2-5 ppm และเป็นอันตรายต่อแมลงเมื่อมีปริมาณ 0.7 ppm ทั้งนี้อันตรายของพิษโครเมียมในน้ำมีผลมาจากค่าการละลายของสารประกอบในน้ำ

ตารางที่ 2.1 สภาวะออกซิเดชันและรูปแบบโครงสร้างของโครเมียม (ไพศาล, 2541)

สภาวะออกซิเดชัน	เลขโคออดิเนชัน	รูปแบบโครงสร้าง	ตัวอย่างสารประกอบ
Cr ¹⁻	6	Octahedral	Na ₂ [Cr ₂ (CO) ₁₀]
Cr	6	Octahedral	Cr(CO) ₆ Cr(CO) ₆
Cr ¹⁺	6	Octahedral	[Cr(C ₆ H ₄) ₂] ⁺ [Cr(bipyO ₃) ⁺
Cr ²⁺	4	Distorted tetrahedral	CrCo ₂ (CH ₃ CN) ₂
	6	Distorted tetrahedral	CrCl ₂ , Cr(H ₂ O) ₆ ²⁺
Cr ³⁺	4	Distorted tetrahedral	CrCl ⁴⁻ , probably CrCl ₄
	6	Octahedral	[Cr(NH ₃) ₆] ³⁺ , Cr(acac) ₃ , [Cr(CN) ₆] ³⁻
Cr ⁴⁺	4	Tetrahedral	Cr(OC ₄ H ₉) ₄ , Ba ₂ CrO ₄
	6	Octahedral	CrF ₆ ²⁻ , CrO ₂
Cr ⁵⁺	4	Tetrahedral	CrO ₄ ³⁻
	5		CrF ₅ , CrOCl ⁴⁻
	6	Octahedral	[CrOCl ₅] ²⁻
	8	Quash-dodecahedral	CrO ₈ ³⁻
Cr ⁶⁺	4	Tetrahedral	CrO ₄ ²⁻ , CrO ₃ , CrO ₂ Cl ₂

2.4 เยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) ประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ 1) ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกละลายอยู่ 2) ส่วนของเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว ตัวทำละลาย และสารสกัด (Extractant) ส่วนของเยื่อแผ่นเหลวนี้อาจอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์ (Organic Phase) 3) ส่วนของสารละลายนำกลับหรือสารละลายสตรีป (Receiving Phase or Strip Phase) ทำหน้าที่รับองค์ประกอบในสารละลายป้อนที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลว ส่วนของสารละลายนำกลับจะอยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์เช่นเดียวกับของสารละลายป้อน ซึ่งส่วนของเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขององค์ประกอบของสารนั้นละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม และทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้ รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ มีรายงานกล่าวว่าเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอื่น (Schultz, 1988)

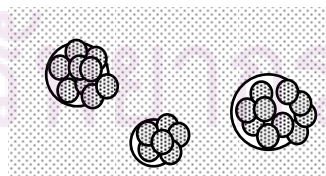
ก) โฟม (Foam)



ข) फिल्म



ค) เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน
(Emulsion Liquid Membrane)



ง) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ
(Supported Liquid Membrane)

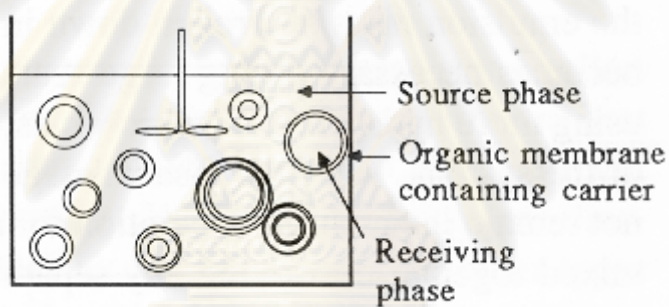


รูปที่ 2.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (Shultz et al., 1988)

ประเภทของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว

2.4.1 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

ในกระบวนการกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) ดังรูปที่ 2.4 และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทของค์ประกอบดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.4 ส่วนสารละลายนำกลับจะอยู่ภายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวดังรูปที่ 2.4 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันทำได้โดยนำสารละลายที่จะใช้เป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นจนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคของสารละลายนำกลับมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำ จึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (www.rpi.edu/membrane.biochem/mem.types.html)

เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงใส่ลงในสารละลายปั่นซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น จากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายปั่น ตามลำดับ กระบวนการแยกจะเริ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกในสารละลายปั่นทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับเป็นแรงขับไปยังอีกด้านของผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับกับสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดวนกลับมาในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสระหว่างสารละลายปั่นกับเยื่อแผ่นเหลวเพื่อไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกอีก หลังจากเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ จึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันไปแยกสารละลายปั่นที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้วออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกสารละลายนำกลับออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้อีก

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน แบ่งออกเป็น

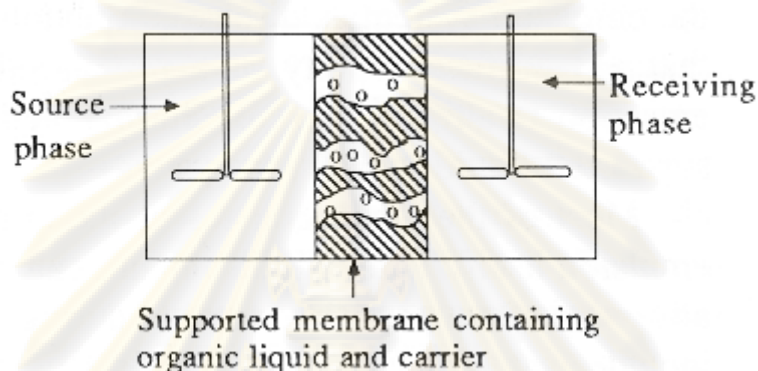
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในสารละลายอินทรีย์ (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีสารละลายนำกลับเป็นน้ำ
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของสารละลายอินทรีย์ในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีสารละลายนำกลับเป็นสารละลายอินทรีย์

2.4.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนของตัวรองรับด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary Force) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz et al., 1988) ตัวรองรับมีหลายแบบ ได้แก่ แบบแผ่นแบน (Flat Sheet) แบบแผ่นม้วน (Spiral Wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับคือกระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและใช้สารสกัดปริมาณน้อย แต่ก็มีข้อเสียคืออัตราการถ่ายเทมวลต่ำและมีการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลว (O'Hara et al., 1989; Shiau และ Chen, 1993)

2.4.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแบนดังแสดงดังรูปที่ 2.5 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมใช้ศึกษากลไกการถ่ายเทมวล เนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่มีข้อด้อยคือเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



รูปที่ 2.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

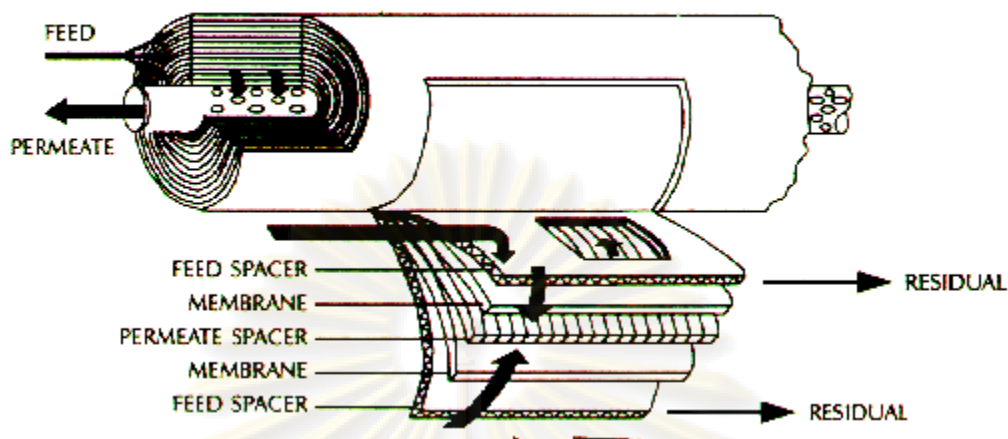
(www.rpi.edu/membrane.biochem/mem.types.html)

2.4.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำและแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อของสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของมอดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (Epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วหรือราฟฟิเนต (Raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้ (Strip) จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของมอดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ มอดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPIRAL-WOUND ELEMENT



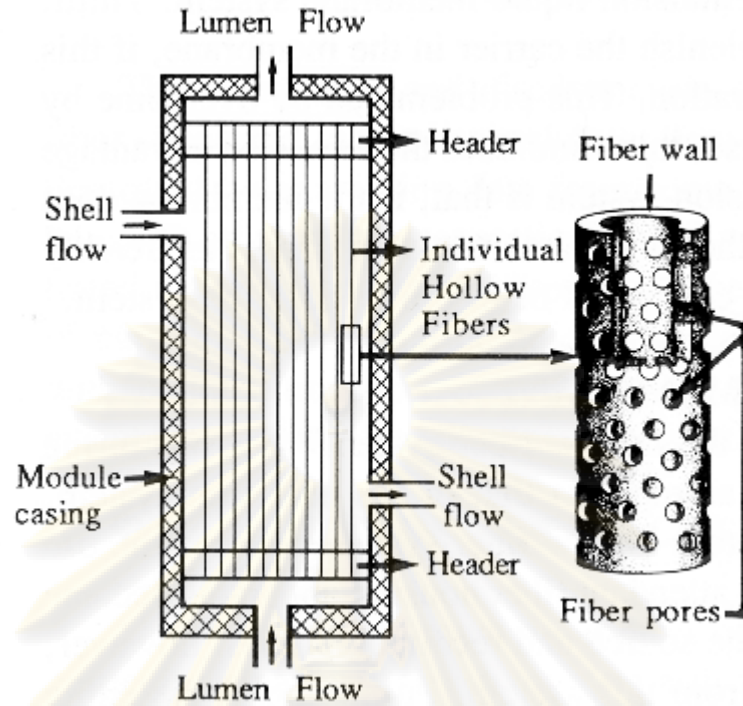
รูปที่ 2.6 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน

(www.rpi.edu/membrane.biochem/mem.types.html)

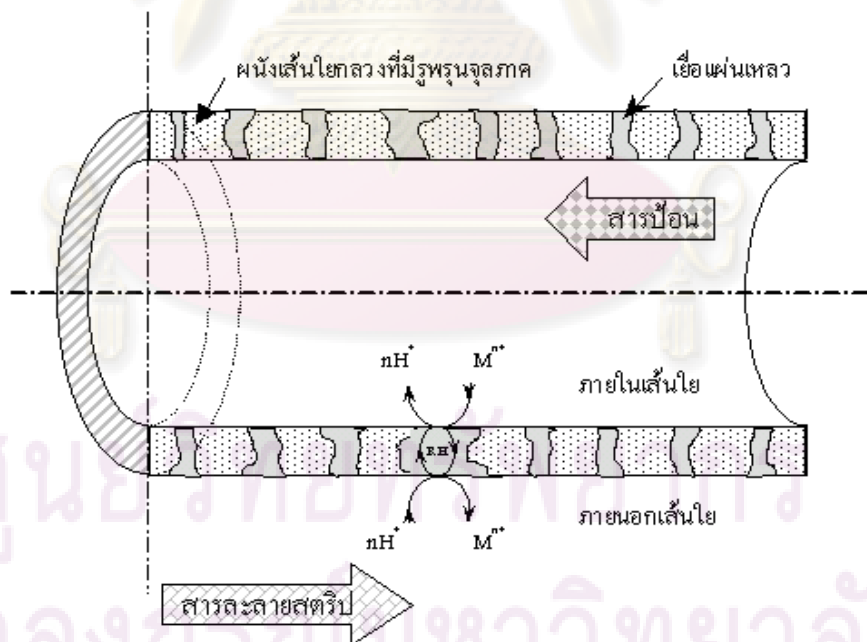
2.4.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในมอดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของมอดูลด้วยเรซิน (Resin) ดังรูปที่ 2.7 ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงด้านฝั่งท่อ (Tube Side) และฝั่งเปลือก (Shell Side) แล้วแต่ว่าจะให้สายใต้อยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวตั้งอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับฝั่งท่อและฝั่งเปลือก การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลทางเดียวกันและแบบสวนทางกัน รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในมอดูลแบบสวนทางกัน

กระบวนการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง ทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวตั้งไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของตัวรองรับเยื่อแผ่นเหลว เมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อคัดเลือกไอออนโลหะจากสารละลายป้อนถ่ายเทไปยังสารละลายนำกลับ ตัวรองรับที่ใช้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาตั้งจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาตั้งจะเป็นวัฏภาคสารละลายน้ำ



รูปที่ 2.7 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
 (www.rpi.edu/membrane.biochem/mem.types.html)



รูปที่ 2.8 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ เมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Ramakul, 2004)

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (ประกร, 2544)

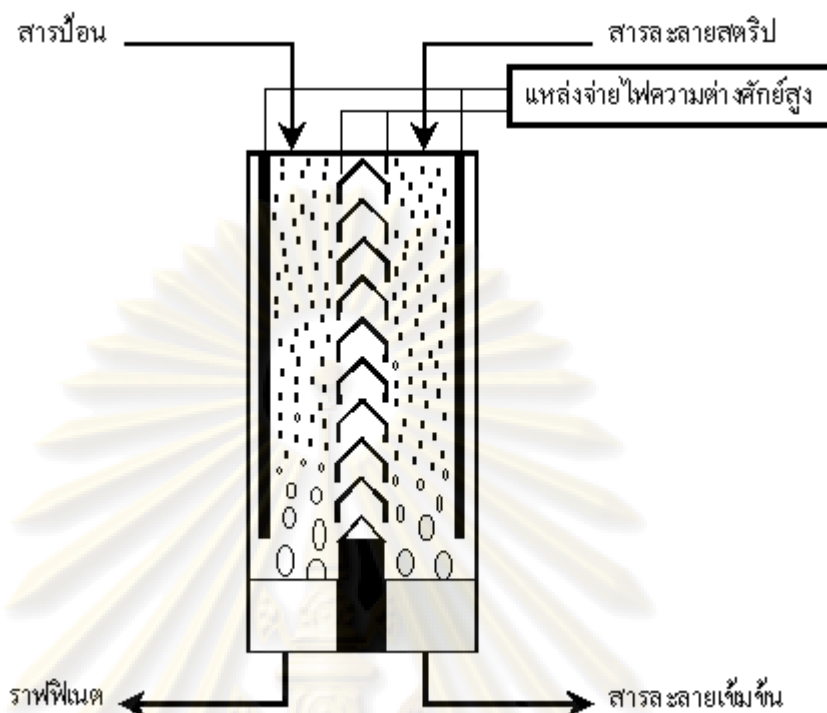
- มีค่าแฟกเตอร์การแยก (Separation Factor) สูง
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือก (Selectivity) สูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- สามารถใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- สามารถใช้ประโยชน์จากสารสกัดที่มีราคาแพงได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงและขยายขนาดได้ง่าย

รูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang and Cussler, 1986; Dahuron and Cussler, 1988) และสามารถปรับปรุงสมบัติเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi and Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanigaki et al., 1988) ซึ่งเป็นรูปแบบของตัวรองรับที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้

2.4.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้พัฒนาจากการรวมเทคนิคของการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ชนิดหอสกัดแบบหยุด หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น ลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (ประกร, 2544)

จากรูปที่ 2.9 ชุดถังอุปกรณ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle Plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกันโดยเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากัน มีลวดโลหะยึดแต่ละแผ่นไว้และใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่สำหรับแบ่งกั้นภูมิภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (Raffinate) กับสารละลายนำกลับขาออกในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มอยู่และต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความตํ่าศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต ขั้นตอนการทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นภูมิภาคของสารอินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ปริมาณที่ต้องการ เยื่อแผ่นเหลวจะเป็นภูมิภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความตํ่าศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต จากนั้นป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของภูมิภาค เกิดการสกัดและนำกลับตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของภูมิภาคต่างๆ เพราะหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นที่กั้นระหว่างภูมิภาคทั้งสองไว้ หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความ

ต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัฏภาคของสารละลายมีรูปทรงยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวัฏภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของวัฏภาคของสารละลายซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตหยดของวัฏภาคนั้นจะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และความแตกต่างของความหนาแน่นของเฟสสารละลายป้อนกับเฟสของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะทำให้เฟสทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ นอกจากนี้ยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของเฟสที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้นรวมตัวกันและตกกลับไปยังเฟสเดิม (Gu et al., 1990)

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุไลมาน, 2544)

ชนิดเยื่อแผ่นเหลว	ข้อดี	ข้อเสีย
เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง 2. มีกำลังการผลิตสูง 3. กระบวนการไม่ซับซ้อน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก 2. ใช้พลังงานในการสกัดสูง 3. ปัญหาการปนเปื้อน 4. การใช้สารลดแรงตึงผิวจะต้านทานการถ่ายเทมวล
เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับ	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีค่าการคัดเลือกสูง 2. ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว 3. ใช้สารสกัดปริมาณน้อย 4. ขยายขนาดง่าย 5. อัตราการถ่ายเทมวลสูง 	<ol style="list-style-type: none"> 1. อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรต่ำ 2. เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ 3. มีการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากสารสกัดหลุดออกจากรูพรุน
เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีเสถียรภาพสูง 2. ประสิทธิภาพสูง 3. การปนเปื้อนต่ำ 4. ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว 	<ol style="list-style-type: none"> 1. กำลังการผลิตต่ำ 2. สารสกัดต้องมีความเป็นขั้วต่ำ 3. สารสกัดต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น 4. ใช้สารสกัดปริมาณมาก

ถึงแม้เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มาก เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการไม่ว่าจะเป็น ขนาดและการกระจายตัวของหยด เฟสซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง เฟสของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่เฟสของสารอินทรีย์เป็นเฟสต่อเนื่องเท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของเฟสต่างๆ ต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในการสกัด และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เป็นต้น กล่าวได้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยวิธีต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าตัวรองรับอื่นๆ

2.5 ทฤษฎีและกลไกการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.5.1 การเคลื่อนที่แบบพาสซีฟ (Passive Transport)

