

การแยกปรอทและสารหนูโดยใช้เชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นางสาวสิวลี แสงธำรง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

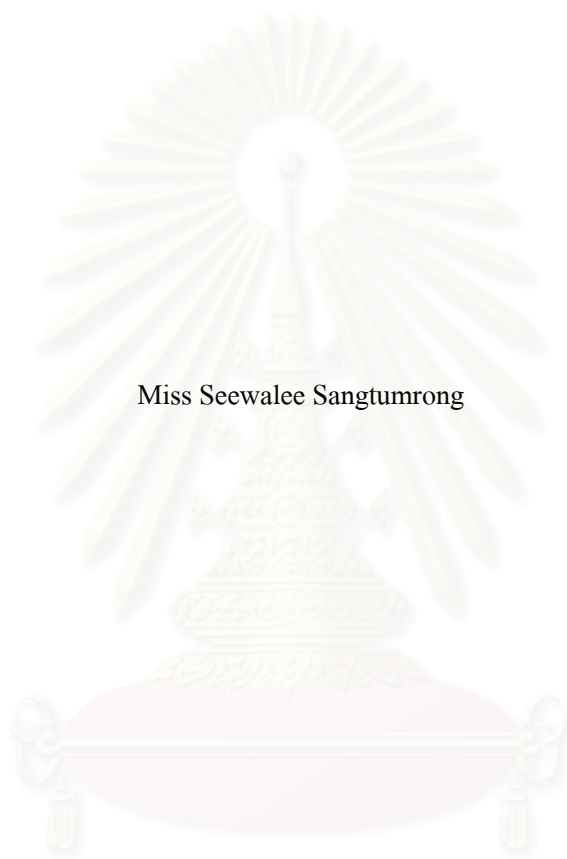
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEPARATION OF MERCURY AND ARSENIC BY HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Miss Seewalee Sangtumrong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแยกโปรตีนและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

โดย

นางสาวสิวลี แสงธำรง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

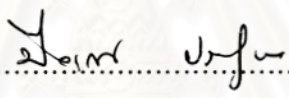
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

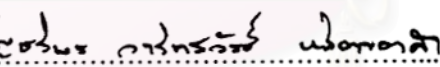
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

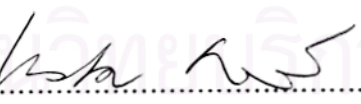

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ชีเรก ลาวัณย์ศิริ)

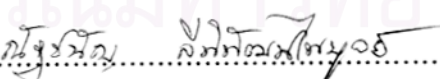
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


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


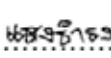
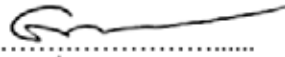
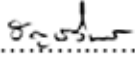

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนน ลิพิพัฒน์ไพบูลย์)

สิวลี แสงธำรง : การแยกปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (SEPARATION OF MERCURY AND ARSENIC BY HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE). อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ, 74 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนปรอทและสารหนูจากสารละลายคลอไรด์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และใช้สารสกัด tri-*n*-octylamine (TOA) ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ผลการทดลองพบว่าไอออนปรอทเท่านั้นที่สามารถถูกสกัดและนำกลับ เนื่องจากปรอทจะแตกตัวให้ไอออนประจุลบ (HgCl_4^{2-}) และสารสกัด TOA ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบสจะเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่มีประจุลบเท่านั้น สำหรับไอออนของสารหนู (H_2AsO_3) มีประจุเป็นกลางจึงไม่เกิดการสกัดและนำกลับ จากการทดลองได้ค่าร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทเท่ากับ 95 และมีความสามารถในการเลือกเป็นร้อยละ 100

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต..... ..... .....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... .....
ปีการศึกษา.....2549..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... .....

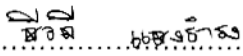
4770599921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING


KEYWORDS : MERCURY / ARSENIC / EXTRACTION / LIQUID MEMBRANE / HOLLOW
FIBER

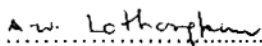
SEEWALEE SANGTUMRONG : (SEPARATION OF MERCURY AND ARSENIC
BY HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE). THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. DR. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., THESIS CO-ADVISOR :
ASSOC. PROF. DR. ANCHALEEPORN W. LOTHONGKUM, D.Eng., 74 pp.

The separation of mercury (II) and arsenic (III) ions from the chloride media has been examined through a hollow-fiber-supported liquid membrane using tri-*n*-octylamine (TOA) dissolved in toluene as an extractant. The transport system was studied as a function of several variables: the concentration of hydrochloric acid in feed solution, the concentration of TOA in the liquid membrane, the concentration of sodium hydroxide in the recovery solution. It was found that only mercury (II) ions were extracted because mercury (II) ions in the hydrochloric solution formed the anionic complex ions (HgCl_4^{2-}) and TOA, a basic extractant, reacted with the anionic metal complex ions. Arsenic (III) ions were not extracted because they were in the neutral form. The maximum percentage of recovery for mercury (II) was 95% and the selectivity was 100%.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department....CHEMICAL..ENGINEERING... Student's signature..... 

Field of study..CHEMICAL..ENGINEERING... Advisor's signature..... 

Academic year.....2006..... Co-advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากการให้คำปรึกษาตลอดจนคำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ จากรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชนัญ ลิพิพัฒน์ไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในคำชี้แนะที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณประภร รามกุล คุณเอกพิชญ์ ทรงคุณ คุณทรรศชนก ประภาสวัตดี และคุณเอกพงศ์ อูดี จากห้องวิจัย Mass Separation รวมทั้งเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	3
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎี	10
2.1 เยื่อแผ่นเหลว	10
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)	10
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)	13
2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane)	13
2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Spiral-Type Supported Liquid Membrane)	14
2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane: HFSLM)	15
2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo-Liquid Membrane)	17

2.2 กลไกการถ่ายเทมวล	20
2.2.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)	20
2.2.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)	22
2.3 ชนิดของสารสกัด	23
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)	23
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant)	25
2.3.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating Extractant)	26
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	27
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 วิธีการทดลอง	30
3.3.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน	30
3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA	30
3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์	31
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู	32
3.3.5 ศึกษาผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว	33
3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 ผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน	37
4.2 ผลของความเข้มข้นสารสกัด TOA	39
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์	42
4.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู	45
4.5 ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50

รายการอ้างอิง	51
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ)	56
ภาคผนวก ข (ค่านิยม)	67
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ)	68
ภาคผนวก ง (การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer)	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	74



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ	19
3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2 คุณสมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง	29
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ในสารละลายป้อน.....	39
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA	42
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลาย นำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์	44
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารป้อน	46
ก.1 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการ สกัดและการนำกลับ	57
ก.2 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นกรด ไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ	58
ก.3 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นสารสกัด TOA ต่อการสกัดและการนำกลับ ...	59
ก.4 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของ สารสกัด TOA ต่อการสกัดและนำกลับ	60
ก.5 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อการสกัดและนำกลับ	61
ก.6 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของ สารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดและนำกลับ	62
ก.7 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของปรอทและสารหนูต่อการสกัดและ นำกลับ	63
ก.8 ข้อมูลร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของปรอท และสารหนูต่อการสกัดและนำกลับ	64
ก.9 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาอายุการทำงานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดและนำกลับ ..	65
ก.10 ข้อมูลร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาอายุการทำงานของ เยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดและนำกลับ	66