เป็นกรณีที่ง่ายที่สุด การถ่ายเทมวลเกิดภายใต้แรงขับซึ่งเกิดจากความแตกต่างของศักย์ทางเคมีของสารที่เคลื่อนที่ผ่าน โดยค่าการเลือกผ่าน (Selectivity) ของเยื่อแผ่นเหลวขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารในเยื่อแผ่นเหลวและอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสารในเยื่อแผ่นเหลว อย่างไรก็ตามการแยกด้วยกลไกนี้มักให้ค่าการเลือกผ่านและค่าฟลักซ์ต่ำ

2.5.2 การเคลื่อนที่แบบมีสารสกัดหรือตัวพา (Carrier-mediated Transport)

การเคลื่อนที่แบบมีสารสกัดหรือตัวพาขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารสกัดหรือตัวพากับสารที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และความสามารถในการเคลื่อนที่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลว การเคลื่อนที่แบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การเคลื่อนที่แบบคู่ควบ (Coupled Transport) และการเคลื่อนที่แบบฟาซิลิเทท (Facilitated Transport)

ในระบบการเคลื่อนที่แบบคู่ควบสารสกัดหรือตัวพาจะช่วยในการเคลื่อนที่ของสารที่ต้องการสกัด เช่น ไอออนโลหะ ในสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวโดยอาศัยแรงขับจากการเคลื่อนที่ของสารอีกตัวหนึ่ง เช่น ไอออนไฮโดรเนียม คู่ควบกันไป การเคลื่อนที่ของสารคู่ควบนั้นอาจเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน หรือในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของสารที่ต้องการ

สกัด เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบคู่ควบนี้ทำให้สารที่ต้องการสกัดสามารถเคลื่อนที่สวนทางกับ ความแตกต่างของศักย์ทางเคมี (Chemical Potential) ของสารนั้นได้ตราบไคที่ความแตกต่างของ ศักย์ทางเคมีของสารคู่ควบมีค่าสูงพอ

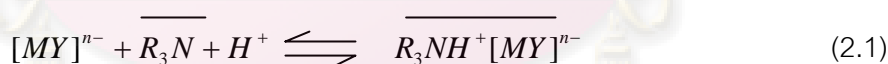
สำหรับการเคลื่อนที่แบบฟาซิลิเทตตัวพาที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวจะเลือกจับกับ ไอออนโลหะในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะนั้น จากนั้นจึง เคลื่อนที่ไปยังด้านเพอร์มิเอต (Permeate) โดยอาศัยแรงขับที่เกิดจากความแตกต่างของศักย์ทาง เคมีของสารประกอบที่เกิดขึ้น

การถ่ายเทมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบ ซึ่งหมายถึง กระบวนการถ่ายเทของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อถ่ายเท องค์ประกอบที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนไปยังสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับของการถ่ายเท มวล คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม ดังนั้นจึงสามารถแยกไอออนโลหะ ที่ต้องการได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านของ สารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน

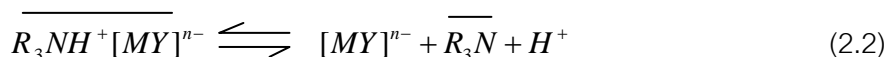
การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบ่งเป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

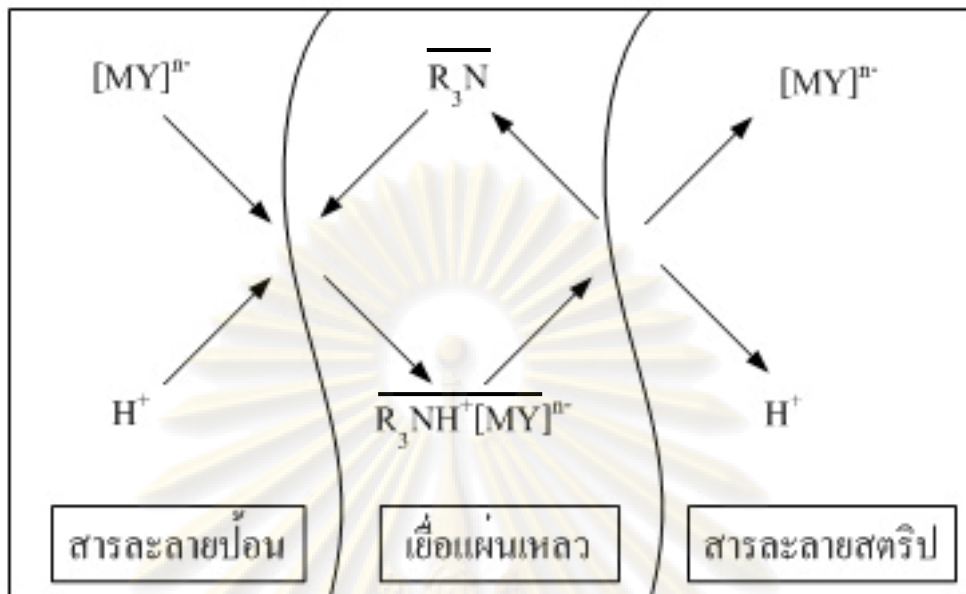
1) การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกัน คือ การถ่ายเทที่การแพร่ของไอออน ทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว การเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้

ไอออนโลหะในรูปประจุลบ $[MY]^{n-}$ ที่อยู่ในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับ สารสกัดชนิดที่เป็นเบส (R_3N) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ที่ อยู่ในสารละลายป้อน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ดังสมการที่ 2.1



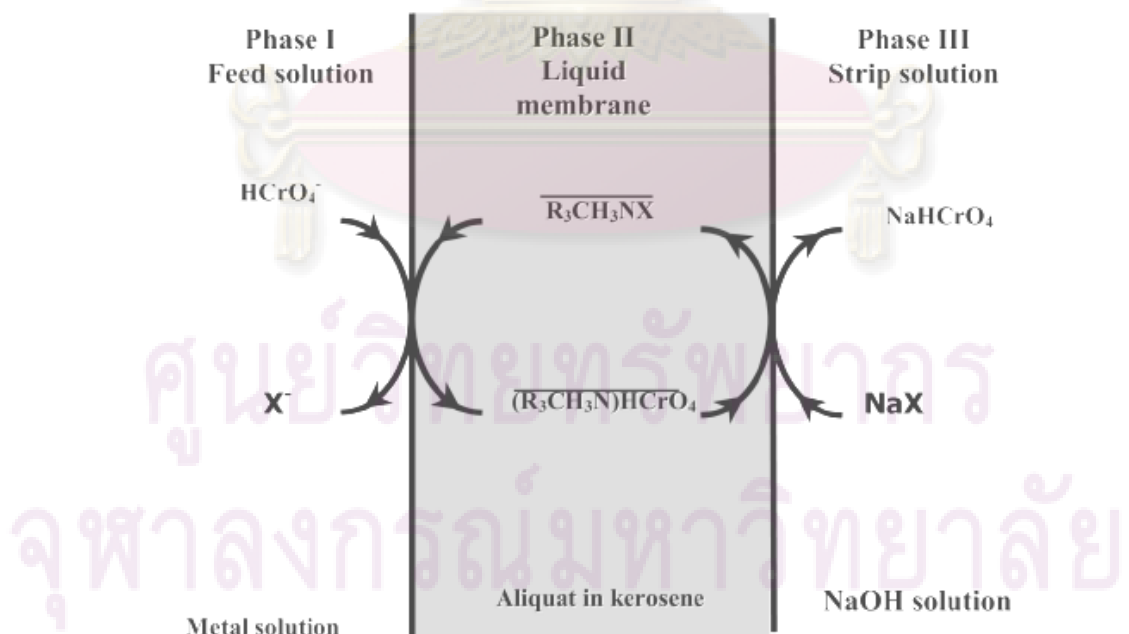
สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจาก ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่ง ระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) จะ เกิดปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับได้ไอออนไฮโดรเนียมและไอออนโลหะละลายอยู่ใน สารละลายนำกลับ และได้สารสกัด (R_3N) ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อน เพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนอย่างต่อเนื่อง ดังสมการที่ 2.2 และรูปที่ 2.10





รูปที่ 2.10 ลักษณะการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกัน (เอกพิชญ์, 2548)

ตัวอย่างแสดงการเคลื่อนของไอออนโครเมียมกับสารสกัด Aliquat 336 ในการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบในทางเดียวกันของไอออนโครเมียมกับสารสกัด Aliquat 336

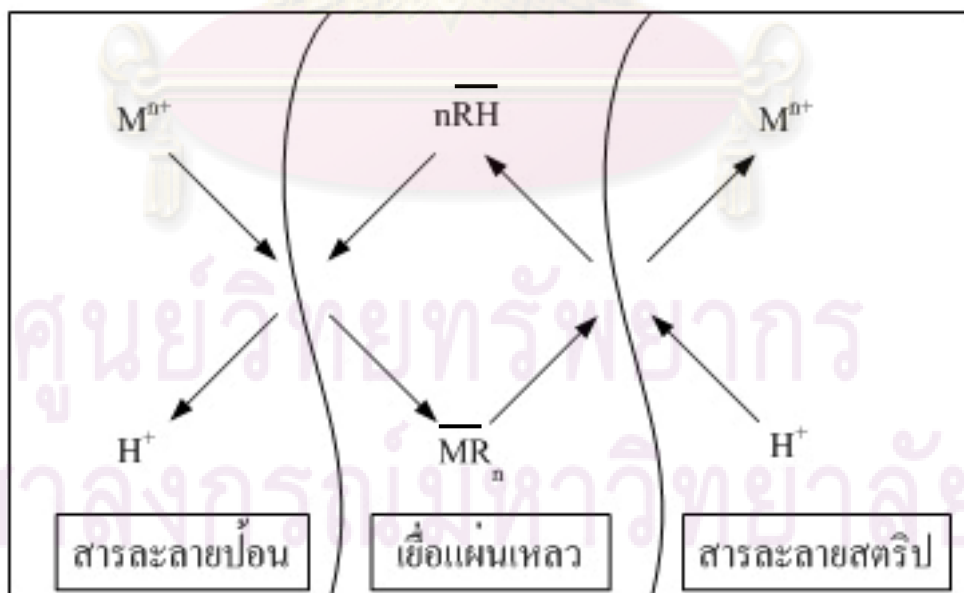
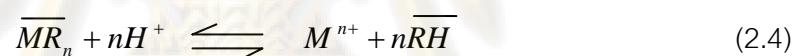
(Prakorn, 2004)

2) การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบบสวนทาง คือ การถ่ายเทมวลที่การแพร่ของไอออนทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวโดยเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการดังนี้

ไอออนโลหะ (M^{n+}) ที่อยู่ในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดกรด (\overline{RH}) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (\overline{MR}_n) อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และไอออนไฮโดรเนียม (H^+) อยู่ในสารละลายป้อน ดังสมการที่ 2.3

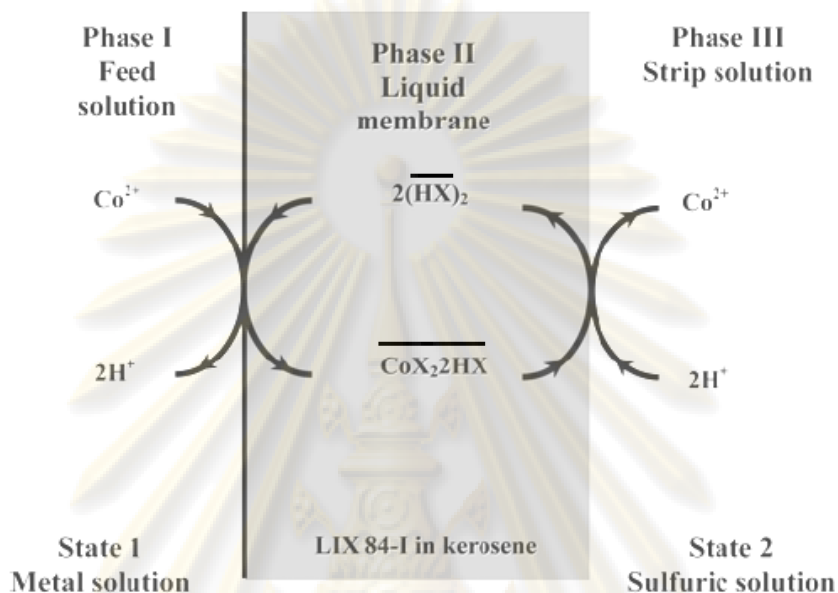


สารประกอบเชิงซ้อน (\overline{MR}_n) ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน (\overline{MR}_n) จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (\overline{RH}) ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนอย่างต่อเนื่อง ดังสมการที่ 2.4 และรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบบสวนทาง (เอกพิชญ์, 2548)

ตัวอย่างแสดงการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะโคบอลต์กับสารสกัด LIX84-I ในการถ่ายเทมวล
คู่ควบแบบสวนทางแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบบสวนทางของไอออนโคบอลต์กับสารสกัด LIX84-I
(Prakorn, 2006)

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

- 1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- 2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- 3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
- 4) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารละลายเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- 5) การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.6 ชนิดของสารสกัด

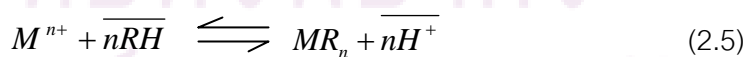
สมบัติของสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่

- 1) สามารถสกัดไอออนโลหะที่ภาวะความเป็นกรด-เบสที่ต้องการ
- 2) เลือกเฉพาะไอออนโลหะที่ต้องการสกัดโดยไม่ทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะชนิดอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ
- 3) มีอัตราการสกัดและการนำกลับอยู่ในระดับที่น่าพอใจ
- 4) ละลายได้ในเฟสของเยื่อแผ่นเหลวแต่ละลายได้จำกัดในสารละลายป้อน
- 5) มีความเสถียรตลอดการดำเนินงาน
- 6) มีความจุไอออนโลหะได้มาก
- 7) สามารถนำกลับไอออนโลหะออกจากเยื่อแผ่นเหลวได้ง่าย
- 8) ไม่ติดไฟ ไม่ระเหยง่าย ไม่เป็นพิษ
- 9) ละลายได้ดีในตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนชนิดสายตรงยาว (Aliphatic) และชนิดเป็นวง (Aromatics)

ชนิดของสารสกัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

2.6.1 สารสกัดที่เป็นกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อย คือ สารสกัดชนิดกรด และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดชนิดกรดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ เป็นต้น ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่เป็นกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในเฟสของสารละลายอินทรีย์หรือเฟสเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.5



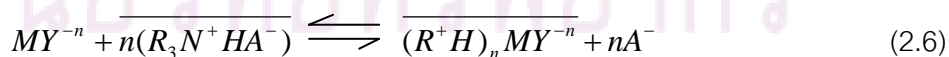
ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึง สารนั้นอยู่ในเฟสสารละลายอินทรีย์ สมการข้างต้นยังแสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะของสารสกัดขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของเฟสสารละลายป้อน และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดที่เป็นกรดมีประโยชน์มากเชิงพาณิชย์ในการสกัดไอออนโลหะ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) เช่น กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acids; D2EHPA) นิยมใช้มากที่สุด

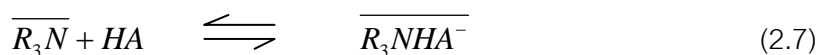
สารสกัดประเภทคีเลท ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยดอนเนอร์กรุป (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียง 2 ประเภท คือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-Hydroxy Benzophenone Oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Cognis Ltd. ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical Industrials (Plc.) และสารสกัดชื่อการค้า SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemicals Ltd., USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-Hydroxyquinoline) ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2.6.2 สารสกัดชนิดเบส (Basic Extractant)

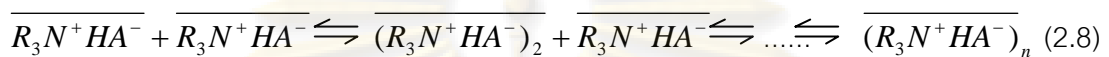
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งเกิดเป็นสารประกอบเกลือได้ง่ายในขณะสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในเฟสสารละลายที่อยู่ในรูปประจุลบ ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปให้อยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



เอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+HA^-$ ในเฟสของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์สัมผัสกับสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ MY^n จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ 2.7 ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยใช้เอมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในเฟสของสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดเฟสที่สามขึ้นดังสมการที่ 2.8

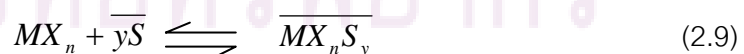


การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้เฟสของสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็น 2 ส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่น สารละลายในกลุ่ม Long-chain Aliphatic Alcohol (Tavlarides et al., 1987)

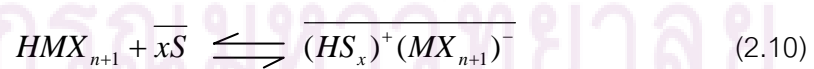
ตัวอย่างสารสกัดชนิดเบส เช่น Tri-n-octylamine (TOA) หรือเกลือของเอมีน เช่น Methyltrioctylammonium Chloride (Aliquat 336) (Ramakul et al., 2006)

2.6.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดชนิดเป็นกลางหรือสารสกัดประเภทซอลเวท (Solvating Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์ก็๊ปจึงไม่สามารถแตกตัวให้โปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในเฟสของสารละลายของน้ำจะถูกรวบรวมและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในเฟสสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมตัวกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในเฟสของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมตัวกันกับสารสกัดชนิด

โซลเวนต์ผสมการ ที่ 2.9 และ 2.10 ตัวอย่างของสารสกัดชนิดเป็นกลาง เช่น Tri-n-butylphosphate (TBP)

ตารางที่ 2.3 สรุปรายละเอียดของการใช้สารสกัดชนิดต่างๆ (ประกร, 2549)

	สารสกัดที่เป็นกรด	สารสกัดชนิดเบส	สารสกัดชนิดเป็นกลาง
สารละลายป้อน	เป็นเบสกว่า	เป็นกรดกว่า	เป็นกรดกว่า
สารละลายนำกลับ	เป็นกรดกว่า	เป็นเบสกว่า	เป็นเบสกว่า
การถ่ายเทมวล	สวนทาง	ทางเดียวกัน	สวนทาง
ไอออนที่ถ่ายเทไปกับ ไอออนโลหะ	ไฮโดรเนียม (H ⁺)	ไฮโดรเนียม (H ⁺)	ไฮโดรเนียม (H ⁺)