ตารางที่

หน้า

ง.1 ค่าสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โลหะด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer	73
---	----

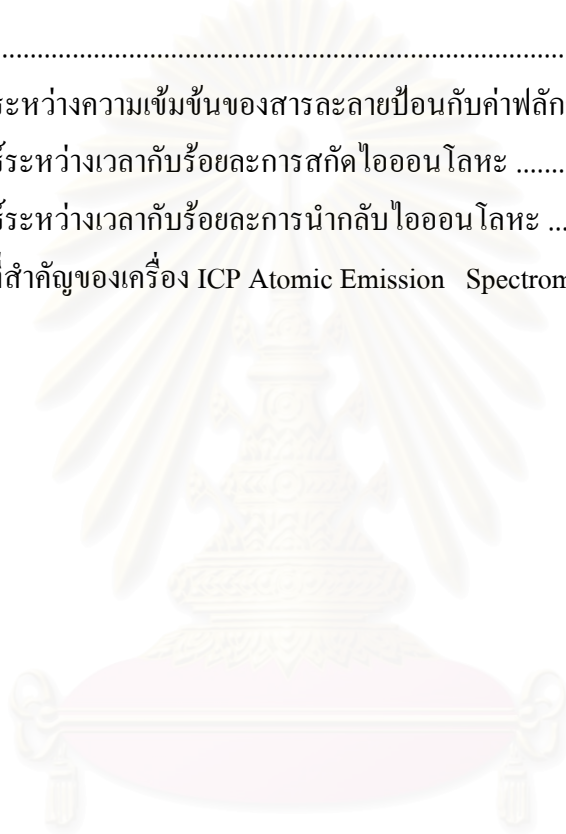


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz,1988)	11
2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน	12
2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)	13
2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)	14
2.5 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)	15
2.6 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณา เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง	16
2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต	18
2.8 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทแบบสวนทาง	21
2.9 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน	22
3.1 สูตร โครงสร้างของสารสกัด Tri- <i>n</i> -octylamine (TOA)	28
3.2 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Contactor ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.4 การปฏิบัติการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงในลักษณะไหลผ่านครั้ง เดียว (One-Through Mode).....	34
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละ การสกัดของโลหะ	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละ การนำกลับของโลหะ	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดไอออน โลหะ	40
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับไอออน โลหะ	40
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับ ร้อยละการสกัดไอออนโลหะ	43
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับ ร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ	43

ภาพที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนโลหะ	45
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ	46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับค่าฟลักซ์ของไอออนโลหะ	47
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดไอออนโลหะ	48
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ	48
ง.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer.....	72



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
J	ฟลักซ์
M	โมลต่อลิตร
n	จำนวน โมล
ppm	ส่วนต่อหนึ่งล้านส่วน
P	ค่าการซึมผ่าน (Permeability)
Q	อัตราการไหล
r	ขนาด โมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
R	ระยะทางในการแพร่
T	อุณหภูมิของสารละลาย
% v/v	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

อักษรกรีก

α	สัมประสิทธิ์การแยก (Separation Factor)
η	ความหนืดของสารละลาย
Π	ค่าคงที่ในสมการ Nernst มีค่าเท่ากับ 3.14

ตัวห้อย

aq	สารละลายเอควียส
F	สารละลายป้อน
M	โมดูลเส้นใยกลาง
org	สารละลายอินทรีย์
S	สารละลายนำกลับหรือสารละลายสตรีป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในกระบวนการผลิตแก๊สธรรมชาติและปิโตรเลียมจากอ่าวไทย นอกจากปริมาณแก๊สธรรมชาติเหลวที่ผลิตได้แล้ว ยังมีปริมาณน้ำจำนวนมากจากหลุมผลิตที่มีความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 2,200 ppb และความเข้มข้นของสารหนูเท่ากับ 16,400 ppb เจือปนอยู่ถูกส่งมากับแก๊สธรรมชาติเหลว น้ำจากหลุมผลิตเหล่านี้ไม่สามารถทิ้งลงทะเลได้โดยตรงหากปราศจากการบำบัดที่เหมาะสม เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารปรอทและสารหนูในอ่าวไทย และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของประชาชนโดยรวม

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งจากหลุมแก๊สธรรมชาติ ซึ่งเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการกำจัดโลหะ คือ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) แต่เทคนิคนี้มีข้อเสีย คือ ค่าการเลือกสกัด (Selectivity) ที่จำกัดและอัตราเร็วในการสกัดช้ามาก เป็นผลให้ต้องใช้สารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลมาก ส่วนวิธีการบำบัดด้วยการกรองโดยใช้เมมเบรนชนิด Ultrafiltration ถูกจำกัดโดยการสะสมตัวของปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่อุดตันเยื่อกรอง การใช้เมมเบรนชนิด Reverse Osmosis มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของเมมเบรนจากการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ (กิตติพงษ์ เจริญวัฒน์ชัย, 2543) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นต้องหาวิธีการอื่น ซึ่งเทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เพราะสามารถรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียว และยังคงปริมาณการใช้ตัวทำละลายได้ด้วย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีค่าการเลือกสกัดสูง ไม่ต้องใส่สารลดแรงตึงผิว ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ ใช้พลังงานต่ำ อัตราการถ่ายเทมวลสูง สามารถคัดแปลงและขยายขนาดได้ง่าย (วีรวัฒน์ ปัททวิงศา, 2541) เทคนิคการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อแยกและเพิ่มความเข้มข้นให้กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ

สารปรอท

ปรอท มีสูตรทางเคมี คือ Hg เป็นธาตุอันดับที่ 80 ในตารางธาตุในกลุ่มของธาตุทรานสิชัน ปรอทเป็นธาตุหมู่ 2B ซึ่งอยู่ท้ายสุดของแถว d ในตารางธาตุ ปรอทแบ่งออกได้หลายรูปแบบ คือ ปรอทในรูปโลหะ (Metallic Form) ปรอทในรูปสารอนินทรีย์ (Inorganic Mercury Compound) และปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic Mercury Compound) ปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะ โดยมากบริสุทธิ์และไม่ผสมกับสารอื่น ความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ เกลือของปรอท ส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ $HgCl_2$ เป็นโมเลกุลโคเวเลนต์ ระเหิดง่าย หลอมเหลวแล้วไม่นำไฟฟ้า ละลายน้ำได้ดีแต่ในสารละลายไม่ค่อยแตกตัวเป็นไอออน สารประกอบเฮไลด์ของปรอทที่เสถียรใน สารละลายได้แก่ Hg_2X_2 (X = Cl, Br, I) โดยธรรมชาติอาจพบเป็นแร่หรือสหรหรือพบในรูปของ HgS มีสีแดงกระจายอยู่ในเนื้อหินที่เรียกว่า “Cinnabar”