2.7 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ หมายถึง การสกัดไอออนโลหะโดยใช้สารสกัด 2 ชนิดมาผสมกันแล้วได้ประสิทธิภาพการสกัดสูงกว่าผลรวมของการสกัดของสารสกัดแต่ละชนิด (J.N Mathur et al.) ค่าสัมประสิทธิ์ในการเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) นิยามดังนี้

$$S.C. = \log \left(\frac{D_{(1,2)}}{D_{(1)} + D_{(2)}} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ $D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในเฟสน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนโดยใช้สารสกัดชนิดเดียว

$D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในเฟสน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนเมื่อใช้สารสกัดชนิดเดียวอีกชนิดหนึ่ง

$D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในเฟสน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนเมื่อใช้สารสกัดสองชนิดผสมกัน

D หมายถึง Distribution Ratio คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในเฟสน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ถ้าค่า S.C. มากกว่า 0 หมายความว่าเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ แต่ถ้าค่า S.C. น้อยกว่า 0 หมายความว่าสารสกัดที่นำมาผสมกันทำให้ความสามารถในการสกัดด้อยลง เรียกว่า antagonistic

สารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันเพื่อที่จะให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นจะต้องมีสารสกัดชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสกัดหลักซึ่งโดยมากจะใช้ Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) เป็นสารสกัดหลัก และสารสกัดอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นคอนเนอร์กูปคอยเสริมการสกัด สารสกัด

จำพวกดอนเนอร์กรุปนี้จะเป็นสารสกัดที่ไม่สามารถแตกตัวให้โปรตอนได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวไว้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งดอนเนอร์กรุปพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักเกิดเป็น adduct และไปจับโลหะอีกทีหนึ่ง สารสกัดที่เป็นพวกดอนเนอร์กรุป เช่น Tri-n-Octylamine (TOA), Tri-n-butylphosphate (TBP), Tri-n-Octylphosphineoxide (TOPO), Aliquat Chloride ฯลฯ ปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์จะเริ่มปฏิกิริยาดังนี้

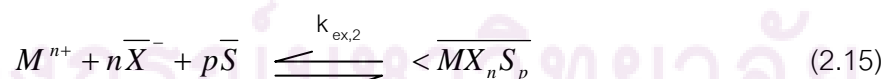


$$k_{ex,1} = \frac{[H^+]^n [\overline{MR}_n]}{[M^{n+}] [\overline{HA}]^n} \quad (2.13)$$

สมการที่ 2.12 เป็นปฏิกิริยาการสกัดของสารสกัดหลักซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกรด \overline{HR} คือ สารสกัดหลัก และ $k_{ex,1}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่สารสกัดหลักทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะโดยตรง ส่วนปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ คือ สารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอนเนอร์กรุป (S) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก \overline{HR} แล้วไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบอีกชนิดคือ $\overline{MR}_n S_x$ เรียกว่า adduct ดังสมการที่ 2.14 ทำให้สามารถสกัดไอออนโลหะได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สารสกัดที่เป็นดอนเนอร์กรุปยังสามารถไปจับไอออนโลหะได้เองโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักก่อนดังสมการที่ 2.15 ซึ่งจะยิ่งทำให้สามารถสกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้นและเกิดเป็น adduct คือ $\overline{MX}_n S_p$ เมื่อ X คือ ไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของน้ำ



และสารสกัดที่มีดอนเนอร์กรุปยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะได้โดยตรงดังสมการ



จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 จะได้

$$k_{ex,1+2} = \frac{[H^+] [\overline{MX}_n S_x]}{[M^{n+}] [\overline{S}]^x [\overline{HA}]^n} \quad (2.16)$$

$$k_{ex,2} = \frac{[MX_n S_p]}{[M^{n+}][X^-]^n [S]^p} \quad (2.17)$$

เมื่อ $k_{ex,1+2}$ และ $k_{ex,2}$ คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดโดยสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอนเนอร์กรุปโดยตรง ตามลำดับ และ Distribution Ratio คือ

$$D_{(1)} = \frac{[MR_n]}{[M^{n+}]} = \frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.18)$$

$$D_{(2)} = \frac{[MX_n S_p]}{[M^{n+}]} = k_{ex,2} [X^-]^n [S]^p \quad (2.19)$$

$$D_{(1+2)} = D_{(1)} + D_{(2)} + \frac{[MR_n S_x]}{[M^{n+}]} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.18, 2.19, และ 2.20 จะได้ว่า

$$D_{(1+2)} = \frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-]^n [S]^p + K_{ex,1+2} \frac{[S]^x [\overline{HA}]^n}{[H^+]} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.10 จะได้ว่า

$$S.C. = \log \left(\frac{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-]^n [S]^p + K_{ex,1+2} \frac{[S]^x [\overline{HA}]^n}{[H^+]}}{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-]^n [S]^p}} \right) \quad (2.22)$$

เนื่องจากค่าของ $K_{ex,2}$ มีค่าน้อยมาก เพราะสารสกัดที่เป็นดอนเนอร์กรุปนั้นสามารถจับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้น้อยมากจึงให้พจน์ที่มี $K_{ex,2}$ นั้นเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.11 จะได้

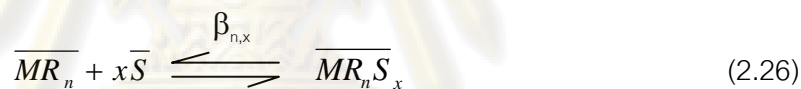
$$\text{S.C.} = \log \left(1 + \frac{K_{\text{ex},1+2} [\bar{S}]^x}{K_{\text{ex},1}} \right) \quad (2.23)$$

$$\text{S.C.} = \log \left(1 + \beta_{n,x} [S]^x \right) \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\beta_{n,x} = \frac{K_{\text{ex},1+2}}{K_{\text{ex},1}} \quad (2.25)$$

$\beta_{n,x}$ หมายถึง ค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาแบบเสริมฤทธิ์ที่เกิดในเฟสน้ำมันหรือในเมมเบรน จะเห็นได้ว่า $\beta_{n,x}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดผสมกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดหลักเพียงชนิดเดียว นั่นคือ อัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.13 กับสมการที่ 2.11 ดังนั้น $\beta_{n,x}$ ก็คือค่าคงที่สมดุลของสมการที่ 2.13 ลบด้วยสมการที่ 2.11 คือ

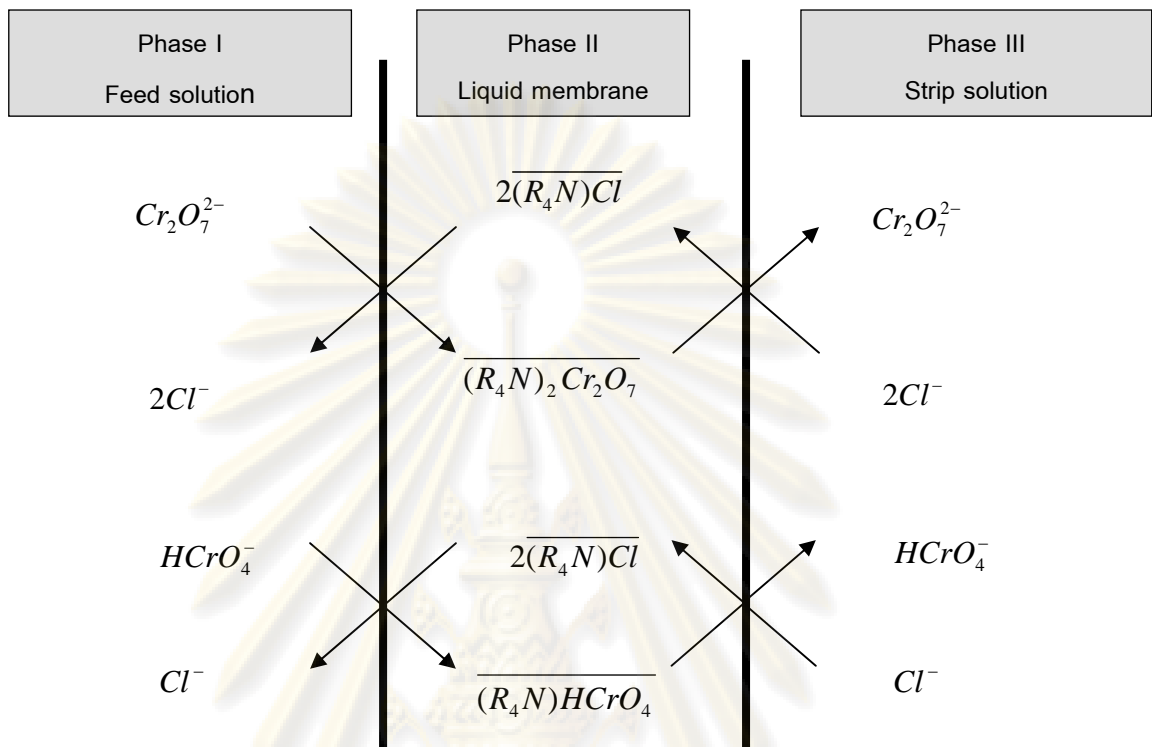


ซึ่งสมการที่ 2.15 นี้เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาแบบเสริมฤทธิ์ที่เกิดในเมมเบรน โดยมี $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามากหมายถึงมีการเกิดการเสริมฤทธิ์มาก และถ้าสารสกัดที่เป็นดอนเนอร์รูปร่างนั้นมีการทำปฏิกิริยาเป็น adduct หลายตัว สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวมได้ เป็น

$$\text{S.C.} = \left(1 + \sum_{i=1}^{i=x} \beta_{n,i} [\bar{S}]^i \right) \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าไอออนที่อยู่ในสารละลายป้อน เช่น M^{n+} , X^- , H^+ นั้นไม่มีผลต่อค่า $\beta_{n,x}$ นั่นคือไม่มีผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

2.8 การถ่ายเทมวลของ Cr(VI) ในงานวิจัยนี้



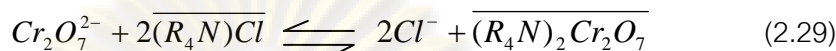
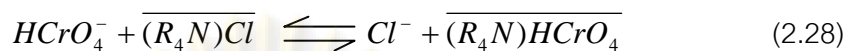
รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของไอออนโครเมียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 และสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์

ในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลของไอออนโครเมียมแบบการถ่ายเทมวลคู่ควบแบบไปทางเดียวกัน จากน้ำเสียของกระบวนการกักตุนในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อกำจัดโครเมียมให้ได้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีขั้นตอนการถ่ายเทมวลดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไอออนโครเมียมในรูปของ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ ในสารละลายป้อนจะแพร่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวซึ่งยึดตรึงอยู่บนรูพรุนของเส้นใยกลวง โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นไอออนโครเมียม (Concentration Gradient) เป็นแรงขับเคลื่อน (Driving Force)

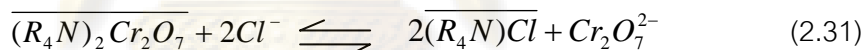
ขั้นตอนที่ 2 ไอออนโครเมียมจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหรือตัวพา (Carriers) ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวดังสมการที่ 2.28-2.29 เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น

โดยสารประกอบเชิงซ้อนจะหลุดเข้าไปอยู่ในเฟสของเยื่อแผ่นเหลว และคลอไรด์ไอออนจะอยู่ในสารละลายป้อน ในการเกิดปฏิกิริยาไอออนไฮโดรเนียมและไอออนโครเมียมเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (Prakorn et al., 2004)

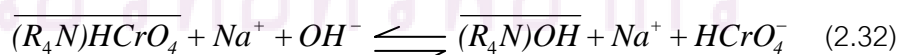


ขั้นตอนที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโครเมียมจะแพร่จากผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านตรงข้ามซึ่งเป็นผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวมันเองเป็นแรงขับเคลื่อน

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนเคลื่อนที่มายังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นดังสมการ (Chakraborty et al., 2005)



โดยสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโครเมียมจะทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไอออนในสารละลายนำกลับ ทำให้ไอออนโครเมียมหลุดออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ ส่วนสารสกัดจะไปจับกับคลอไรด์ไอออนซึ่งเท่ากับว่าได้สารสกัดกลับมาเหมือนเดิม หลังจากนั้นสารสกัดก็จะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งเพื่อทำปฏิกิริยาต่อไปเช่นนี้ไปเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามถ้าสารนำกลับที่ใช้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้ปฏิกิริยาการนำกลับตามสมการที่ 2.32 และ 2.33 (Alonso et al., 1997)



2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของ Cr(VI)

ในการทดลองแต่ละครั้งอัตราการไหลของสารละลายป้อนจะเท่ากับ 100 mL/min สารละลายป้อนไหลทางฝั่งท่อ ส่วนสารละลายนำกลับไหลทางฝั่งเปลือก ตรวจสอบความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ขาเข้าและขาออก โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer (ICP) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (Overall Mass Transfer Coefficient: K) นิยามได้จากสมการดุลมวลสาร ดังนี้ (Yang et al., 2007)

$$Q_t dC(x) = KC(x)dA \quad (2.34)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.34 จะได้

$$K = \frac{Q_t}{A} \ln \frac{C_{in}}{C_{out}} \quad (2.35)$$

โดยที่ A = พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ (m^2)

C_{in} = ความเข้มข้นของไอออนโครเมียมขาเข้า (mg/l)

C_{out} = ความเข้มข้นของไอออนโครเมียมขาออก (mg/l)

K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (cm/s)

Q_t = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

2.10 การหาค่า Separation Factor (SF)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแยกของไอออนโครเมียมสามารถหาได้จากสมการที่ 2.36 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโครเมียมเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะตัวอื่นที่ต้องการเปรียบเทียบ (Yang et al., 2007)

$$SF = \frac{K_{Cr}}{K_M} \quad (2.36)$$

โดยที่ SF = สัมประสิทธิ์การแยก

K_{Cr} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโครเมียม

K_M = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโลหะตัวอื่น

2.11 การหาค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{Cr,feed (in)} - C_{Cr,feed (out)}}{C_{Cr,feed (in)}} \times 100 \quad (2.37)$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{Cr,stripping (out)}}{C_{Cr,feed (in)}} \times 100 \quad (2.38)$$

2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว

I. Ortiz B. Galan และ A. Irabien (1996) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนโครเมียมในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่รองรับด้วยมอดูลเส้นใยกลวง โดยใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ในการทดลองใช้สองมอดูล คือ มอดูลการสกัดและมอดูลการนำกลับ ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของการสกัดในเฟสเยื่อแผ่นเหลว (k_m) จากการทดลอง เท่ากับ 2.2×10^{10} m/s

M. Majdan J. Mierzwa และ P. Sadowski (1997) ศึกษาการแยกไอออนโคบอลต์และไอออนนิกเกิลออกจากสารละลายผสมโดยใช้สารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP และสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TOPO ผลการทดลองพบว่าสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TOPO มีสมบัติการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของ TOPO ในสารสกัดผสม Aliquat 336-TOPO จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยก Co/Ni เพิ่มขึ้น ส่วนกรณีสารสกัดผสม Aliquat 336-TBP เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TBP จะทำให้สัมประสิทธิ์การแยก Co/Ni ลดลง

A.G. Gaikwad (2003) ศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออนนิตเตรียมที่สกัดด้วยสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในงานวิจัยนี้ระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ใช้สารสกัด Aliquat 336 กับ TBP ละลายในสารละลายเคโรซีน ผลการทดลองพบว่า การเคลื่อนที่ของไอออนนิตเตรียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ ammonium thiocyanate ในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดองค์ประกอบเดียวของ

TBP และ Aliquat 336 และสารสกัดผสม Aliquat 336-TBP ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนำกลับ และความเข้มข้นของไอออนนิตเตรียม พบว่าเมื่อตัวแปรที่กล่าวถึงทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient) เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของ complexing agent ได้แก่ citric acid, tartaric acid และ EDTA ซึ่งใส่ลงในเฟสสารละลายนำกลับเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า complexing agent ในเฟสสารละลายนำกลับทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของ complexing agent ประสิทธิภาพของ complexing agent เรียงตามลำดับได้ดังนี้ tartaric acid < citric acid < EDTA

R. Prakorn และ P. Ura (2003) ศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของสารละลายไอออนโลหะผสมแลนทานัมและนีโอดีเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้ ได้แก่ HTTA และ TOA ศึกษาตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อน ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ความเข้มข้นของสารสกัด TOA และจำนวนมอดูลเส้นใยกลวง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด เปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้น และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมที่สุด เท่ากับ 2.5 สารสกัดผสมระหว่าง HTTA และ TOA มีสมบัติการสกัดแบบเสริมฤทธิ์สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้สารสกัดเพียงชนิดเดียว

M. Rozenblat M. R. Rosocka และ J. Szymanowski (2004) ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะจากน้ำเสียของกระบวนการกัดกรด โดยใช้สารสกัด TBP พบว่า สารสกัด TBP สามารถสกัดได้ทั้ง Fe(II), Fe(III) และ Zn(II) และเมื่อทดลองนำกลับไอออนโลหะพบว่าสามารถนำกลับ Fe(III) และ Zn(II) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถคัดเลือกตัวใดตัวหนึ่งออกมาได้

R. Prakorn S. Eakkapit P. Weerawat H. Milan และ P. Ura (2005) ศึกษาค่าการซึมผ่าน (Permeability) ของการสกัดไอออนโคบอลต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้ ได้แก่ D2EHPA ในงานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางของสารละลายไอออนด้านสารละลายป้อน ฟิล์มบางของสารละลายอินทรีย์ และฟิล์มบางของสารละลายไอออนด้านนำกลับ ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และอัตราการไหลของสารละลายนำกลับ ซึ่งได้นำผลการซึมผ่านที่วัดจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการคำนวณ โมเดลช่วยอธิบายอัตราการควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออนที่แพร่ผ่านชั้นฟิล์มไอออนของสารละลายป้อนและสารละลาย