สารประกอบอินทรีย์ของปรอท (Organo Mercury Compound) เป็นสารประกอบปรอทที่เป็นพิษมากที่สุด เช่น สารประกอบจำพวกอัลคิลเมอร์คิวรี (Alkyl Mercury) เช่น เมทิลเมอร์คิวรี มีอำนาจในการขัดขวางปฏิกิริยาในร่างกายได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีสารประกอบพวก Aryl Mercury โดยเฉพาะ CH_3Hg^+ (Methyl Mercury) สารนี้ละลายได้ดีในไขมัน ร่างกายสามารถดูดซึม Methyl Mercury ในทางเดินอาหารได้สูงถึง 95 - 98 % แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก เนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์ ปรอทรูปนี้สามารถยึดติดกับเม็ดเลือดแดงและแพร่กระจายไปยังทุกส่วนของร่างกาย ส่วนปรอทในรูปโลหะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังและลมหายใจได้ง่าย ปรอทรูปที่อันตรายต่อชีวิตมนุษย์มากที่สุดคือ ในรูปไอระเหยซึ่งสามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลันถ้าหายใจเข้าไปในช่วง 1,200 - 8,500 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสารประกอบอินทรีย์ของปรอทมีความเป็นพิษน้อยที่สุด เพราะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหารได้น้อยมากไม่เกิน 2 % และยิ่งกว่านั้นยังถูกขับออกจากร่างกายได้ง่าย ปรอทส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในสมองส่วน เซลเบลลัม (Cerebellum) และเซลล์คอร์เท็กซ์ (Cerebral Cortex) ซึ่งทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อสมองส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึก ทำให้ผู้รับสารปรอทมีอาการผิดปกติเกี่ยวกับระบบประสาทการมองเห็นและความรู้สึก

นอกจากนี้พิษของปรอทสามารถทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะต่างๆ ที่กระจายไปถึง เช่น ทำลายเนื้อเยื่อตับ ไพบอร์ของกล้ามเนื้อหัวใจ หลอดไต กระเพาะและลำไส้ส่วนดูโอดินัม (Duodenum) และทำให้การผลิตเซลล์เม็ดเลือดแดงของไขกระดูกลดลง เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกายจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ประเภทที่มีกลุ่มซัลไฮดริล (Sulhydryl) โดยมีผลขัดขวางหรือยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เช่น ทำให้ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์น้อยลงหรือ

ทำให้การเผาผลาญอาหารในไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) ไม่เกิดขึ้น เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2541)

สารหนู

สารหนู คือธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 33 และสัญลักษณ์ คือ As สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะ ที่มีอยู่แพร่หลายมี Valency 3 และ 5 ในธรรมชาติจะกระจายอยู่ทั่วไปในแร่ธาตุต่างๆ เช่น Arsenides ในทองแดง นิกเกิล เหล็ก หรือเป็น Arsenic Sulfide หรือ Oxide ทั้งสารประกอบอินทรีย์ของสารหนู และสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู มีสารประกอบมากมายที่แตกต่างกันรวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ในสภาพสารละลายสารหนูจะอยู่ในรูปของอาเซเนต (Arsenate, As(V)) หรือ อาเซไนต์ (Arsenite, As(III))

เนื่องจากสารหนูส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษแบบเรื้อรัง จากการสัมผัสสารหนูเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกัน ผิวหนังส่วนที่สัมผัสกับสารหนูจะเกิดการระคายเคืองเกิดเป็นโรคผิวหนัง และต่อไปอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนัง เยื่อเมือกของผิวหนัง (Nucous Membrane) เมื่อสัมผัสกับฝุ่นผงหรือแก๊สจะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนนั้น นอกจากนี้ฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปอุดตันที่ปอด มีอาการคล้ายกับเป็นหวัดคัดจมูก ตา จะเกิดตาแดง ตาอักเสบ ระบบหายใจ สารหนูจะไปสะสมที่ปอด ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบอาจจะมีผลทำให้เกิดมะเร็งที่ปอด สารหนูเมื่อเข้าไปสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตจะมีผลต่อน้ำย่อย ที่ช่วยในการเมตาบอลิซึม ทำให้หน้าที่ในการทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ แขนขาชา อาจจะเป็นอัมพาต ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม โลหิตจาง (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2541)

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดปรอท

Quanmin Li et al. (1996) ศึกษาการเคลื่อนที่ของ Hg (II) ผ่าน Tri - *n* - octylamine (TOA) - Sorbital monoleate (Span 80) - toluene ซึ่งความสามารถของเยื่อแผ่นเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ HCl, KCl, TOA, Span 80 และ NaOH ในสารป้อนของเมมเบรนและสารละลายนำกลับ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดใน 0.1 M KCl, 2.5×10^{-2} M HCl, 1.5×10^{-2} M TOA, 3% (w/v) Span 80 และ 0.05 M NaOH ซึ่งในระบบนี้สามารถแยกปรอทจาก Cu,

Zn, Fe, Co, Ni, Pb, Mn, และ Cd ได้อย่างสมบูรณ์ กลไกการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะเกี่ยวข้องกับแอนไอออนโลหะ (HgCl_4^{2-}) โดยอาศัยโปรตอนจากโมเลกุล TOA ทางด้านสารป้อน การแพร่ผ่านเมมเบรน การสลายตัวขององค์ประกอบเชิงซ้อนทางด้านสารละลายนำกลับที่เป็นค่า และการแพร่กลับของโมเลกุล TOA

A. Safavi et al. (1998) Methyl Red เป็นตัวพาที่ดีในการเคลื่อนที่ของ Hg (II) ผ่านเยื่อแผ่นเหลว เมื่อมี Iodide เป็นตัวรับโลหะ และเมื่อมีกรดซัลฟิวริกเป็นเฟสรับ ปรีทสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ประมาณ 90 % หลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม Hg (II) สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเหลวได้ประมาณ 80% หลังจากผ่านไป 150 นาที ซึ่งตัวพาจะมีความจำเพาะในการเลือกและมีประสิทธิภาพในการพาไอออน Hg^{2+} เคลื่อนที่จากสารละลายของ Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ag^{2+} , Ni^{2+} , Al^{3+} , Na^+ , Pb^{2+} , Fe^{3+} และ Pd^{2+}

Mojtabo Shamsipar et al. (2001) ศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออน Hg^{2+} ผ่านเยื่อแผ่นเหลวโครโรฟอร์มซึ่งมี Tetrathia-12-crown-4 (TT12C4) เป็นไอออนตัวพา ไอออนปรีทสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเยื่อแผ่นเหลวเมื่อมีกรด Ethylenediaminetetraacetic (EDTA) เป็นสารนำกลับในเฟสรับ ซึ่งปรีทสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ $99 \pm 1\%$ เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารหนู

Maciej Wisniewski (1997) ศึกษาการสกัดอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) จากสารละลายกรดซัลฟิวริกในช่วงความเข้มข้น 50-200 g/l H_2SO_4 ด้วย Cyanex 923 ที่ละลายใน Exxol 220/230 (50% v/v) ซึ่ง Cyanex 923 สามารถสกัดได้ทั้ง อาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) โดยที่ประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน โดยมีน้ำเป็นสารนำกลับ

กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย (2000) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำจากหลุมแก๊สธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกรองเป็นเมมเบรนชนิด อัลตราฟิวเตรชั่น และ รีเวิร์สออสโมซิส นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ซึ่งใช้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำก่อนส่งเข้าหน่วยบำบัด จากการทดลองพบว่าเมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น สามารถลดปริมาณน้ำมันและสารปรอทในน้ำทิ้งได้มากกว่า 98% เมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส สามารถลดปริมาณสารหนูใน

น้ำทิ้งได้ 90-95% อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งจากการบำบัดยังมีคุณภาพไม่ดีพอตามค่ามาตรฐานของ บริษัทยูนิแคลที่กำหนดปริมาณสารหนูไม่เกิน 250 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) การใช้งานของ เมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น ถูกจำกัดโดยการสะสมตัวของปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่อุดตันเยื่อกรอง เมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส มีการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ นอกจากนี้ การทดสอบยังพบว่าเมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น สามารถให้ค่า การเลือกผ่าน (Permeability) มากกว่า 98% ของค่าตั้งต้น และเมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส ให้ค่าการเลือกผ่าน ประมาณ 50%

L.Iberhan et al. (2001) ศึกษาการสกัดอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) จากสารละลาย กรดซัลฟิวริกโดยใช้สารสกัด คือ Cyanex 925, Cyanex 301 และสารผสมระหว่างสารสกัดทั้งสอง ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการสกัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก โดยที่ประสิทธิภาพการสกัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน Cyanex 925 สามารถสกัดอาร์เซนิก (V) ได้ดีขณะที่ Cyanex 301 และสารสกัดผสมสามารถสกัดอาร์เซนิก (III) ได้ดี โดยมีกรดซัลฟิวริกช่วยในการสกัด สามารถนำกลับอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) จาก Cyanex 925 ด้วยน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับอาร์เซนิกจาก Cyanex 301 และสารผสมระหว่าง สารสกัดทั้งสอง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารละลายผสมของโลหะ

Liacono et al. (1986) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายผสมของไอออน ทองแดงและสังกะสี ด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับที่มีรูปแบบแตกต่างกัน (แผ่น แบนและทรงกระบอกหรือเส้นใยกลวง) สารละลายป้อนที่ใช้คือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulphate) และซิงค์ซัลเฟต (Zinc Sulphate) เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ประกอบด้วยสารสกัด Lix 64N ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ส่วนสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนั้นได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่ได้กับผลที่ได้ จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรณีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมี ความสอดคล้องกันมาก และยังสรุปได้ว่าการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแสดงถึง ความสำเร็จในการนำกลับโลหะมาใช้ใหม่ แม้กระทั่งเมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นสูง

Campderros, Acosta และ Marchese (1998) ศึกษาการถ่ายเทมวลและการแยกไอออนโลหะทองแดง Cu (II) นิกเกิล Ni (II) และสังกะสี Zn (II) ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งบรรจุด้วยสารสกัด Lix 864 ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ศึกษาผลการอัตราการไหลของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว และความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของไอออนทองแดง จากการศึกษาพบว่าสามารถนำกลับไอออนทองแดงได้มากที่สุดเมื่อใช้สารสกัด Lix 864 ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเมื่อสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 จะมีค่าการซึมผ่านของไอออนทองแดงลดลง แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสทำให้สกัดโคบอลต์ นิกเกิล และสังกะสีได้มากขึ้น โดยช่วงความเป็นกรด-เบสที่ให้ค่าการสกัดสูงสุดสำหรับโคบอลต์ คือ 3.5-6 สำหรับนิกเกิล คือ 5-6 และสำหรับสังกะสีคือมีความเป็นกรด-เบสมากกว่า 4.5 แต่ก็เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น ไอออนโลหะจะเกิดการตกตะกอนและขวางกั้นการสกัดได้ ความสามารถในการสกัดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ทองแดง > โคบอลต์ > นิกเกิล > สังกะสี

Rovira และ Sastre (1998) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการซึมผ่านของแพลเลเดียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดที่เป็น D2EHPA ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายเคโรซีน มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายจลนพลศาสตร์ของการถ่ายเทมวล ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นเร็วมาก ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถอธิบายถึงอัตราการถ่ายเทมวล ค่าการซึมผ่านของ Pd (II) ต่อ Fe (II) Pt (IV) Rh (III) และ Zn (II) จะมีค่าสูง สำหรับการศึกษาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวพบว่า เยื่อแผ่นเหลวมีความคงทนในระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นพบว่าเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดการเสื่อมสภาพ

วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา (1998) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับโซเดียมที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เตรียมจาก D2EHPA ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายป้อนเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสี 100 ในล้านส่วน และสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการ โดยไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงเมื่อความเข้มข้นเป็น 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในกรณีที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ในกระบวนการเพื่อทำให้ได้ประสิทธิภาพเท่ากันจะใส่สารสกัดเข้มข้นเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สัดส่วนของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อสารละลายป้อนที่เหมาะสมเท่ากับ

1:50 และอัตราการไหลสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดลง จากการศึกษาพบว่า อัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบประมาณ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

อิสรา เกษมเศรษฐ์ (1998) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในล้านส่วน รูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลของเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคของสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์และการไหลเวียน (Circulation) โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ เคโรซีน โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน และความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 รูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลของเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

ขวัญตา นัคราเรือง (2003) งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนทองแดงและโครเมียมจากสารละลายโลหะผสม (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 คอลัมน์ ซึ่งโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์แรกบรรจุด้วยสารสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัดไอออนทองแดง ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุด้วยสารสกัดอะลิควอดสำหรับการสกัดไอออนโครเมียม ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง จากผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในสารละลายป้อน คือ 2.5 และเมื่อปฏิบัติการให้ผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 1 รอบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จะให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเป็น 72.83 และ 88.04 ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละการนำกลับมีค่า 46.74 และ 75 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงเป็น 3 รอบ จะให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งได้ค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเป็น 77.17 และ 100 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการนำกลับมีค่า 50 และ 79.35 ตามลำดับ

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการสกัดและนำกลับโลหะแบบคัดเลือกของไอออนปรอทและสารหนูจากสารละลายโลหะผสม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่มี Tri - n - octylamine เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายโทลูอิน ซึ่งใช้สารสกัด TOA ในการสกัดปรอท

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 เพื่อศึกษาการสกัดแยกและการนำกลับไอออนปรอทและสารหนูจากสารละลายโลหะผสมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด TOA ที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอิน การปฏิบัติการเป็นแบบไหลสวนทางกัน
- 1.4.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอทและสารหนูจากสารละลายโลหะผสมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่
- (1) ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนในช่วง 0.05-0.8 โมลต่อลิตร
 - (2) ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายโทลูอินในช่วง 0.5-5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 - (3) ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 0.05-0.8 โมลต่อลิตร
 - (4) ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนในช่วง 1-50 ส่วนในล้านส่วน
 - (5) ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวที่มีต่อการสกัดแยกไอออนโลหะ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ทราบวิธีการและกลไกการสกัดไอออนโลหะจากสารละลายโลหะผสมโดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.5.2 ทราบปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดและนำกลับไอออนโลหะจากสารละลายโลหะผสมโดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และภาวะที่เหมาะสม
- 1.5.3 สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อน