นำกลับ โดยที่ไม่คิดค่าความต้านทานของเฟสสารละลายอินทรีย์ และพบว่าโมเดลนี้สามารถใช้ได้ เป็นอย่างดีในการคำนวณหาค่าการซึมผ่านเมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ได้

K. Sarangi P.K Parhi E. Padhan A.K. Palai K.C. Nathsarma และ K.H. Park (2006) งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัด Fe(II), Cu(II) และ Zn(II) จากสารละลายผสมซัลเฟตและ คลอไรด์ด้วยวิธีตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด 3 ชนิด ได้แก่ TBP, LIX 84I และ Cyanex 923 จาก ผลที่ได้พบว่าสารสกัดแต่ละชนิดสามารถสกัดไอออนโลหะได้ดีเฉพาะตัว เช่น สารสกัด TBP สามารถสกัด Fe(II) ได้ดี, LIX 84I สามารถสกัด Cu(II) ได้ดี และ Cyanex 923 สามารถสกัด Zn(II) ได้สูงที่สุด

2.12.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดไอออนโครเมียม

M.A. Chaudry S. Ahmad และ M.T. Malik (1997) ศึกษาการสกัดไอออน โครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมการฟอกหนังในประเทศปากีสถานโดยใช้เทคนิค เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ พบว่าระดับความเข้มข้นของไอออนโครเมียมในสารละลายป้อน อยู่ที่ 2,500 – 8,000 ppm ใช้สารสกัด TOA ผลที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็น กรด-เบสของสารละลายป้อนจะทำให้สามารถสกัดไอออนโครเมียมได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ของสารละลายป้อนจะทำให้พลังค์ในการสกัดเพิ่มสูงขึ้นและสามารถหาค่า energy of diffusion ได้จากสมการของ Arrhenius ได้ค่าเท่ากับ 30.14 kJ/mol

W.S. Winston Ho และ Tarun K. Poddar (2000) สกัดและนำกลับไอออน โครเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้เป็นสารสกัดชนิดเบส พบว่าถ้า ในสารละลายป้อนมีไอออนซัลเฟตปะปนอยู่ ไอออนซัลเฟตจะสามารถแย่งทำปฏิกิริยาการสกัด กับไอออนโครเมียมได้ และจะมีผลมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนโครเมียมต่ำ ประมาณ 100 ppm อย่างไรก็ตามจากการวิจัยสามารถที่จะสกัดไอออนโครเมียมจนถึงระดับที่สามารถปล่อยออก สู่อสิ่งแวดล้อมได้คือน้อยกว่า 0.05 ppm สามารถนำกลับไอออนโครเมียมได้ 20% และสามารถที่จะ นำกลับไปใช้ใหม่ได้

P.J. Harrington และ G.W. Stevens (2001) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้อธิบายการถ่ายเทมวลของสารในสภาวะคงตัว (Steady-state Condition) จากการสกัด ไอออนโครเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้ คือ radiamine 6366 (RA6366) ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้จาก

งานวิจัยที่แล้วมากับผลการทดลอง ปรากฏว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่กระจายตามแนวรัศมีสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ตัวโมเดลได้ยืนยันถึงฟลักซ์การถ่ายเทมวล (Mass Flux) จะถูกควบคุมด้วยการแพร่ของสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Organic Complex Diffusion) สรุปได้ว่าเมื่อต้องการเพิ่มฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจะทำได้โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของสารอินทรีย์ ซึ่งการใช้เส้นใยกลวงที่มีแบบ hydrophilic จะช่วยให้อัตราการถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้

R. Prakorn, N. Kwanta และ P. Ura (2004) ศึกษาการแยกไอออนโลหะแต่ละตัวออกจากสารละลายกรดซัลฟิวริกซึ่งมีไอออนของโลหะ 3 ชนิด ปนกันอยู่ ได้แก่ Cu(II), Cr(VI) และ Zn(II) ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูลต่อกันแบบอนุกรม และทำการทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One-through Mode) ทั้งสารสกัด LIX84-I และ Aliquat 336 ซึ่งใช้เป็นสีกัดโลหะทองแดงและโครเมียมในมอดูลที่หนึ่งและมอดูลที่สองตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ซึ่งค่า pH เท่ากับ 2.5 จะให้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุด เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนทองแดงและไอออนโครเมียมสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ LIX84-I และ Aliquat 336 และเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองเท่ากับ 0.5 โมลาร์ พบว่าเปอร์เซ็นต์ในการสกัดทองแดงสูงสุดเท่ากับ 13% และโครเมียมเท่ากับ 92%

S.M. Corvalan I.Ortiz และ A.M. Eliceche (2004) ออกแบบกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับไอออนโครเมียม ซึ่งในงานนี้ได้ทดลองในรูปแบบของ nondispersive solvent extraction (NDSX) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และสารสกัดที่ใช้ คือ Aliquat 336 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบไหลไปทางเดียวกันและแบบไหลสวนทางกัน จากผลการทดลองเมื่อทำการคำนวณด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณของไอออนโครเมียมที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดลองแบบการไหลไปทางเดียวกันและต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นเหลวถึง 87% มากกว่าพื้นที่ของเยื่อแผ่นเหลวที่ทำการทดลองแบบไหลสวนทางกัน

P. Venkateswaran และ K. Palanivelu (2004) ศึกษาการนำกลับไอออนโครเมียมจากน้ำเสียด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ โดยใช้ TBP เป็นสารสกัด ในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน ความเข้มข้นในสารละลายนำกลับ ความเร็วในการกวน และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโครเมียม ตัวรองรับที่นำมาใช้จะ

ต่างจากงานวิจัยอื่นๆ เนื่องจากทำมาจาก polytetrafluoroethylene (PTFE) ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 1 จะให้ค่าการซึมผ่าน (Permeation) สูงที่สุด และความเข้มข้นของไอออนโครเมียมในสารละลายที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 9.6×10^{-4} M อัตราเร็วในการกวนสารละลายที่ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงที่สุดเท่ากับ 500 rpm เมื่อทำการทดลองภายใต้ภาวะการทดลองที่ดีที่สุดข้างต้นพบว่าผลของการนำกลับไอออนโครเมียมจากน้ำเสียเป็นที่น่าพอใจ โดยมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลเท่ากับ 1.4×10^{-3} mol/m²/s

C. A. Kozłowski และ W. Walkowiak (2005) ศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออนโครเมียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวต่างชนิดกัน ได้แก่ PIM, SLM และ BLM ตัวแปรที่ศึกษา เช่น ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ฟลักซ์ของการถ่ายเทมวล และได้ใช้สมการของ Danesi's Thermodynamic Model ในการอธิบายการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

D.W. Choi และ Y.H. Kim (2005) สกัด Cr(VI) จากสารละลายไอออนโลหะโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้ ได้แก่ D2EHPA, TBP, Lix79 และ TOA และยังใช้สารสกัดผสมระหว่าง TBP กับ D2EHPA, TBP กับ Lix79 และ TBP กับ TOA พบว่าสารสกัดผสมทั้ง 3 กลุ่ม สามารถสกัด Cr(VI) ได้มากกว่าเมื่อใช้สารสกัดเพียงตัวเดียว และเมื่อทำการทดลองในระบบแบบกะ (Batch) เปรียบเทียบกับแบบต่อเนื่อง (Continuous) พบว่าร้อยละการสกัด Cr(VI) คงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ ลำดับและตัวแปรในการทดลองต่างๆ ในการสกัดและนำกลับ Cr(VI) โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้น้ำเสียจากกระบวนการกักกรดในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นสารละลายป้อน

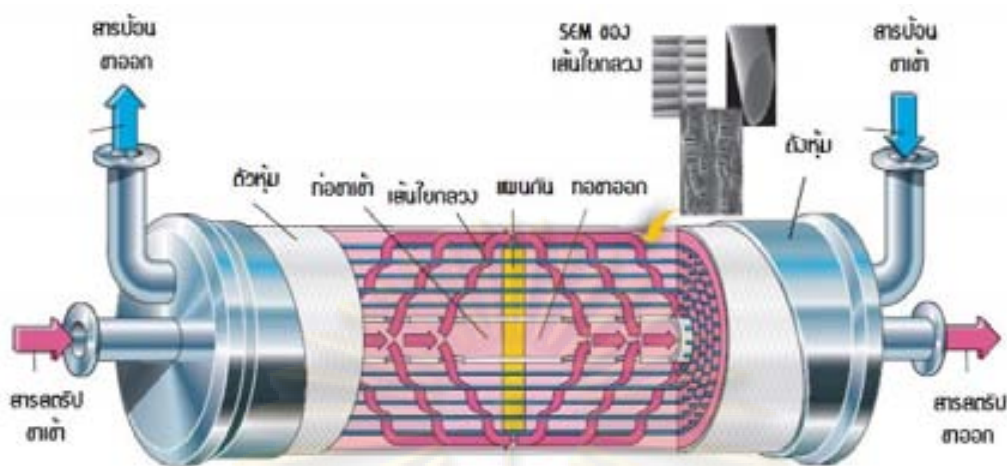
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat.#5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วยเครื่องสูบลม 2 ชุดที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที ชุดควบคุมความเร็ว 2 ชุด มาตรวัดอัตราการไหล 2 ชุด และมาตรวัดความดัน 2 ชุด รายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูลของเส้นใยกลวงดังรูปที่ 3.3 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 โมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง (Hoechst, 1995)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	มิติ
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30 %
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² /m ³)
ขนาดของโมดูล (เส้นผ่านศูนย์กลาง × ยาว)	6.3x20.3 cm (2.5x8inch)
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 kg/cm ²
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติงาน	1-60 °C

2. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส รุ่น HI 8417 Microprocessor Bench pH/C Meter ของบริษัท Hanna Instrument
3. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer (ICP) รุ่น Model IL551 AA/AE Spectrophotometer ของบริษัท Instrumentation Laboratory Inc.
4. นาฬิกาจับเวลา

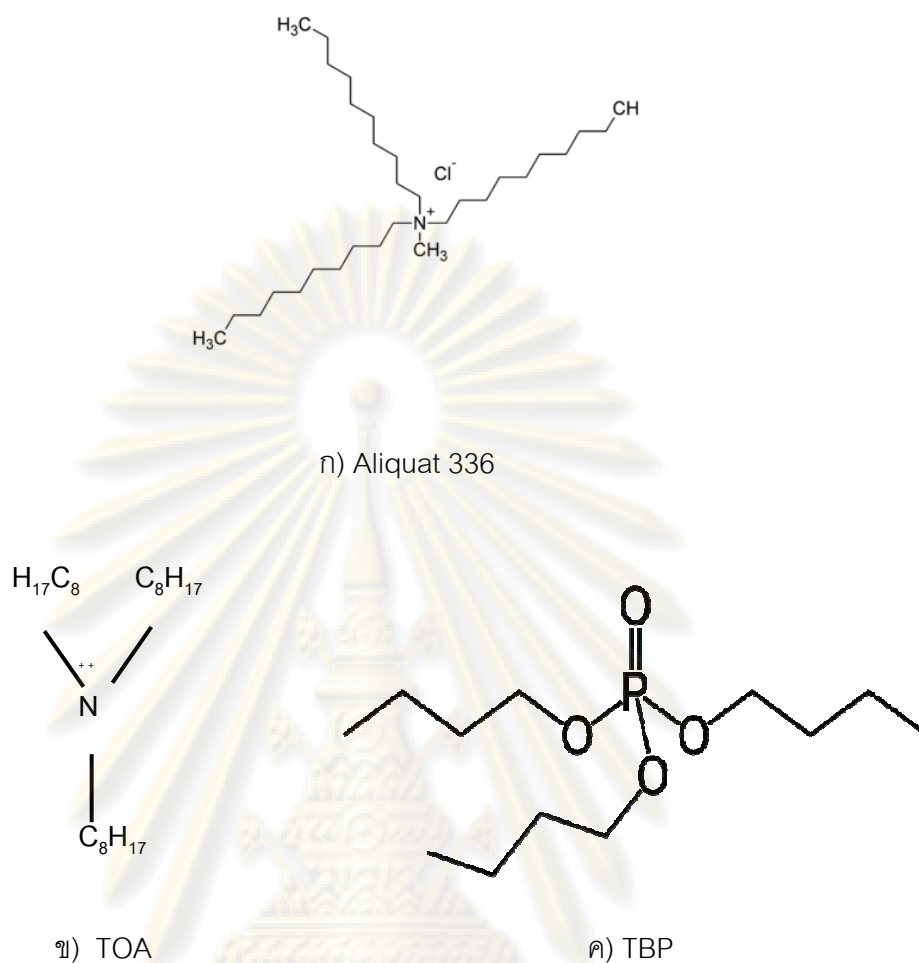
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	น้ำหนัก โมเลกุล
ไอออนโลหะ	ไอออนโครเมียม (Cr^{6+})	HCrO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	-
สารสกัด	สารสกัดเมทิลไตรออกทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Methyl trioctylammonium chloride, Aliquat 336)	$\text{C}_{25}\text{H}_{54}\text{ClN}$	404.16
	ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butyl phosphate, TBP)	$(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_3\text{PO}$	266.32
	ไตรออกทิลเอมีน (Tri-octyl amine)	$\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{N}$	353.68
ตัวทำละลายอินทรีย์	เคโรซีน	-	-
สารละลายนำกลับ	โซเดียมคลอไรด์	NaCl	58.5
	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

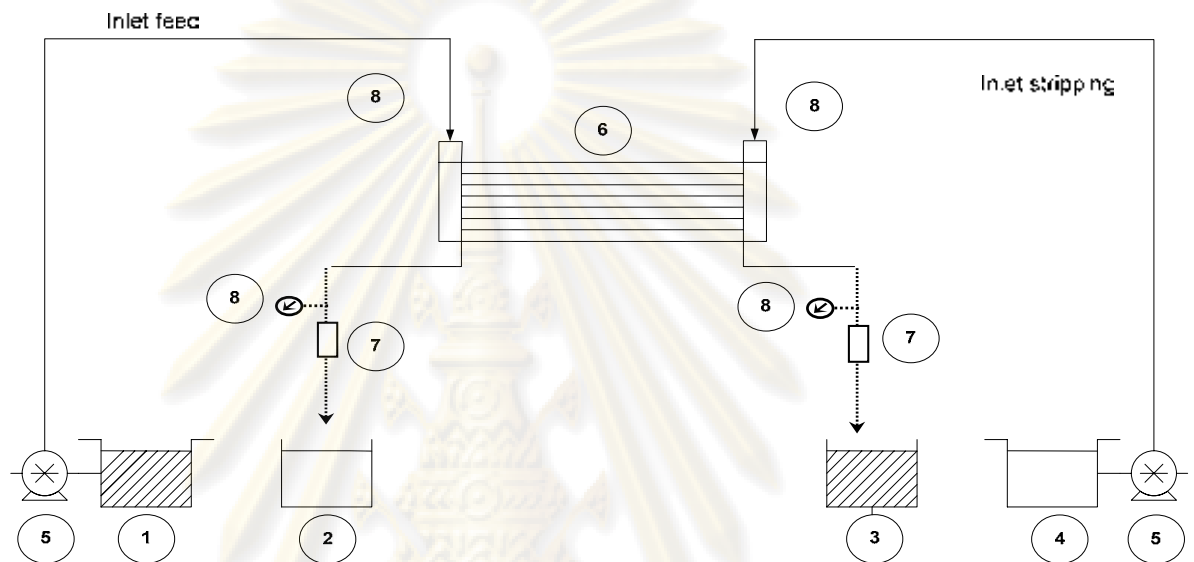


รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างของสารสกัด ก) Aliquat 336 ข) TOA ค) TBP

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 วิธีการทดลอง

การศึกษาการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ดังรูปที่ 3.4 การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบสวนทางกันที่อัตราการไหลเท่ากัน 100 มิลลิลิตรต่อนาที ทดสอบตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI)



อุปกรณ์ในรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย

หมายเลข 1 ถังของสารละลายป้อนขาเข้า

หมายเลข 5 ปั๊ม

หมายเลข 2 ถังของสารละลายนำกลับขาออก

หมายเลข 6 มอดูลเส้นใยกลวง

หมายเลข 3 ถังของสารละลายป้อนขาออก

หมายเลข 7 มิเตอร์วัดอัตราการไหล

หมายเลข 4 ถังของสารละลายนำกลับขาเข้า

หมายเลข 8 มิเตอร์วัดความดัน

รูปที่ 3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลแบบสวนทางกัน (Counter Current)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 การศึกษาผลของชนิดของสารสกัด

- (1) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะด้วยเครื่อง ICP
- (2) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 1 ลิตร ที่ใช้ในมอดูลเส้นใยกลวง โดยละลายสารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 5% (v/v) ในตัวทำละลายเคโรซีน ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าทางด้านท่อ (Tube Side) และด้านเปลือก (Shell Side) ของมอดูลเส้นใยกลวง หยุดป้อนเมื่อสังเกตว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่ (ประมาณ 30-40 นาที) แสดงว่าสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปตรึงเต็มในรูพรุนจุลภาคของมอดูลเส้นใยกลวง
- (3) เตรียมสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 ปริมาตร 3 ลิตร และเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโลหะ
- (4) ป้อนสารละลายป้อนคือน้ำเสียจากกระบวนการกักกรดในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ลิตร และสารละลายนำกลับปริมาณที่เท่ากันเข้ามอดูลเส้นใยกลวงแบบสวนทางกัน โดยให้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละรอบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ไอออนโลหะ
- (5) นำสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดในข้อ 4 วนกลับเป็นสารละลายป้อนใหม่เป็นจำนวน 5 รอบ
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1) ถึง 5) โดยเปลี่ยนชนิดของสารสกัดเป็น TOA, TBP และสารสกัดผสมของ Aliquat 336 กับ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ กรณีที่ใช้สารสกัด TOA จะใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่สามารถนำกลับไอออนโครเมียมได้ (ประกร, 2549)
- (7) เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนโครเมียมด้วยเครื่อง ICP
- (8) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม แฟกเตอร์การแยก (S.F.) เปรอ์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียม

3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1 ที่อุณหภูมิห้อง เลือกสารสกัดที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.1 ความเข้มข้นของสารสกัดที่ศึกษา 1, 2, 3, 4 และ 5 % (v/v)

3.3.3 การศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ

ชนิดของสารละลายนำกลับที่ศึกษา คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1 ที่อุณหภูมิห้อง เลือกสารสกัดในหัวข้อ 3.3.1 และใช้ความเข้มข้นของสารสกัดที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2

3.3.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1 ที่อุณหภูมิห้อง เลือกสารสกัดในหัวข้อ 3.3.1 และใช้ความเข้มข้นของสารสกัดที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2 และเลือกสารละลายนำกลับที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.3 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ศึกษาคือ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1 โมลต่อลิตร

3.3.5 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ

ทำการทดลองโดยใช้ตัวแปรต่างๆ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.4 ที่อุณหภูมิห้อง ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่ 8, 9, 10, 11 และ 12

3.3.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิของการสกัด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.1 เลือกสารสกัดในหัวข้อ 3.3.1 และใช้ความเข้มข้นของสารสกัดที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2 และเลือกสารละลายนำกลับที่ให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนโครเมียมสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.3 การควบคุมอุณหภูมิของระบบทำโดยนำมอดูลเส้นใยกลวงจุ่มลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) และปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิของระบบคงที่ อุณหภูมิของการสกัดที่ศึกษาคือ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์

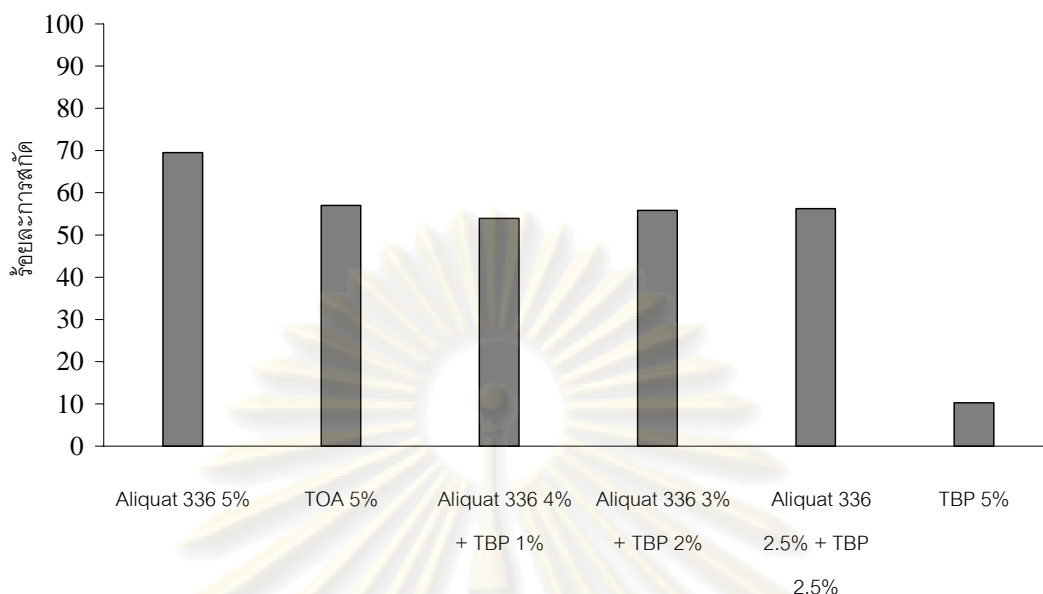
องค์ประกอบของน้ำเสียออกของกระบวนการกักกรดจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งนำมาเป็นสารละลายป้อนในงานวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียที่ใช้เป็นสารละลายป้อน

สมบัติของน้ำเสียที่ใช้	
สี	เหลือง
pH	2-3
องค์ประกอบ (mg/l)	
Fe(II)	186.1
Cr(VI)	200-500
Al(III)	0.88
Cu(II)	2.53
Zn(II)	1.53
Ni(II)	23.55
SO ₄ ²⁻	851

4.1 ผลของชนิดของสารสกัด

การทดลองในส่วนนี้การศึกษาที่อุณหภูมิห้อง ใช้สารสกัดทั้งที่เป็นชนิดเดียวและเป็นสารละลายผสม ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับปริมาตรเท่ากัน 3 ลิตร ไหลสวนทางกันด้วยอัตราการไหลเท่ากัน 100 มิลลิลิตรต่ออนาที สารละลายป้อนไหลวนเข้ามอดูลเส้นใยกลวงทางด้านท่อและสารละลายนำกลับไหลวนเข้าทางด้านเปลือกจำนวน 5 รอบ เท่ากัน ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336, TOA, TBP 5% (v/v), Aliquat 336 4% (v/v) + TBP 1% (v/v), Aliquat 336 3% (v/v) + TBP 2% (v/v) และ Aliquat 336 2.5% (v/v) + TBP 2.5% (v/v) สารละลายนำกลับใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ แต่กรณีของสารสกัด TOA จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่สามารถนำกลับไอออนโครเมียมได้ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับชนิดของสารสกัด: สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลวน 5 รอบ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง [สารละลายนำกลับ] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายนำกลับ 7

จากกราฟในรูปที่ 4.1 พบว่า Aliquat 336 สามารถสกัด Cr(VI) ได้มากที่สุดประมาณ 70% ส่วน TBP สกัด Cr(VI) ได้น้อยที่สุด เมื่อใช้สารสกัดผสม Aliquat 336-TBP Aliquat 336 จะเป็นสารสกัดหลัก ส่วน TBP เป็นคอนเนอร์เสริมการสกัด พบว่าร้อยละการสกัด Cr(VI) ด้วยสารสกัดผสมต่ำกว่าการใช้ Aliquat 336 ชนิดเดียว แสดงว่าสารสกัดผสม Aliquat 336-TBP ไม่สามารถสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient: S.C.) ที่คำนวณต่ำกว่าศูนย์ หมายความว่าสารสกัดที่นำมาผสมกันทำให้ความสามารถในการสกัดค่อยลงเป็นการสกัดแบบ antagonistic extraction มีผลงานวิจัยของ P. Venkateswaran et al. (2005) รายงานว่า TBP สามารถสกัดไอออนโคโรเนียมได้ดี อย่างไรก็ตามในงานนี้สามารถอธิบายได้ว่า TBP ซึ่งเป็นสารสกัดที่เป็นกลาง สามารถสกัดได้ทั้งกลุ่มไอออนที่มีประจุบวกและลบ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้สกัด Cr(VI) ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำเสียของกระบวนการผลิตจริงและมีไอออนหลายชนิด ไม่ใช่แค่ไอออนสังเคราะห์ สารสกัด TBP จึงเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนชนิดอื่นแทนที่จะทำปฏิกิริยากับ Cr(VI) เพียงตัวเดียว โดยเฉพาะกับ Fe(II) ซึ่งมีปริมาณมาก (ตารางที่ 4.1) ดังนั้นเพื่อทดสอบสมมติฐานนี้ผู้วิจัยจึงใช้สารสกัดผสม Aliquat 336-TBP โดยให้ปริมาณ Aliquat 336 คงที่ ผลการทดสอบความสามารถในการสกัด Cr(VI) และ Fe(II) ของ TBP ดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อใช้ TBP เพียงชนิดเดียวสามารถสกัด Fe(II) ได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Cr(VI) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย

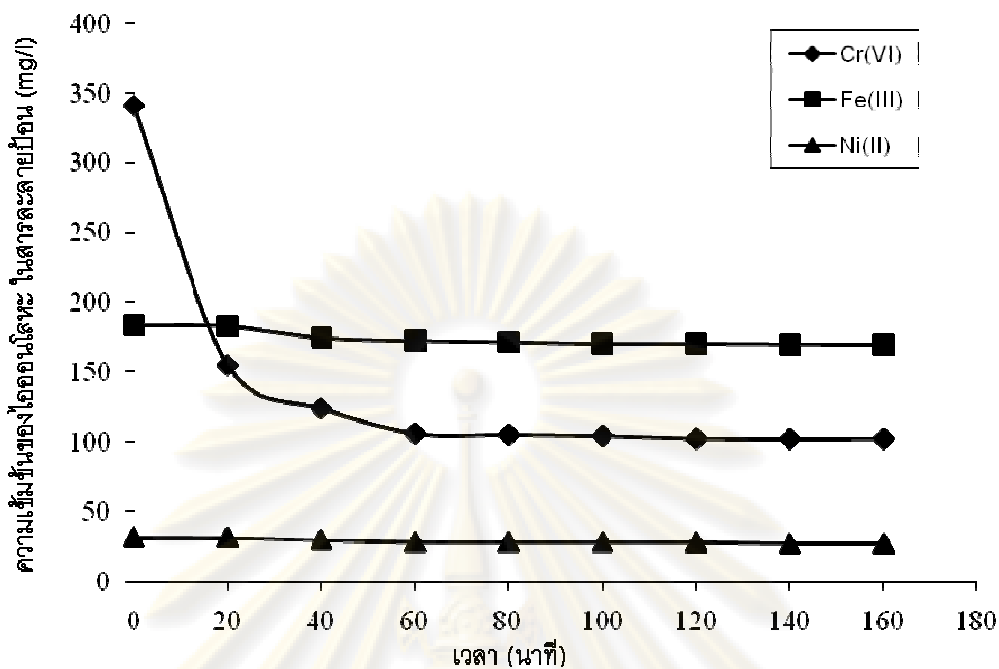
ของ Rozenblat et al. (2004) ที่รายงานว่า TBP สามารถสกัด Fe(II) ได้ นอกจากนี้เมื่อคำนวณแฟกเตอร์การแยก (Separation Factor: S.F.) ของการสกัดไอออนโครเมียมต่อไอออนเหล็กของ TBP พบว่ามีค่าเพียง 1.24 (กรณีใช้ Aliquat 336 S.F. = 14.53) แสดงให้เห็นว่า TBP ไม่สามารถคัดเลือกแยกไอออนโครเมียมออกจากไอออนเหล็กได้ ตรงข้ามกับ Aliquat 336 ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนโครเมียมต่อไอออนเหล็กสูงกว่า โดยสรุปเมื่อเพิ่มปริมาณ TBP ในสารสกัดผสมมากขึ้น ร้อยละของการสกัด Fe(II) เพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของการสกัดไอออนโครเมียมลดลง จึงยืนยันว่าสารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP ไม่สามารถสกัดไอออนโครเมียมแบบเลือกสกัดได้

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการสกัด Cr(VI) และ Fe(II) จากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสารสกัด Aliquat 336 และสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นกลวง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลวน 1 รอบ

สารสกัด	ร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ	
	Cr(VI)	Fe(II)
Aliquat 336 4%	36.12	0
Aliquat 336 4% + TBP 1%	36.60	4.09
Aliquat 336 4% + TBP 2%	35.64	4.62
Aliquat 336 4% + TBP 2.5%	34.09	6.60
TBP 10%	10.24	8.35

การใช้ Aliquat 336 เพียงชนิดเดียวสามารถคัดเลือกสกัด Cr(VI) ออกจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นกลวงได้ ดังรูปที่ 4.2 ข้อมูลเปรียบเทียบการสกัด Cr(VI) จากสารละลายป้อนต่างชนิดกันด้วยสารสกัด Aliquat 336 5%(v/v) แสดงดังตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนกับเวลาเมื่อใช้สารสกัด Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

จากรูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงความเข้มข้นของ Fe(II) และ Ni(II) ในสารละลายป้อนค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ความเข้มข้นของ Cr(VI) ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที คำนวณร้อยละการสกัดได้ประมาณ 70% แสดงว่า Aliquat 336 สามารถคัดเลือกและสกัด Cr(VI) ออกจาก Fe(II) และ Ni(II) ได้อย่างชัดเจน อธิบายตามทฤษฎีได้ว่า Aliquat 336 สามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะที่จับตัวเป็นกลุ่มไอออนประจุลบ เช่น HCrO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ได้ดี ส่วน Fe(II) และ Ni(II) เป็นไอออนประจุบวกจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับ Aliquat 336 ได้ คำนวณแฟกเตอร์การแยก Cr(VI)/Fe(II) ของ Aliquat 336 เท่ากับ 14.53 และ Cr(VI)/Ni(II) เท่ากับ 7.07

ตารางที่ 4.3 ผลการสกัด Cr(VI) จากสารละลายป้อนต่างชนิดด้วย Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] = 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)					ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก (ppm)					ร้อยละการสกัด Cr(VI)
	Cr(VI)	Fe(II)	Ni(II)	Zn(II)	Cu(II)	Cr(VI)	Fe(II)	Ni(II)	Zn(II)	Cu(II)	
I	107.1	0	0	0	0	4.1	0	0	0	0	96
II	100.0	0	0	100.0	100.0	8.3	0	0	100.0	98.5	92
III	342.2	183.7	31.8	0	0	102.2	169.6	27.0	0	0	70
IV	163.2	79.19	-	-	-	56.0	75.26	-	-	-	65.7

หมายเหตุ สารละลายป้อนตัวอย่างที่ I และ II คือ น้ำสังเคราะห์ ตัวอย่างที่ I มี Cr (VI) ตัวอย่างที่ II มี Cr (VI), Zn(II) และ Cu(II)

สารละลายป้อนตัวอย่างที่ III และ IV คือ น้ำเสียขาออกของกระบวนการกักกรดจากอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ตัวอย่างที่ IV เจือจางน้ำเสียขาออกจากการบวนการให้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของ Cr (VI) ในตัวอย่างที่ I และ II

จากตารางที่ 4.3 พบว่าร้อยละการสกัด Cr(VI) ด้วย Aliquat 336 จากน้ำเสียของโรงงานต่ำกว่าเมื่อใช้สารละลายป้อนเป็นน้ำสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ho et al. (2001) รายงานว่าไอออนอื่นที่มีอยู่ในน้ำเสียกระบวนการกักกรดของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้ร้อยละของการสกัด Cr(VI) ด้วยสารสกัดประเภท secondary amine ลดลง นอกจากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 เพื่อแสดงผลกระทบของไอออนอื่นในน้ำเสียจากโรงงานต่อการสกัด Cr(VI) ผู้วิจัยจึงศึกษาผลของไอออนซัลเฟตดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า Aliquat 336 สามารถสกัด SO_4^{2-} ที่มีในน้ำเสียจากกระบวนการกักกรดของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

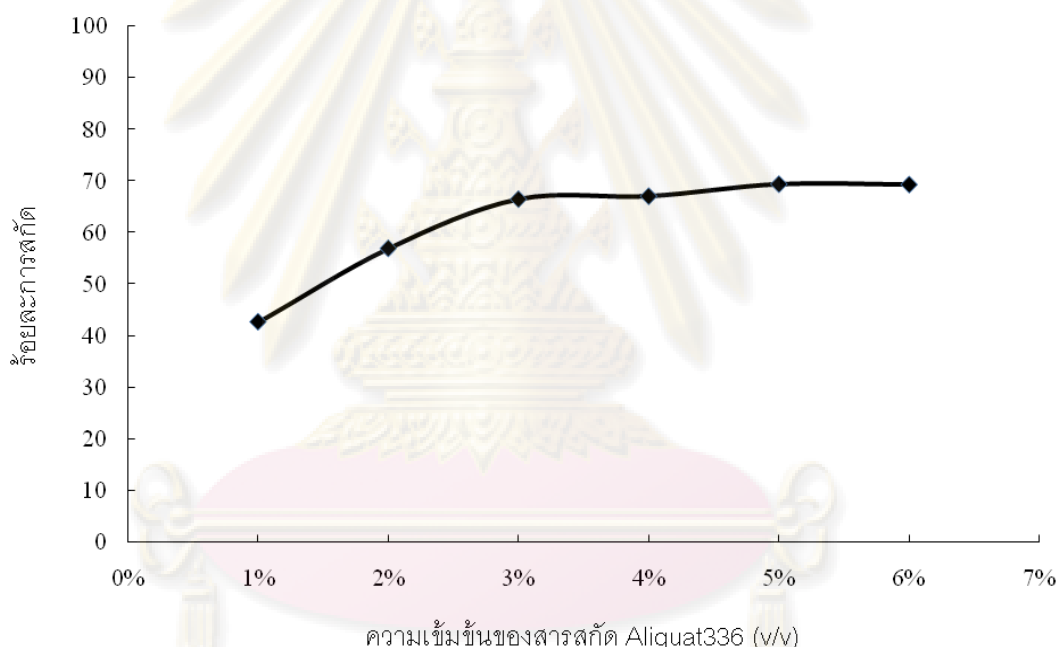
ตารางที่ 4.4 การสกัดไอออนซัลเฟตด้วย Aliquat 336 5%(v/v) ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] = 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

ความเข้มข้นของไอออน SO_4^{2-} ในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของไอออน SO_4^{2-} ในสารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของไอออน SO_4^{2-} ในสารละลายป้อนหลังการสกัด (ppm)
851	802.6	48.4

ดังนั้นในการกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตที่มีไอออนโลหะหลายชนิดของแต่ละอุตสาหกรรม การเลือกชนิดของสารสกัดได้อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อร้อยละของการสกัดไอออนที่ได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบและปริมาณของไอออนต่างๆ ที่มีในน้ำเสียนั้น และสมบัติทางเคมีของสารสกัดแต่ละชนิด

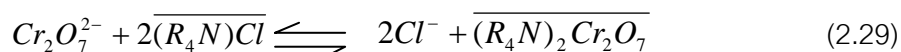
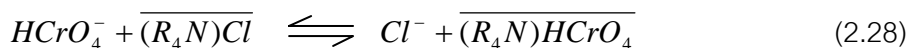
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด

เนื่องจากพบว่า Aliquat 336 เป็นสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดในการสกัด Cr(VI) จากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาความเข้มข้นของ Aliquat 336 ระหว่าง 1-6 % (v/v) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.4

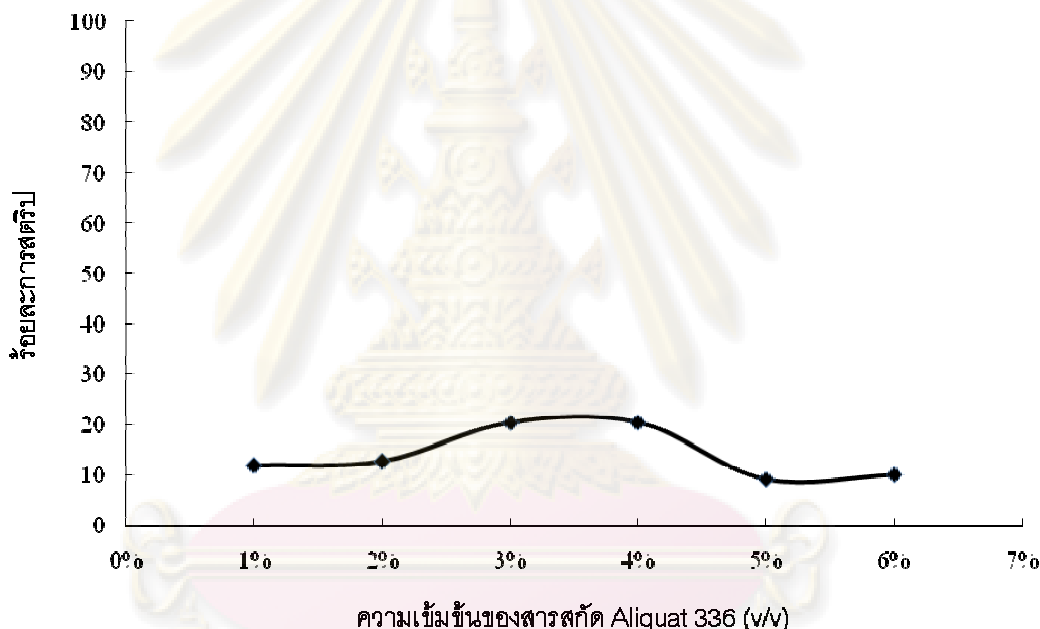


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Aliquat 336 ร้อยละของการสกัด Cr(VI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงที่สุดเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 5 % (v/v) โดยสามารถสกัด Cr(VI) ได้ 70%



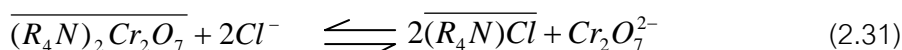
ทั้งนี้จากสมการที่ 2.28 – 2.29 เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เพิ่มขึ้น อีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของ $\overline{(R_4N)Cl}$ จากหลักการสมดุลของเลอชาเตอริเยร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้ามากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสกัด $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของ Aliquat 336 สูงเกิน 5% (v/v) ร้อยละของการสกัดจะคงที่เนื่องจากความหนืดของสารสกัดที่เพิ่มขึ้นขัดขวางการถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโครเมียม



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารสกัด

Aliquat 336 ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

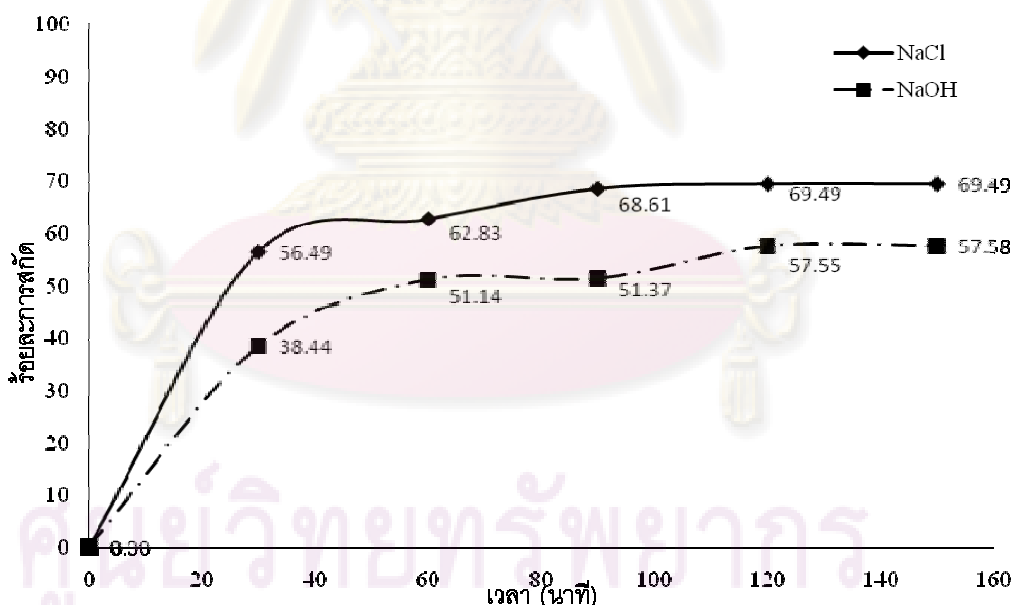
ในกรณีของการนำกลับจากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Aliquat 336 อยู่ในช่วง 1-3 % (v/v) ร้อยละการนำกลับ Cr(VI) เพิ่มขึ้น



การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของ $(R_4N)HCrO_4$ $(R_4N)_2Cr_2O_7$ ในเฟสของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้สมดุลของสมการที่ 2.30 – 2.31 เลื่อนไปข้างหน้า จึงเกิดปฏิกิริยานำกลับไอออนโครเมียมได้มากขึ้น แต่หลังจากความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่า 4 % (v/v) ร้อยละการนำกลับจะลดลงเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 สูงเกินไปจะทำให้การถ่ายเทมวลของ Cr(VI) ในรูปของ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ มายังอีกด้านที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับเกิดขึ้นได้ยากเพราะความหนืดของสารสกัดที่เพิ่มขึ้นตามหลัก molecular kinetics interpretation ของ Nernst (Prakorn, 2004)

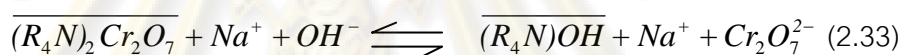
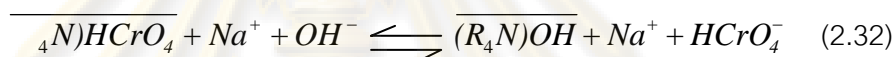
4.3 ผลของศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับ

การทดลองนี้เปรียบเทียบร้อยละของการสกัด Cr(VI) เมื่อใช้สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 M สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน ปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 3 ลิตร ใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) ปริมาตร 1 ลิตร แสดงผลในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับเวลาของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 M ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

จากรูปที่ 4.5 ผลของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ต่อค่าร้อยละของการสกัด Cr(VI) สูงกว่าสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ กล่าวได้ว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายนำกลับจะสามารถสกัดไอออนโครเมียมได้ดีกว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะ $(R_4N)OH$ ที่เกิดขึ้นในเฟสเยื่อแผ่นเหลวจากปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถที่จะกลับไปทำปฏิกิริยากับ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ ในสารละลายป้อนได้อีก (ดังสมการที่ 2.32 - 2.33) ซึ่งแตกต่างจากเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับจะได้ $(R_4N)Cl$ กลับมาในเฟสของเยื่อแผ่นเหลวอีก และสามารถแพร่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว เพื่อทำปฏิกิริยาการสกัดได้อีก (ดังสมการที่ 2.30 - 2.31) นอกจากนี้ $(R_4N)OH$ ที่เกิดขึ้นจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปอยู่ในเฟสเยื่อแผ่นเหลวทำให้เยื่อแผ่นเหลวเสื่อมสภาพเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายนำกลับ

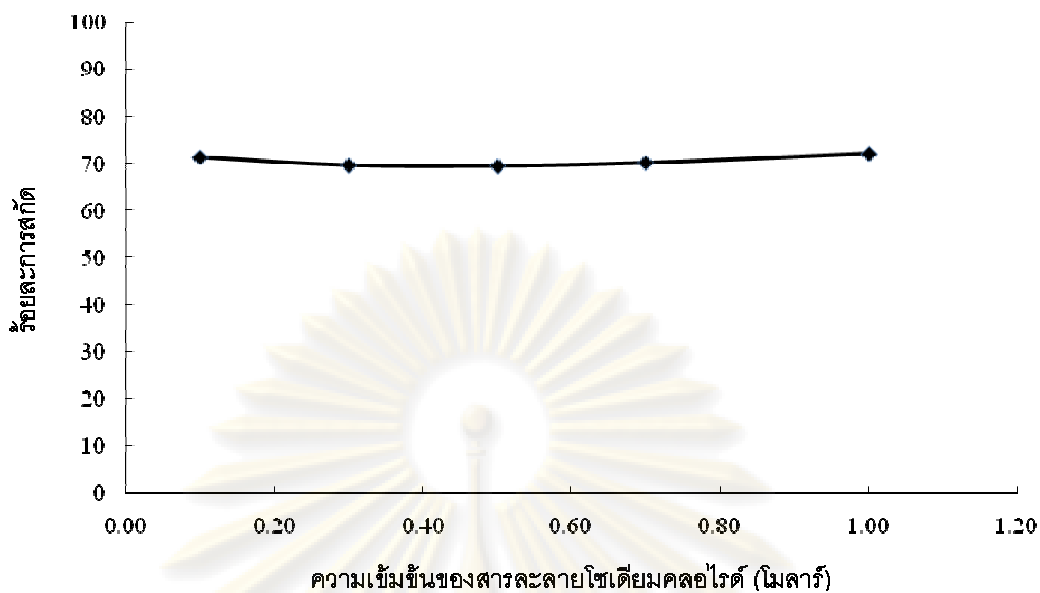


4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

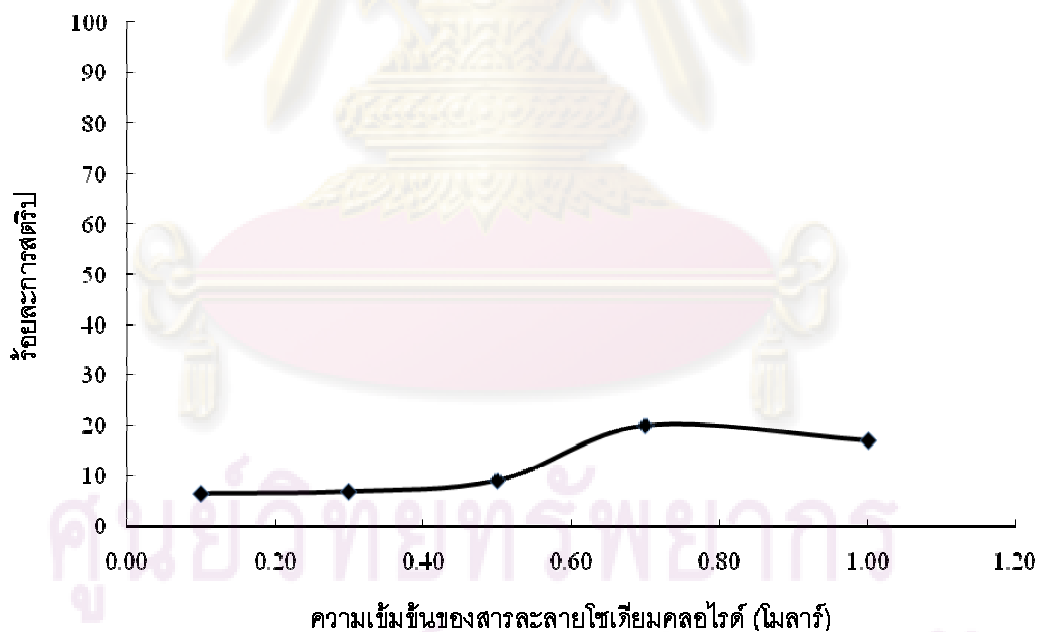
เลือกสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายนำกลับเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับไอออนโครเมียม ความเข้มข้นที่ใช้เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1.0 โมลต่อลิตร ดังรูปที่ 4.6 – 4.7

จากรูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลน้อยต่อ ร้อยละของการสกัด Cr(VI) ค่าร้อยละของการสกัดที่ได้ค่อนข้างคงที่ประมาณ 70% เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับไม่เกี่ยวกับด้านสารละลายป้อน ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายนำกลับจึงมีผลเฉพาะปฏิกิริยาด้านการนำกลับเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

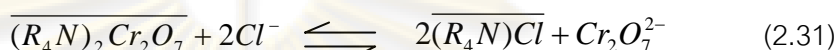
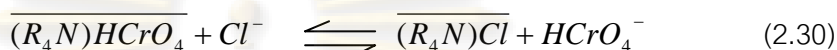


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด Cr(VI) กับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมตที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7



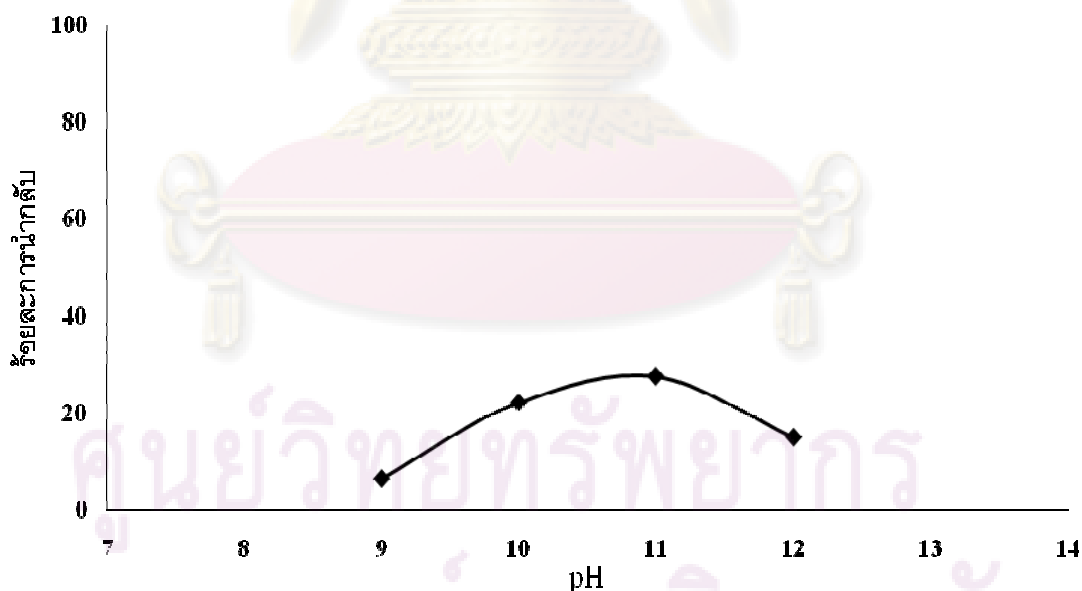
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโพแทสเซียมไดโครเมต ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5 % (v/v) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 5 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

จากกราฟรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ร้อยละของการนำกลับ Cr(VI) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อธิบายได้จากสมการที่ 2.30 – 2.31 ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของไอออน Cl^- จะเพิ่มขึ้น ทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปข้างหน้าตามหลักการของเลอชาเตอลิเยร์ ดังนั้นนอกจากจะสามารถนำกลับไอออนโครเมียมได้แล้ว ยังทำให้สารสกัดกลับมาอยู่ในรูป $(R_4N)Cl$ และสามารถแพร่กลับไปเกิดปฏิกิริยาการสกัดได้อีก



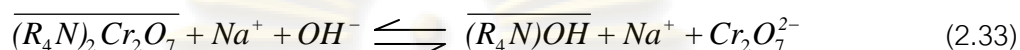
4.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ

ในการทดลองนี้ศึกษาค่าความเป็นกรด เบส ของสารละลายนำกลับในช่วง pH 9-12 ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงผลในรูปที่ 4.8



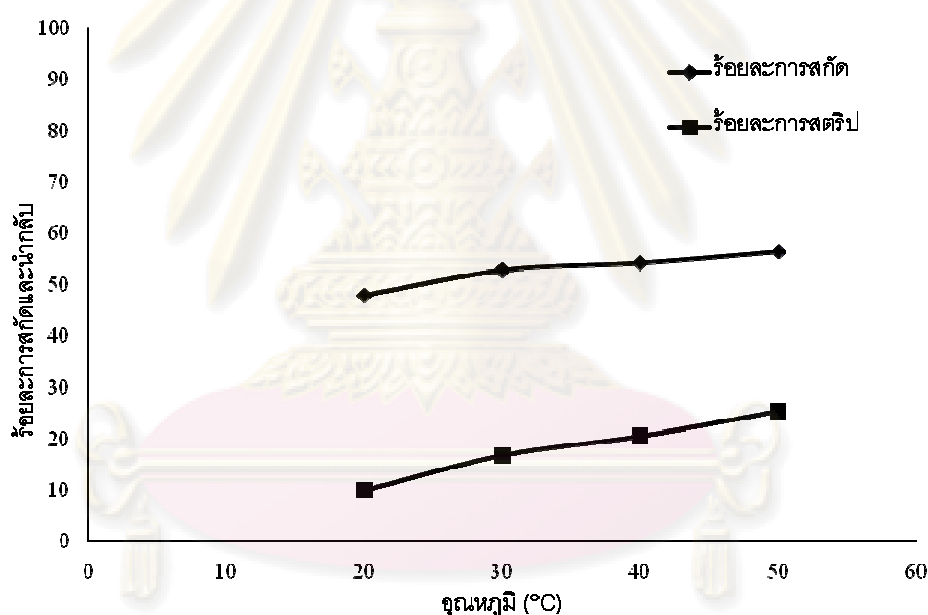
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับ Cr(VI) กับ pH ของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิห้อง [Aliquat 336] 5% (v/v) [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1 รอบ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 พบว่าร้อยละของการนำกลับ Cr(VI) มีค่าสูงสุดประมาณ 30% ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 11 การปรับค่า pH ในช่วง 9-12 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเท่ากับเป็นการเพิ่ม OH⁻ เข้าไปในระบบ ทำให้ปฏิกิริยาการนำกลับเลื่อนไปข้างหน้าไปมากขึ้น (สมการที่ 2.33) อย่างไรก็ตามร้อยละของการนำกลับ Cr(VI) จะลดลงเมื่อค่า pH มากกว่า 11 เพราะถ้ามี OH⁻ มากเกินไปจะทำให้ปริมาณของ $\overline{(R_4N)OH}$ มากขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้ไม่สามารถย้อนกลับไปเกิดปฏิกิริยาการสกัด Cr(VI) ได้อีก



4.6 ผลของอุณหภูมิของการสกัด

ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) กับอุณหภูมิ [Aliquat 336] 5% (v/v) [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

เมื่ออุณหภูมิของการสกัดเพิ่มขึ้นตามทฤษฎีพลังงานจลน์โมเลกุลของสารในระบบจะมีพลังงานมากขึ้นและเคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้ความถี่ในการชนกันมากขึ้น ดังนั้นจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาจึงมีมากขึ้น ดังนั้นร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) จึงสูงขึ้น

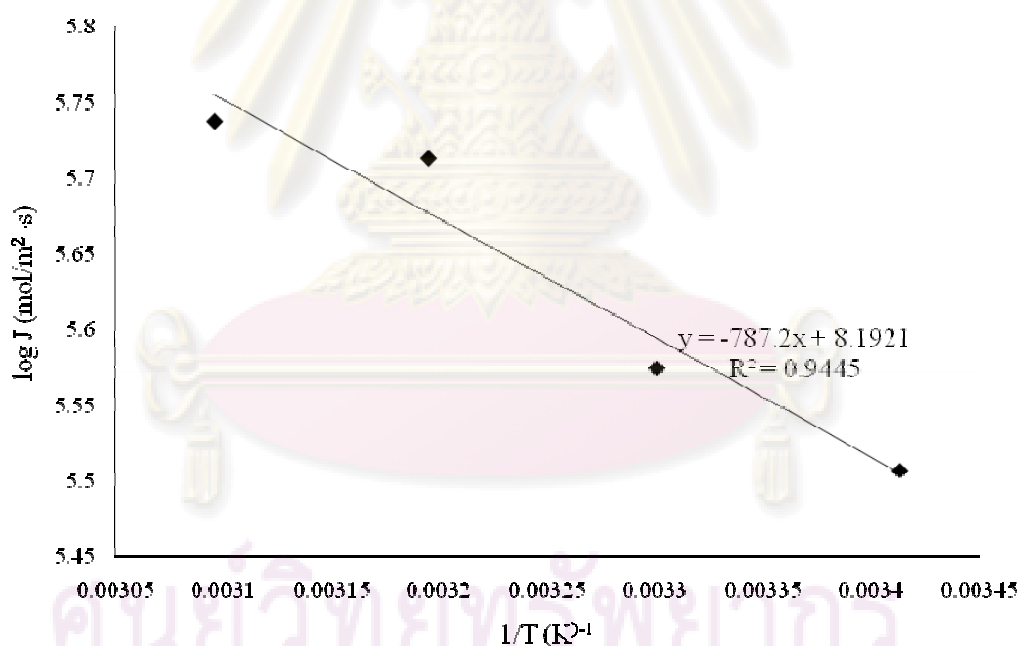
พลังงานของการแพร่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ (Chaudry et al, 1997) ดังนี้

$$\log J = \frac{-E}{2.303RT} + B$$

เมื่อ $E =$ พลังงานของการแพร่: $\frac{kJ}{mol}$
 $J =$ พลักซ์ของการสกัดไอออนโครเมียม $\frac{mol}{m^2 \cdot s}$
 $T =$ อุณหภูมิ (K)
 $B =$ ค่าคงที่

จากสมการสามารถหาค่าพลังงานของการแพร่ได้จากความชันของกราฟระหว่าง

$\log J$ กับ $\frac{1}{T}$ ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพลักซ์การสกัด Cr(VI) กับอุณหภูมิ [Aliquat 336] 5% (v/v) [สารละลายนำกลับ NaCl] 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตร/นาที ไหลวน 1 รอบ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 7

จากกราฟรูปที่ 4.10 เมื่ออุณหภูมิของการสกัดเพิ่มขึ้น พลั๊กซ์ของไอออนโครเมียมจะเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานของการแพร่ของไอออนโครเมียมที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 15.14 kJ/mol ซึ่งส่งผลให้ร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) สูงขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chaudry et al. (1997) ที่สกัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมการฟอกหนังด้วยสารสกัด TOA โดยใช้โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นกลวงในช่วงอุณหภูมิ 20-50 องศาเซลเซียส และ Galan et al. (2006) สกัดไอออนโครเมียมจากน้ำใต้ดินด้วยสารสกัด Aliquat 336 โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นกลวงในช่วงอุณหภูมิ 20-50 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สามารถสกัดไอออนโครเมียมได้มากขึ้นแต่จากสมบัติของเส้นใยกลวงที่ทำจากพอลิโพรพิลีนไม่ควรใช้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอันยาวนานเนื่องจากมีผลต่ออายุการใช้งานของเส้นใยกลวง (Galan et al, 2006)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การกำจัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียในกระบวนการกักตุนของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับน้ำเสียของกระบวนการผลิตที่มีไอออนโลหะหลายชนิดของแต่ละอุตสาหกรรม การเลือกชนิดของสารสกัดได้อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อร้อยละของการสกัดไอออนที่ได้ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบและปริมาณของไอออนต่างๆ ที่มีในน้ำเสียนั้นและสมบัติทางเคมีของสารสกัดแต่ละชนิด การกำจัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียในกระบวนการกักตุนของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในงานวิจัยนี้ สารสกัด Aliquat 336 สามารถสกัด Cr(VI) ได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์
2. สารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP ที่มี Aliquat 336 เป็นสารสกัดหลักและ TBP เป็นดอนเนอร์ไม่มีสมบัติของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient: S.C.) ที่คำนวณต่ำกว่าศูนย์ แสดงว่าสารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ TBP ทำให้ความสามารถในการสกัดลดลงและเป็นการสกัดแบบ antagonistic extraction
3. Aliquat 336 สามารถคัดเลือกและสกัด Cr(VI) ออกจาก Fe(II) และ Ni(II) ได้อย่างชัดเจน ค่าแฟกเตอร์การแยก Cr(VI)/Fe(II) และ Cr(VI)/Ni(II) ของ Aliquat 336 เท่ากับ 14.53 และ 7.07 ตามลำดับ
4. ความเข้มข้นของสารสกัดมีผลต่อร้อยละของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) สำหรับงานวิจัยนี้ความเข้มข้นของ Aliquat 336 ที่ 5% (v/v) สามารถสกัด Cr(VI) ได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์
5. ในงานวิจัยนี้สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์สามารถสกัด Cr(VI) ได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และนอกจากนี้ $(R_4N)OH$ ที่เกิดขึ้นจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีโอกาสทำให้เยื่อแผ่นเหลวเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ค่าร้อยละของการสกัด Cr(VI) ที่ได้ค่อนข้างคงที่

ประมาณ 70% เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ จึงมีผลเฉพาะปฏิกิริยาด้านการนำกลับเท่านั้น ค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับไฮเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.7 โมลต่อลิตร

6. ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับไฮเดียมคลอไรด์ที่ให้อัตราของการนำกลับ Cr(VI) สูงที่สุด เท่ากับ 11
7. เมื่ออุณหภูมิของการสกัดเพิ่มขึ้นในช่วง 20-50 องศาเซลเซียส พลังค์ของไอออนโครเมียมจะเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราของการสกัดและนำกลับ Cr(VI) สูงขึ้น แต่ไม่ควรใช้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาานเนื่องจากมีผลต่ออายุการใช้งานของเส้นใยกลวงพอลิพรพิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ค่าพลังงานของการแพร่ของไอออนโครเมียมของปฏิกิริยาการสกัดในงานวิจัยนี้เท่ากับ 15.14 kJ/mol

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความกรด-เบส ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อผ่านมอดูลเส้นใยกลวงจะไม่ค่อยคงที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะต่ำลง ดังนั้นจึงควรมีระบบควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสให้คงที่ เช่น โดยการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ในการปรับค่าความเป็นกรด-เบส
2. ในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต้องไม่มีอนุภาคใดๆ ปนเปื้อนเพราะจะทำให้เกิดการอุดตันในเส้นใยกลวงได้ ดังนั้นต้องกรองก่อนที่จะนำเข้ามาอมอดูลเส้นใยกลวง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. กรุงเทพมหานคร: เอส. อาร์. พรินติ้งแมสโปรดักส์ จำกัด. 2547.

เกษม หุตัทธนาสันดี. 2543. การจำลองแบบประสิทธิภาพการทำงานและการออปติไมซ์ในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิชิต จรรย์ธรรมานุกูล. 2544. การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ ด้วยเหล็กสภาวะออกซิเดชันศูนย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล อภินพพัฒน์. 2541. การสกัดแยกและนำกลับโครเมตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในห่อเดี่ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลของโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัญชลี จันทวรรณกูร. 2535. การกำจัดโครเมียมโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Alguacil, F. J., Caravaca, C., and Martin, M. I. Transport of Chromium(VI) through a Cyanex 921-Supported Liquid Membrane from HCl Solutions. J. Chem. Tech. Biotech. 78, 10, (2003): 1048.

Alonso, A. I., Irabien, A., and Ortiz, M. I. Nondispersive extraction of Cr (VI) with aliquat336: Influence of carrier concentration. Sep. Sci. Techno. 31, 2 (1996): 271-282.

Alonso, A. I., Galan, B., Irabien, A., and Ortiz, I. Separation of Cr(VI) with aliquat336: Chemical equilibrium modeling. Sep. Sci. Techno. 32, 9 (1997): 1543-1555.

- Ansari, R. Application of Polyaniline and its Composites for Adsorption/Recovery of Chromium (VI) from Aqueous Solutions. Acta Chim. Slov. 53, (2006): 88 – 94.
- Brooks, C. S. Metal Recovery from Industrial Waste. Chelsea: Lewis, 1991.
- Chakraborty, M., Murthy, Z. V. P., Bhattacharya, C., and Datta, S. Process Intensification: Extraction of Chromium (VI) by Emulsion Liquid Membrane, Sep. Sci. Techno. 40, (2005): 2353–2364.
- Chaudry, A., Ahmad, S., and Malik M.T. Supported liquid membrane technique applicability for removal of chromium from tannery wastes. Waste Management 17, 4, (1997): 211-218.
- Ching-Yet, S., and Pai-Zon, C., Theoretical Analysis of Copper-ion Extraction through Hollow Fiber Supported Liquid Membranes, Sep. Sci. Techno. 28, 13&14, (1993): 2149.
- Corvalan, S.M., Ortiz, I., and Eliceche, A.M. Optimal design of membrane processes for wastewater treatment and metal recovery, Comput. Chem. Eng. 28 (2004): 103-109.
- Cotton, F. A., and Wilkinson, G. Advanced Inorganic Chemistry, 3rd ed. New York: Interscience, 1972.
- Danesi, P. R., and Rickert, P. C. Some Observations on the Performance of Hollow-Fiber Supported Liquid Membranes for Co-Ni Separations, Solvent Extraction and Ion Exchange 4, 1, (1986): 149 – 164.
- Eliceche, M. Optimal design of membrane processes for wastewater treatment and metal recovery. Comput. Chem. Eng. 28, (2004): 103-109.
- Galan, B., Castaneda, D., and Ortiz, I. Removal and recovery of Cr(VI) from polluted ground water: A comparative study ion-exchange technologies. Water Research 39, (2005): 4317-4324.
- Galan, B., Calzada, M., and Ortiz, I. Recycling of Cr (VI) by membrane solvent extraction: Long term performance with the mathematical model. Chem. Eng. J. 124, (2006): 71-79.
- Gu, Z.M., Zhou, Q.J. and Jin, L.R. Recovery of Ni(II) from rinse water from nickel plating process by electrostatic pseudo liquid membrane. Water Treat. 5 (1990): 170.
- Harrington, P.J., Stevens, G.W. Steady-state mass transfer and modeling in hollow fibre

- liquid membranes, J. Membr. Sci. 192 (2001): 83-98.
- Ho, W. S.W., and Poddar, T. K. New Membrane Technology for Removal and Recovery of Chromium from Waste Waters. Environ. Prog. 20, 1, (2001): 44.
- Hoechst Celanese Corporation, Operating Manual Laboratory Liquid/Liquid Extraction System (1995)
- Kim, Y.H., and Choi, D.W. Chromium (VI) Removal in a Semi-Continuous Process of Hollow Fiber Membrane with Organic Extractants. Korean J. Chem. Eng. 22, 6, (2005): 894-898.
- Kondo, K., Kamio, E., Miura, H., and Matsumoto, M. Extraction Mechanism of Metal Ions on the Interface between Aqueous and Organic Phases at a High Concentration of Organophosphorus Extractant. Ind. Eng. Chem. Res. 45, (2006): 1105-1112.
- Majdan, M., Mierzwa, J., and Sadowski, P. On the Separation of Co and Ni from Chloride Media with Aliquat 336-TBP and Aliquat 336-TOPO. Monatshefte für Chemie. 128, (1997): 113-121.
- O'Hara P. A. Supported Liquid Membranes for Copper Transport, J. Membr. Sci. 44, (1989): 273-287.
- Ortiz, I., Galan, B., and Irabien, A., Membrane mass transport coefficient for the recovery of Cr(VI) in hollow fiber extraction and back-extraction modules, J. Membr. Sci. 118 (1996): 213-221.
- Prakorn, R., and Ura, P. Synergistic Extraction and Separation of Mixture of Lanthanum and Neodymium by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, Korean J. Chem. Eng. 20, 4 (2003): 724-730.
- Prakorn, R., Kwanta, N., and Ura, P. One-through Selective Separation of Copper, Chromium and Zinc Ions by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, Korean J. Chem. Eng. 21, 6 (2004):1212-1217.
- Prakorn, R., Eakkapit, S., Weerawat, P., Milan, H., and Ura, P. Permeation study on the hollow-fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt(II), Korean J. Chem. Eng. 23, 1 (2005): 117-123.
- Rathore, N.S., Sonawane, J.V., Kumara, A., Venugopalan, A.K., Singh, R.K., Bajpai, D.D., and Shukla, J.P. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes,

- J. Membr. Sci. 189 (2001): 119-128.
- Schultz, G., Separation Techniques with Supported Liquid Membrane, Desalination 68, 191 (1988).
- Tanigaki, M., Shiode, T., Ueda, M., and Eguchi W. Facilitated Transport of Zinc Chloride through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part 1. Transport Mechanism. Sep. Sci. Techno. 23 (1988): 1145 – 1159.
- Tchobanoglous, G., and Burton, F.L., Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse, 3rd ed. McGraw-Hill. 1991.
- Venkateswaran, P., and Palanivelu, K. Studies on recovery of hexavalent chromium from plating wastewater by supported liquid membrane using tri-n-butyl phosphate as carrier, Hydrometallurgy 78 (2005): 107-115.
- Vincent, T., and Guibal, E. Cr (VI) Extraction Using Aliquat336 in a Hollow Fiber Module Made of Chitosan. J. Ind. Eng. Chem. 40, (2001): 1406-1411.
- Weerawat, P., Prakorn, R., Suttichai, A., and Ura, P. Transport of Cerium, Lanthanum, Neodymium and Palladium via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane Based on Equilibrium Theory. J. Chin. Ins. Chem. Eng. 37, 3, (2006): 1-11.
- Yang, Q., and Kocherginsky, N.M. Copper removal from ammoniacal wastewater through a hollow fiber supported liquid membrane system: Modeling and experimental verification, J. Membr. Sci. 297 (2007): 121-129.
- Zhang, W. Solvent Extraction of Chromium(VI) with Tri-*n*-butyl Phosphate from Aqueous Acidic Solutions. J. Chem. Eng. D. 52, (2007): 2220-2223.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบและผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการสกัด Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 5% (v/v) สารละลายน้ำกลัซโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลัซไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลัซ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ Cr (VI) ในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr (VI) ในสารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Ni(II) ในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Ni(II) ในสารละลายป้อนขาออก (ppm)
0	340.91	154.78	183.69	183.11	31.82	31.62
20	154.78	124.03	183.11	174.75	31.62	29.63
40	124.03	105.98	174.75	172.55	29.63	28.11
60	105.98	105.13	172.55	171.55	28.11	28.01
80	105.13	104.24	171.55	170.22	28.01	27.98
100	104.24	102.34	170.22	170.34	27.98	27.96
120	102.34	102.12	170.34	169.88	27.96	27.01
140	102.12	102.23	169.88	169.56	27.01	26.99

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 5% (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Ni(II) ในสารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Ni(II) ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)
0	0.00	124.80	0.00	0.00	0.00	0.00
20	124.80	129.72	0.00	0.00	0.00	0.00
40	129.72	129.73	0.00	0.00	0.00	0.00
60	129.73	132.62	0.00	0.00	0.00	0.00
80	132.62	132.63	0.00	0.00	0.00	0.00
100	132.63	132.65	0.00	0.00	0.00	0.00
120	132.65	132.75	0.00	0.00	0.00	0.00
140	132.75	132.74	0.00	0.00	0.00	0.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 1 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI)ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	273.91	232.15	41.76	0.00	10.48
2	232.15	215.94	16.21	10.48	18.95
3	215.94	185.59	30.35	18.95	24.91
4	185.59	177.92	7.67	24.91	25.17
5	177.92	157.09	20.84	25.17	32.53

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 2 %(v/v) สารละลายนำกลับไซเตียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	327.84	202.80	125.03	0.00	11.03
2	202.80	190.50	12.30	11.03	21.58
3	190.50	166.89	23.62	21.58	24.80
4	166.89	146.44	20.44	24.80	31.50
5	146.44	141.05	5.40	31.50	41.66

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 3 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	311.65	180.83	130.83	0.00	30.47
2	180.83	132.30	48.53	30.47	57.06
3	132.30	106.57	25.72	57.06	62.65
4	106.57	104.20	2.37	62.65	63.39
5	104.20	104.48	0.00	63.39	63.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 4 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	499.05	318.81	180.24	0.00	124.80
2	318.81	245.11	73.70	124.80	129.72
3	245.11	187.14	57.93	129.72	129.73
4	187.14	173.57	13.57	129.73	132.62
5	173.57	163.92	9.65	132.62	132.63

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่ สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	325.86	141.78	184.08	0.00	14.98
2	141.78	121.13	20.65	14.98	15.69
3	121.13	102.30	18.83	15.69	16.17
4	102.30	101.79	2.88	16.17	28.91
5	101.79	99.41	0.00	28.91	29.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 6 %(v/v) สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	340.91	154.78	186.13	0.00	24.98
2	154.78	124.03	30.75	24.98	25.33
3	124.03	105.98	18.05	25.33	37.32
4	105.98	105.13	0.85	37.32	40.55
5	105.13	104.24	0.89	40.55	43.98

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลผลความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 %(v/v)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)	ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)
1%	42.65	11.88
2%	56.98	12.71
3%	66.57	20.34
4%	67.15	20.39
5%	69.49	9.08
6%	69.42	10.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	310.44	131.41	179.02	0.00	28.91
2	131.41	126.24	5.18	13.56	53.54
3	126.24	115.47	10.77	15.34	54.62
4	115.47	92.26	23.21	16.60	62.63
5	92.26	88.71	3.55	19.45	60.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.3 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	331.09	168.94	162.15	16.60	13.62
2	168.94	147.83	21.10	18.56	20.67
3	147.83	103.51	44.33	20.67	22.83
4	103.51	102.10	1.40	22.83	22.87
5	102.10	100.44	1.66	22.83	25.51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับออก (ppm)
1	325.86	141.78	184.08	0.00	14.98
2	141.78	121.13	20.65	14.98	15.69
3	121.13	102.30	18.83	15.69	16.17
4	102.30	99.41	2.88	16.17	28.91
5	99.41	101.79	0.00	28.91	29.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.7 โมลาร์ สารละลาย
 ป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	330.77	152.57	178.20	0.00	31.13
2	152.57	120.74	31.83	31.13	45.78
3	120.74	102.66	18.08	45.78	59.49
4	102.66	101.82	0.83	59.49	63.35
5	101.82	98.53	3.29	63.35	65.62

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 1 โมลาร์ สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย ป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาออก (ppm)
1	325.58	128.80	196.78	0.00	27.44
2	128.80	100.59	28.21	27.44	38.56
3	100.59	94.64	5.95	38.56	41.58
4	94.64	92.56	2.08	41.58	44.99
5	92.56	90.56	2.00	44.99	55.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลผลความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นของ สารละลายนำกลับ NaCl (M)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)	ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)
0.10	71.42	6.53
0.30	69.66	6.91
0.50	69.49	9.08
0.70	70.21	19.84
1.00	72.18	16.93

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 % (v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ เท่ากับ 7 สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ไหลวน 1 รอบ

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลายป้อน ขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลายป้อน ขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ในสารละลาย นำกลับ ขาออก (ppm)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)	ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)
20	378.23	195.63	0	63.55	48.28	10.03
30	491.00	231.25	0	82.77	52.9	16.86
40	314.71	144.04	0	64.70	54.23	20.56
50	366.80	160.00	0	92.75	56.38	25.29

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อร้อยละการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ไหลวน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง

ค่าความเป็นกรด-เบสของ สารละลายนำกลับ	ความเข้มข้นขาเข้า ของ Cr(VI) ใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นขาออก ของ Cr(VI) ใน สารละลายนำกลับ (ppm)	ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)
9	361.00	23.58	6.53
10	487.03	108.16	22.21
11	324.00	89.43	27.57
12	496.43	74.26	14.96

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลผลชนิดของสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัด Cr(VI) โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 5 %(v/v) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวนรอบ	สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์			สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์		
	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาเข้าของ สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาออกของ สารละลายป้อน (ppm)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาเข้าของ สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาออกของ สารละลายป้อน (ppm)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)
1	325.86	141.78	0	377.04	232.12	0.00
2	141.78	121.13	56.49	232.12	184.22	38.44
3	121.13	102.30	62.83	184.22	183.35	51.14
4	102.30	99.41	68.61	183.35	160.05	51.37
5	99.41	101.79	69.49	160.05	159.92	57.55

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 4%(v/v) กับ TBP TBP 1%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI)) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาเข้า สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาออก สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาออก (ppm)
1	482.00	305.59	176.41	0.00	16.35
2	305.59	275.91	29.68	16.35	29.56
3	275.91	235.86	40.06	29.56	30.66
4	235.86	227.99	7.86	30.66	39.15
5	227.99	221.90	6.09	39.15	41.87

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 3%(v/v) กับ TBP TBP 2%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาเข้า สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาออก สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาออก (ppm)
1	491.91	316.59	175.32	0.00	109.67
2	316.59	266.16	50.43	109.67	128.57
3	266.16	227.34	38.81	128.57	157.91
4	227.34	222.32	5.02	157.91	158.09
5	222.32	215.32	7.00	158.09	160.24

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลผลสารสกัดผสม Aliquat 336 2.5%(v/v) กับ TBP TBP 2.5%(v/v) ต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวนรอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาเข้า สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ขาออก สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้น Cr(VI) ที่สกัดได้ (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) สารละลายนำกลับขาออก (ppm)
1	495.11	326.33	168.77	0.00	21.70
2	326.33	278.38	47.96	21.70	42.24
3	278.38	247.72	30.66	42.24	54.97
4	247.72	223.36	24.35	54.97	60.98
5	223.36	218.63	4.74	60.98	91.82

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดของสารสกัด	ร้อยละการสกัด Cr(VI)	ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)
Aliquat336 5%	69.49	9.08
Aliquat336 4% + TBP 1%	53.96	8.69
Aliquat336 3% + TBP 2%	55.84	32.58
Aliquat336 2.5% + TBP 2.5%	56.23	18.54

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที วน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง

สารสกัด	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายป้อนขา เข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายป้อนขา ออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายนำกลับขาออก (ppm)	ร้อยละการสกัด Cr(VI)
Aliquat 4% + TBP 1%	342.23	216.97	0.00	16.35	36.60
Aliquat 4% + TBP 2%	295.06	189.90	0.00	16.17	35.64
Aliquat 4% + TBP 2.5%	267.38	176.23	0.00	21.7	34.09
TBP 10%	268.47	240.97	0.00	1.77	10.24

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Fe(III) โดยใช้สารสกัดผสม Aliquat 336 กับ TBP สารละลายนำกลับไซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที วน 1 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง

สารสกัด	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Fe(II) ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	ร้อยละการสกัด Fe(II)
Aliquat 4% + TBP 1%	186.60	178.97	0.00	0.87	4.09
Aliquat 4% + TBP 2%	238.20	227.20	0.00	1.44	4.62
Aliquat 4% + TBP 2.5%	268.50	250.79	0.00	4.54	6.60
TBP 10%	170.18	155.97	0.00	4.76	8.35

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลผลการศึกษาการสกัดไอออนซัลเฟต โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที วนเป็นจำนวน 1 รอบ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลในทิศทางสวนทางกัน ที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้นของ SO_4^{2-} ใน สารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ SO_4^{2-} ใน สารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ SO_4^{2-} ที่สกัดได้ (ppm)
851	802.6	48.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.26 ข้อมูลผลการสกัดและการนำกลับ Cr(VI) โดยใช้ น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม เจือจาง 3 เท่า สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 5%(v/v) สารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที วน 5 รอบ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหล ในทิศทางสวนทางกัน ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวน รอบ	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายป้อนขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายป้อนขาออก (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)	ความเข้มข้นของ Cr(VI) ใน สารละลายนำกลับขาออก (ppm)
1	163.23	59.61	0	5.36
2	59.61	59.60	5.36	26.18
3	59.60	57.99	26.18	29.22
4	57.99	55.99	29.22	32.87
5	55.99	56.23	32.87	33.44

ร้อยละการสกัด Cr(VI)	65.70
ร้อยละการนำกลับ Cr(VI)	20.49

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการใช้สารสกัดเมทิลไตรออกทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Metyl trioctylammonium chloride: Aliquat 336) เพื่อใช้เตรียมเป็นเชื้อแผ่นเหลวในการทดลอง

คุณสมบัติของสารสกัด

เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นจากขวด 99 %

สูตรโมเลกุล $C_{25}H_{54}ClN$

มวลโมเลกุล 404.16 $\frac{g}{mol}$

ความหนาแน่น 0.89 $\frac{g}{cm^3}$

การเตรียมเชื้อแผ่นเหลวซึ่งประกอบไปด้วย สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 1, 2, 3, 4, และ 5% (v/v) ตามลำดับ เจือจางด้วยเคโรซีน

เปลี่ยนความเข้มข้นจากหน่วยเปอร์เซ็นต์เป็นโมลาร์ จากความสัมพันธ์

$$\text{ความเข้มข้น (mol/dm}^3\text{)} = \frac{\% \times 10 \times d}{M}$$

เมื่อ d คือ ความหนาแน่น $\frac{g}{cm^3}$

M คือ มวลโมเลกุล $\frac{g}{mol}$

$$\text{ความเข้มข้น (mol/dm}^3\text{)} = \frac{91.1 \times 10 \times 0.89}{404.16} = 2.006 \text{ mol/dm}^3$$

เตรียมสารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 1%(v/v) โดยปริมาตร ปริมาณ 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{ความเข้มข้น (mol/dm}^3\text{)} = \frac{1 \times 10 \times 0.89}{404.16} = 0.022 \text{ mol/dm}^3$$

จากความสัมพันธ์ $C_1V_1 = C_2V_2$

- เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น
 V_1 = ปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น
 C_2 = ความเข้มข้นของสารละลายสุดท้าย
 V_2 = ปริมาตรของสารละลายสุดท้าย

$$2.006 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \times V_1 = 0.022 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} \times 1000 \text{cm}^3$$

$$V_1 = 11 \text{ cm}^3$$

ข.2 การคำนวณปริมาณการใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งเป็นสารละลายน้ำกลับ
 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 3 ลิตร

จากความสัมพันธ์ $\frac{g}{M} = \frac{CV}{1000}$

- เมื่อ g = ปริมาณของสาร หน่วยเป็น กรัม
 M = มวลโมเลกุลของสาร หน่วยเป็น กรัม/โมล
 C = ความเข้มข้นของสารละลาย หน่วยเป็น โมลาร์
 V = ปริมาตรของสารละลาย

$$\frac{g}{58.5} = \frac{0.5 \times 3000}{1000}$$

$$g = 88$$

ข.3 การคำนวณร้อยละการสกัด

พิจารณาข้อมูลร้อยละการสกัดของ Cr(VI) ที่ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat336 5%(v/v) ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลับโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

ความเข้มข้นโครเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ 325.86 mg/l

ความเข้มข้นโครเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออกเท่ากับ 101.79 mg/l

ดังนั้น ร้อยละการสกัดมีค่าเท่ากับ $\frac{325.86 - 99.412}{325.86} = 69.49\%$

ข.4 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ (Percent Stripping)

พิจารณาข้อมูลร้อยละการสกัดของ Cr(VI) ที่ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat336 5%(v/v) ความเข้มข้นสารละลายนำกลับโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นไอออนโครเมียมในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ 325.86 mg/l

ความเข้มข้นไอออนโครเมียมในสารละลายนำกลับขาเข้าเท่ากับ 0 mg/l

ความเข้มข้นไอออนโครเมียมในสารละลายนำกลับขาออกเท่ากับ 29.59 mg/l

ดังนั้น ร้อยละการนำกลับมีค่าเท่ากับ $\frac{29.59}{325.86} \times 100 = 9.08\%$

ข.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (Overall mass transfer coefficient, K)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมฝั่งสกัดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.32

$$K = \frac{Q_t}{S_m} \ln \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

โดยที่ Q_t = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (mL/min)

A = พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ (m^2)

K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (cm/s)

C_{in} = ความเข้มข้นของไอออนโครเมียมขาเข้า (mg/l)

C_{out} = ความเข้มข้นของไอออนโครเมียมขาออก (mg/l)

พิจารณาข้อมูลร้อยละการสกัดของ Cr(VI) ที่ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat336 5%(v/v) ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลั่นไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรต่อนาที

$$K = \frac{100 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \ln \frac{325.86}{99.412}}{1.4 \text{m}^2} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1 \text{m}^2}{10000 \text{cm}^2} = 1.385 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

ข.6 ตัวอย่างการหาค่า Selectivity factor (SF)

ค่า แฟกเตอร์การแยก (S.F) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.33

$$SF = \frac{K_{Cr}}{K_M}$$

โดยที่	S.F	=	แฟกเตอร์การแยก
	K_{Cr}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโครเมียม
	K_M	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนโลหะตัวอื่น

พิจารณาข้อมูลร้อยละการสกัดของ Cr(VI) ที่ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat336 5%(v/v) ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลั่นไหลสวนทางกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรต่อนาที

หาค่าแฟกเตอร์การแยก (S.F.) ไอออนโครเมียมเทียบกับไอออนเหล็ก

$$SF = \frac{K_{Cr}}{K_{Fe}}$$

$$SF = \frac{1.385 \times 10^{-4}}{9.531 \times 10^{-6}} = 14.53$$

หาค่าแฟกเตอร์การแยก (S.F.) ไอออนโครเมียมเทียบกับไอออนนิกเกิล

$$SF = \frac{K_{Cr}}{K_{Ni}}$$

$$SF = \frac{1.385 \times 10^{-4}}{1.9601 \times 10^{-5}} = 7.07$$

ข.7 การคำนวณฟลักซ์ของไอออนโครเมียม

$$\text{ฟลักซ์โครเมียมไอออน} = \frac{([Cr]_{in} - [Cr]_{out}) \times \text{อัตราการไหล}}{\text{พื้นที่ผิวสัมผัส}}$$

จากตาราง ก.15 การทดลองที่อุณหภูมิ 20 °C

ฟลักซ์ไอออนโครเมียมในการสกัด

$$J = \frac{(632.59 - 329.39) \frac{mg}{l} \times 100 \frac{ml}{min} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{1l}{1000ml} \times \frac{1 \text{ mol}}{116 \text{ g}} \times \frac{1g}{1000mg}}{1.4m^2}$$

$$J = 3.11166E-06 \frac{mol}{s \cdot m^2}$$

ข.8 การคำนวณหาค่าพลังงานการแพร่ (Energy of diffusion)

ค่าพลังงานการแพร่หาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\log J = \frac{-E}{2.303RT} + B$$

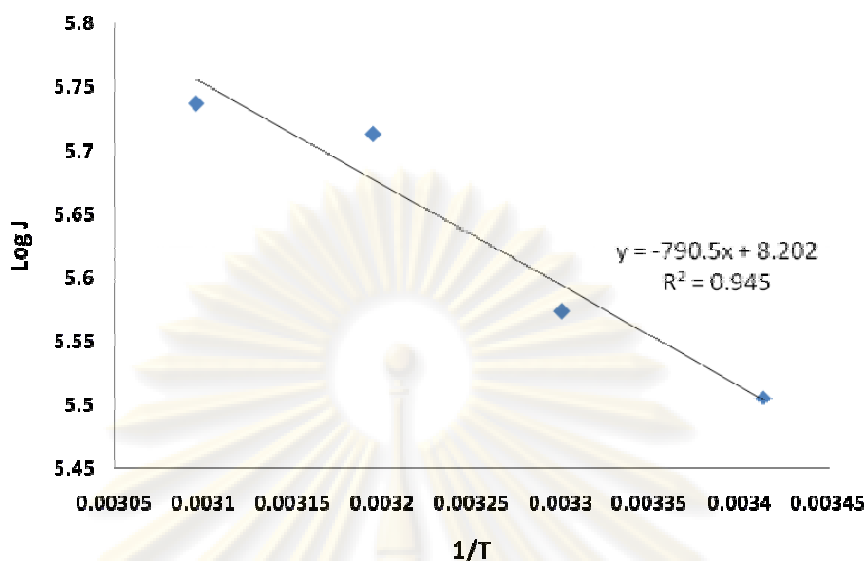
ซึ่ง E = พลังงานการแพร่

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

B = ค่าคงที่

จากสมการ สามารถหาค่า E ได้จากความชันของกราฟซึ่งพล็อตกราฟระหว่าง $\log J$ กับ $\frac{1}{T}$
ดังกราฟรูปที่ 4.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังค์การสกัดกับอุณหภูมิ โดยปฏิบัติการแบบไหลผ่าน ครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน สารละลายสไตริโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารสกัด Aliquat336 เข้มข้น 5%(v/v) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

จากกราฟพบว่า สมการแสดงความสัมพันธ์ของ Log J กับ 1/T คือ

$y = -790.5x + 8.202$ มีความชันเท่ากับ -790.5 นำค่าความชันไปค่าพลังงานในการแพร่ได้ดังนี้

$$\frac{E}{2.303R} = 790.5$$

$$E = 2.303 \times 8.314 \times 790.5$$

$$E = 15.14 \text{ KJ/mol}$$

$E > 60 \text{ kJ/mol}$ Energy of chemical reaction

$E < 30 \text{ kJ/mol}$ Energy of diffusion process (Kondo et al, 2006)

ซึ่งค่า E ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 30 KJ/mol ค่า E ที่ได้จึงเป็นค่าพลังงานในการแพร่

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายภาณุวัฒน์ อู่สำห้เพียร

เกิด วันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2526 ที่เขตบางกอกน้อย แขวงศิริราช กรุงเทพมหานคร

การศึกษา

พ.ศ. 2532-2538	ระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนคลองเกลือ
พ.ศ. 2538-2544	ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนทวีธาภิเศก
พ.ศ. 2544-2548	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549-2551	ศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์

พ.ศ. 2548-2549	วิศวกรฝ่ายเทคนิค สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550	ผู้ช่วยสอน วิชา Analytical Chemistry ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนสนับสนุนงานวิจัย

พ.ศ. 2550	กองทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
-----------	--------------------------------------------------------------------------------

ผลงานทางวิชาการ

1. Parnuwat Usapein, Ura, Pancharoen and Prakorn Ramakul. Selective Removal of Chromium (VI) From Wastewater of Stainless Steel Industry with Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. The 9th National Grad Research Conference. The Dean of Graduate School of Public Universities, Burapa University, Mar 2008.
2. Usapein Parnuwat, Anchaleeporn W. Lothongkum, Ramakul Prakorn and Pancharoen Ura. Efficient Transport and Selective Extraction of Cr(VI) from Spent Pickling Solution of the Stainless Steel-Cold Rolled Plate Process using Aliquat 336 via HFSLM. Korean Journal of Chemical Engineering (submitted)