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

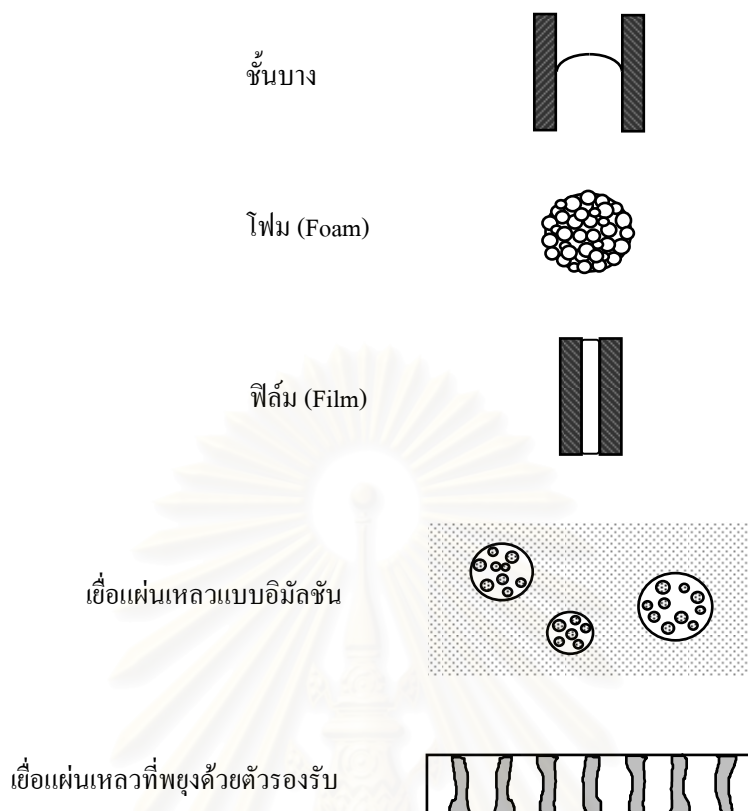
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) นั้นประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่

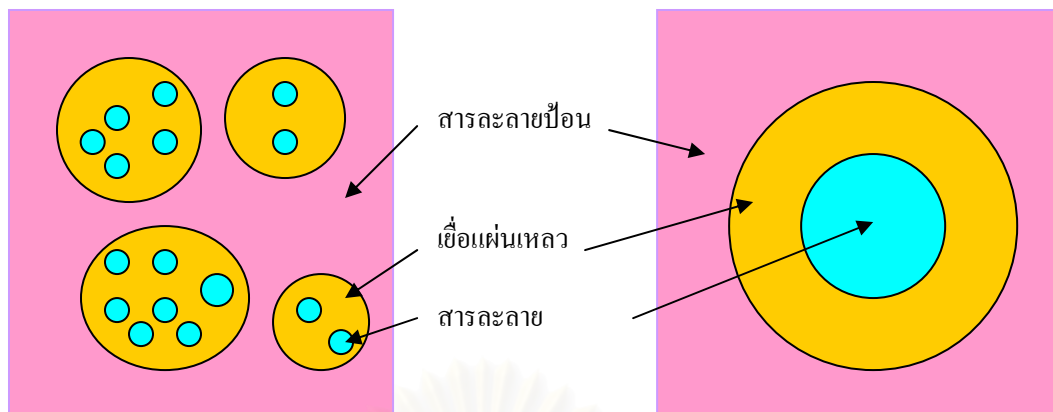
1. ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกละลายอยู่
2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบด้วยสารสกัด (Extractant) ละลายในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์ (Organic Phase)
3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (Stripping Phase) ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารละลายป้อน ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในรูปที่ละลายได้ไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบของสารที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้ดังรูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ ทั้งนี้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz, 1988)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำเอาระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปแบบหนึ่งซึ่งเราเรียกว่าแบบอิมัลชัน ในแบบนี้สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) ดังรูป 2.2 และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทองค์ประกอบดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2 ส่วนสารละลายนำกลับนั้นจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที่ดังรูป 2.2 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใส่ลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น จากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายป้อนตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (Double Emulsion) กระบวนการแยกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และไอออนไฮโดรเนียม สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดกลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยาองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป เมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ แล้วจึงนำไปแยกสารละลายป้อน (ที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้ว) ให้ออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันสุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในสารอินทรีย์ (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ

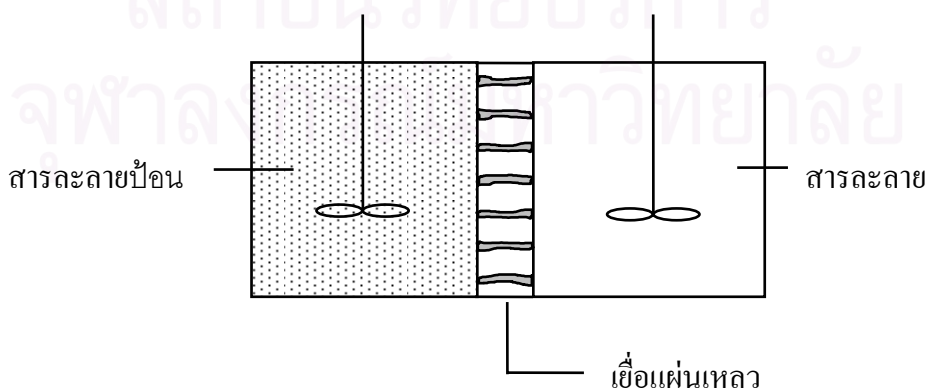
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของสารอินทรีย์ในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นสารอินทรีย์

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ จะใช้ตัวรองรับที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุน โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary Force) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988) ตัวรองรับมีหลายแบบ ได้แก่ แบบแผ่นแบน (Flat Sheet) แบบแผ่นม้วน (Spiral Wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้างคือมีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำและมีการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลว (O'Hara, 1989; Shiao และ Chen, 1993)

2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane)

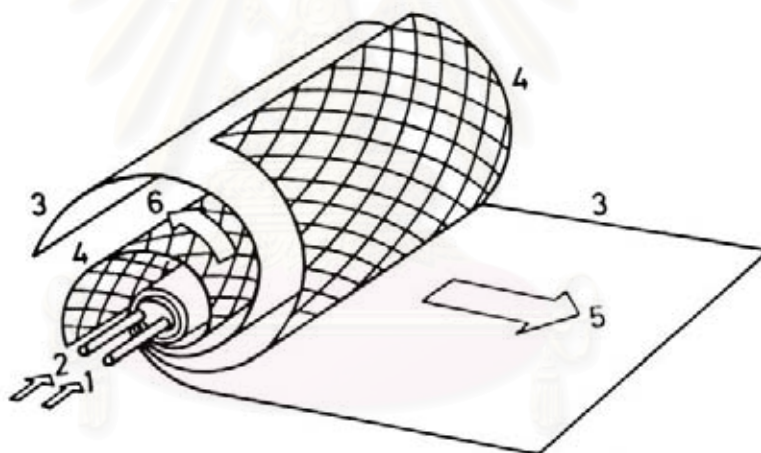
เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนแสดงดังรูปที่ 2.3 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Spiral-Type Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อนำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (Epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (Raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้ (Strip) จะไหลออกจากท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน

หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ

หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว

หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น

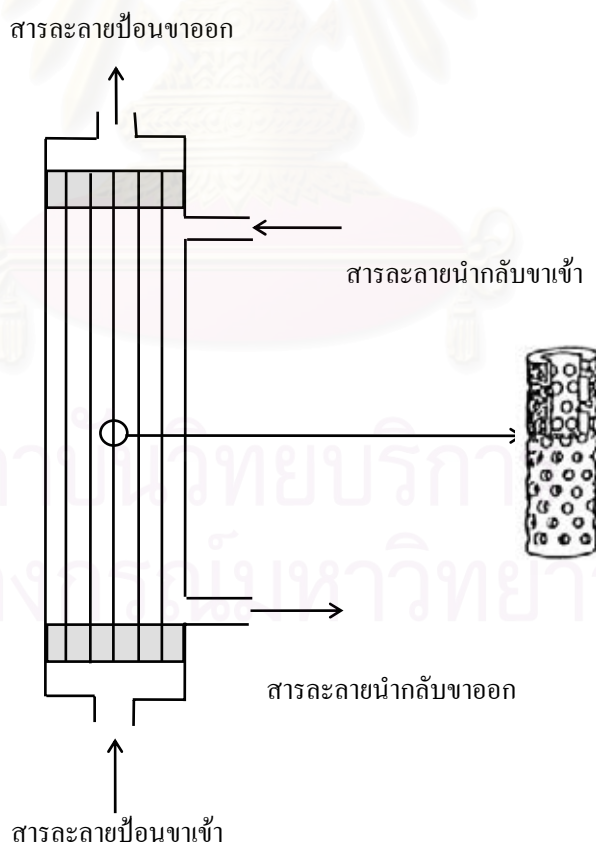
หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน

หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับ

2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane: HFSLM)

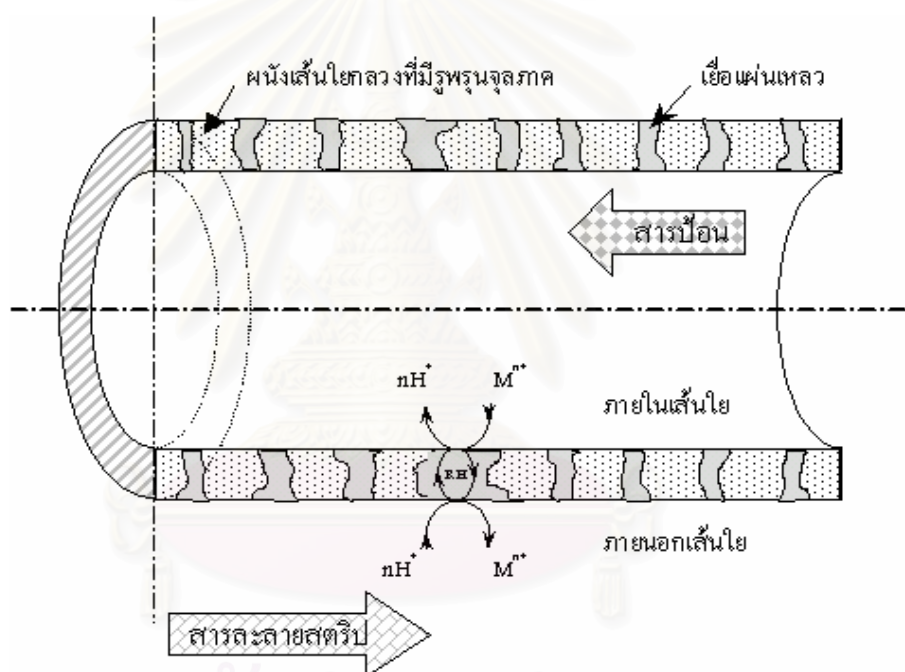
Membrane: HFSLM)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอกจากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (Resin) ดังรูปที่ 2.5 ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงฝั่งท่อ (Tube Side) หรือฝั่งเปลือก (Shell Side) แล้วแต่จะทำให้สายใดอยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับฝั่งท่อและฝั่งเปลือก ลักษณะการไหลของสายป้อนและสายนำกลับนั้นสามารถทำได้ 2 แบบ คือ ไหลแบบไปทางเดียวกันและแบบสวนทางกันดังรูปที่ 2.6 แสดงการไหลของสายป้อนและสายนำกลับภายในท่อซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.5 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)

การเตรียมกระบวนการเชื่อมแผ่นเหล็กที่พองด้วยตัวรองรับทำโดยนำเชื่อมแผ่นเหล็กมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเชื่อมแผ่นเหล็กพองด้วยตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มากั้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเชื่อมแผ่นเหล็ก ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเชื่อมแผ่นเหล็กเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเชื่อมแผ่นเหล็กที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเชื่อมแผ่นเหล็กที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเชื่อมแผ่นเหล็กที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ข้อดีของกระบวนการเชื่อมแผ่นเหล็กแบบมีตัวรองรับ

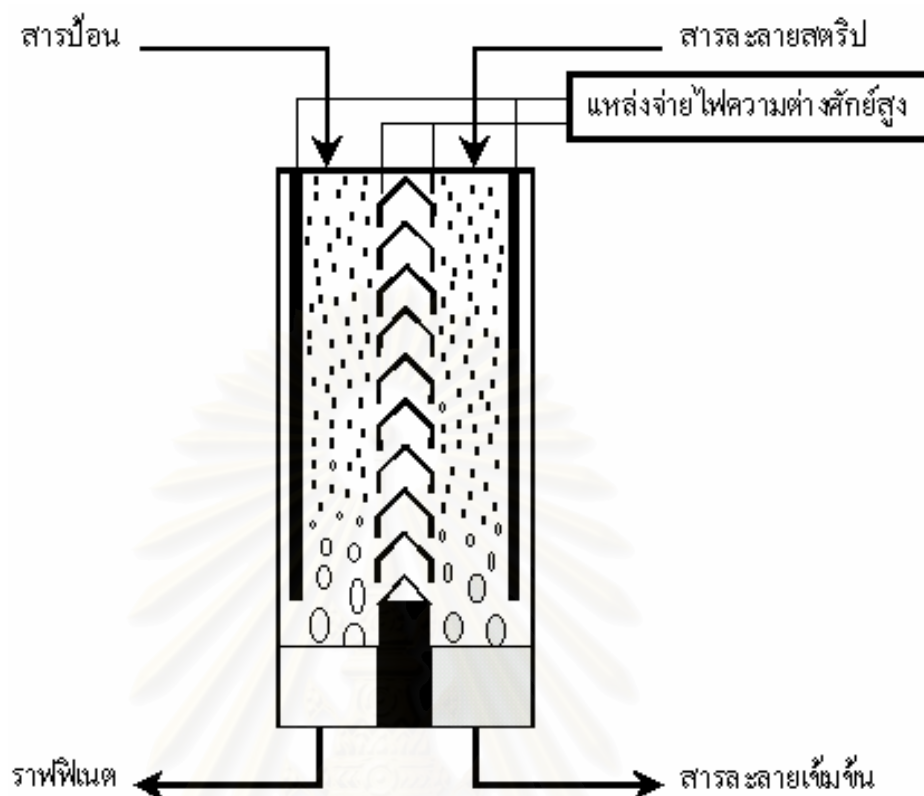
- มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกสูง

- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- สามารถที่จะใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงได้
- สามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang and Cussler, 1986; Dahuron and Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi and Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) ในงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวรองรับประเภทนี้

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo-Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด) หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น ลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 2.7 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo-Liquid Membrane)

จากรูปที่ 2.7 ชุดอุปกรณ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle Plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V ค้ำเรียงต่อกันเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากัน โดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่บดสำหรับแบ่งกั้นวัฏภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (Raffinate) กับสารละลายนำกลับขาออกในเซลล์สกัด และเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต ขั้นตอนการทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้อจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตจากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตก

ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวิญภาค เกิดการสัดแยกและนำกลับออกตามกลไกการสัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิต เป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการสัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวิญภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกั้นวิญภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวิญภาคของสารละลายมีรูปทรงยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวิญภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของวิญภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตจะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวิญภาคของสารละลายกับวิญภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้วิญภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของวิญภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้นรวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันเป็นตามเดิม (Gu, 1990)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุไลมาน, 2544)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง - มีกำลังการผลิตสูง - กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง - ใช้พลังงานสูง - มีปัญหาการปนเปื้อน - ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าการคัดเลือกสูง - ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว - ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ - ใช้พลังงานต่ำ - ขยายขนาดง่าย - อัตราการถ่ายเทมวลสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ - เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ - การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีเสถียรภาพสูง - ประสิทธิภาพสูง - การปนเปื้อนต่ำ - ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว 	<ul style="list-style-type: none"> - กำลังการผลิตต่ำ - สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ - สารอินทรีย์ต้องเป็นวิญภาคต่อเนื่องเท่านั้น - ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มาก เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น ดังนั้น การสกัดแยกด้วยเทคนิคต่างๆ มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะของงานใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

2.2 กลไกการถ่ายเทมวล

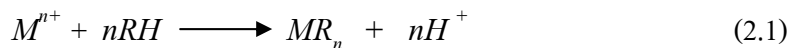
ในการถ่ายเทมวลที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลที่เรียกว่า การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ คือ กระบวนการถ่ายเทของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบอีกชนิดหนึ่ง (ไม่ใช่องค์ประกอบที่เราต้องการจะแยก) ดังนั้นเราจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่เราต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นทางด้านของสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน

การถ่ายเทแบบควบคู่สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเชิงซ้อนกับสารซึมผ่าน

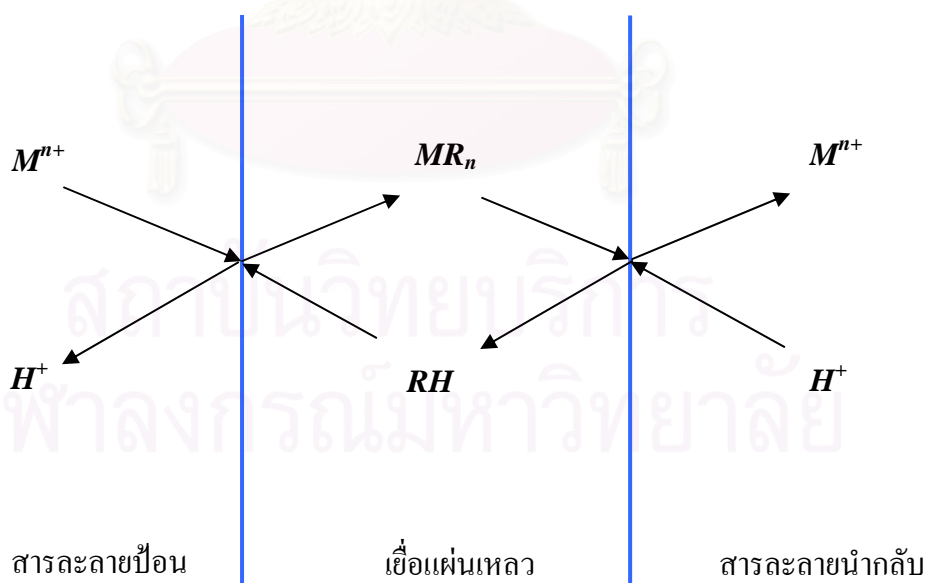
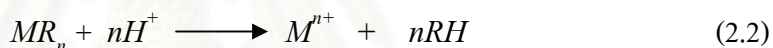
2.2.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)

การถ่ายเทแบบสวนทาง คือ การถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนโลหะ (M^{n+}) และไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้

ไอออนโลหะ (M^{n+}) ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัดกรด (RH) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และไอออนไฮโดรเนียม (H^+) อยู่ในสารละลายป้อน ดังสมการ



สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) จะทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัด (RH) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทแบบสวนทาง

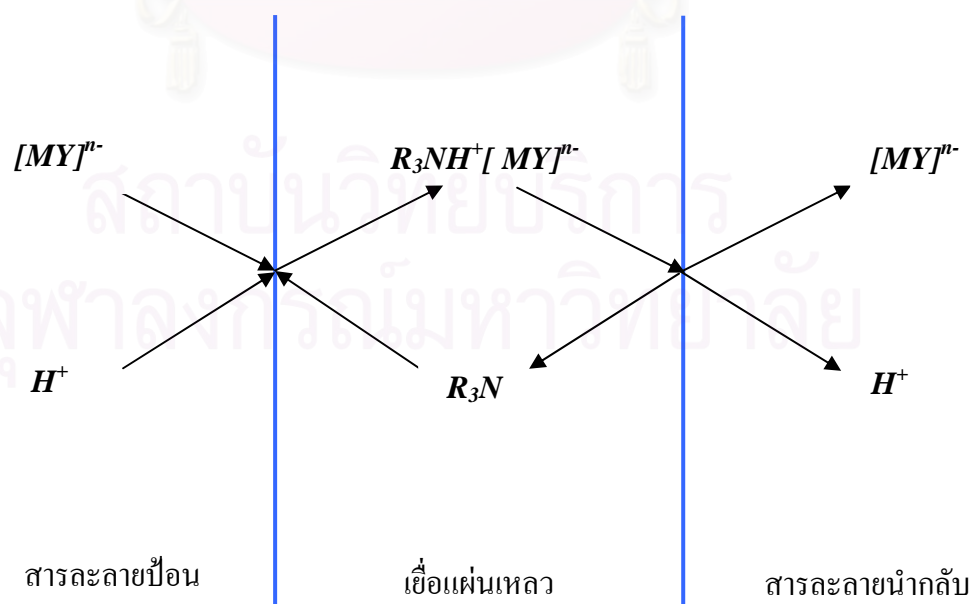
2.2.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน คือ การถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนโลหะ (M^{n+}) และไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้

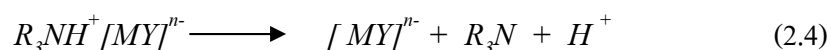
ไอออนโลหะในรูปประจุลบ $[MY]^{n-}$ ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดที่เป็นเบส (R_3N) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ที่อยู่ในสารละลายป้อน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ดังสมการ



สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) จะเกิดปฏิกิริยานำกลับได้เป็นไอออนไฮโดรเนียมและไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน



ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

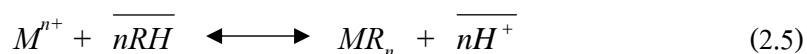
- การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
- การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
- การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides et al., 1987) ดังนี้

2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อย คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนประเภทคีเลต สารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ตั้งสมการ



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึง สารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเข้มข้นของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids ; D2EHPA)

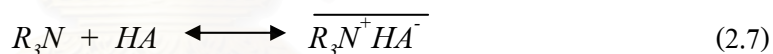
สารสกัดประเภทคีเลต ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยหมู่ที่ให้ไอออนลบ (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเตต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียง 2 ประเภท คือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

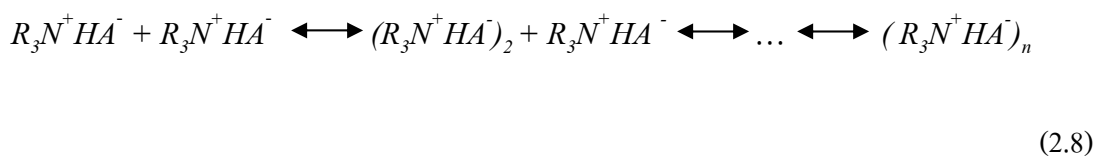
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic Species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



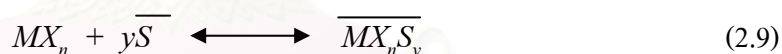
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ MY^{-n} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุตั้งสมการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้อเอมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ



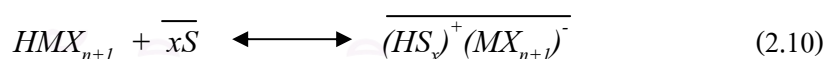
การเกิดวิฤภาคที่สามทำให้วิฤภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

2.3.3 สารสกัดชนิดซอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทซอลเวท หรือสารสกัดประเภทกลาง (Neutral Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบ จึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวิฤภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวิฤภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวิฤภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดซอลเวทดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ศึกษาการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

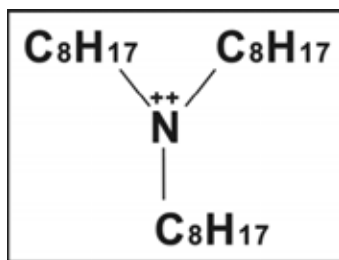
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1 น้ำที่ใช้เป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน (Deionized Water) สารเคมีที่ใช้อื่น ๆ เป็นเกรดการวิเคราะห์ (Analytical Reagent Grade)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
ไอออนโลหะ	Mercury (II) Chloride	HgCl ₂	Polskie Odczynniki Chemiczne SA
	Arsenic Trioxide	As ₂ O ₃	Merck Ltd.
สารละลายป้อน	Hydrochloric Acid	HCl	Merck Ltd.
สารสกัด	Tri- <i>n</i> -octylamine (TOA)	C ₂₄ H ₅₁ N	Merck Ltd.
ตัวทำละลายอินทรีย์	Toluene	C ₇ H ₈	Fisher Scientific UK Ltd.
สารละลายนำกลับ	Sodium Hydroxide	NaOH	Merck Ltd.

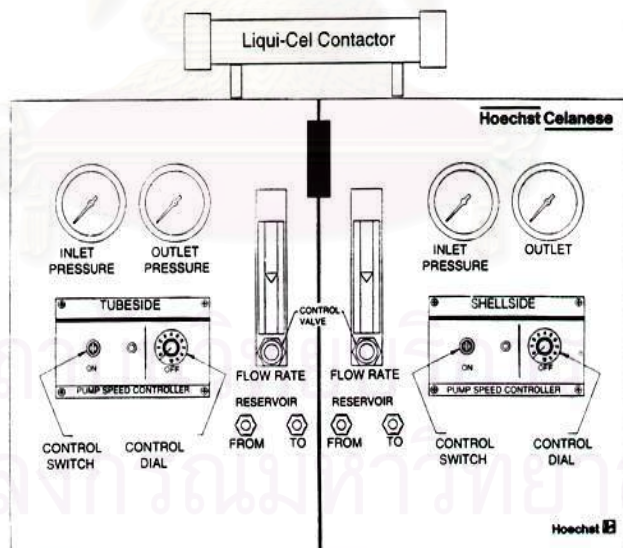
สารสกัด Tri-*n*-octylamine (TOA) ที่ใช้ในการทดลองมีสูตรโครงสร้างดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สูตร โครงสร้างของสารสกัด Tri-*n*-octylamine (TOA)

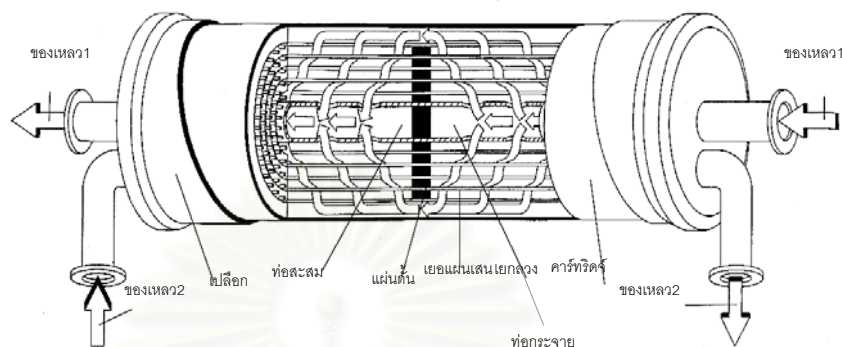
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

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



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็น โมดูลของเส้นใยกลวงดังรูปที่ 3.3 และมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Contactor ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 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 x ยาว)	6.3 x 20.3 cm (2.5 x 8 inch)
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 kg/cm ²
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการ	1-60 °C

2. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer Perkin Elmer Model PLASMA-1000 ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนู มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทและสารหนู ความเข้มข้นอย่างละ 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เท่ากับความเข้มข้นที่พบในบริเวณอ่าวไทย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.05 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลางคอลัมน์ดังนี้
สารละลายผสมของสารสกัด TOA ในโทลูอีน ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลางในชุดทดลอง
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลาง โดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอท และสารหนู ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer

3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนู มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทและสารหนู ความเข้มข้นอย่างละ 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เท่ากับความเข้มข้นที่พบในบริเวณอ่าวไทย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยก

ไอออนปรอทและสารหนูที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์

- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลางคอลัมน์ดังนี้
สารละลายผสมของสารสกัด TOA ในโทลูอีน ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลางในชุดทดลอง
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลาง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในโทลูอีนที่ใช้ในโมดูลเส้นใยกลางเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer

3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนู มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทและสารหนู ความเข้มข้นอย่างละ 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เท่ากับความเข้มข้นที่พบในบริเวณอ่าวไทย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลางคอลัมน์ดังนี้

สารละลายผสมของสารสกัด TOA ในโทลูอีน ความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูปพูนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง

- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอท และสารหนู ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer

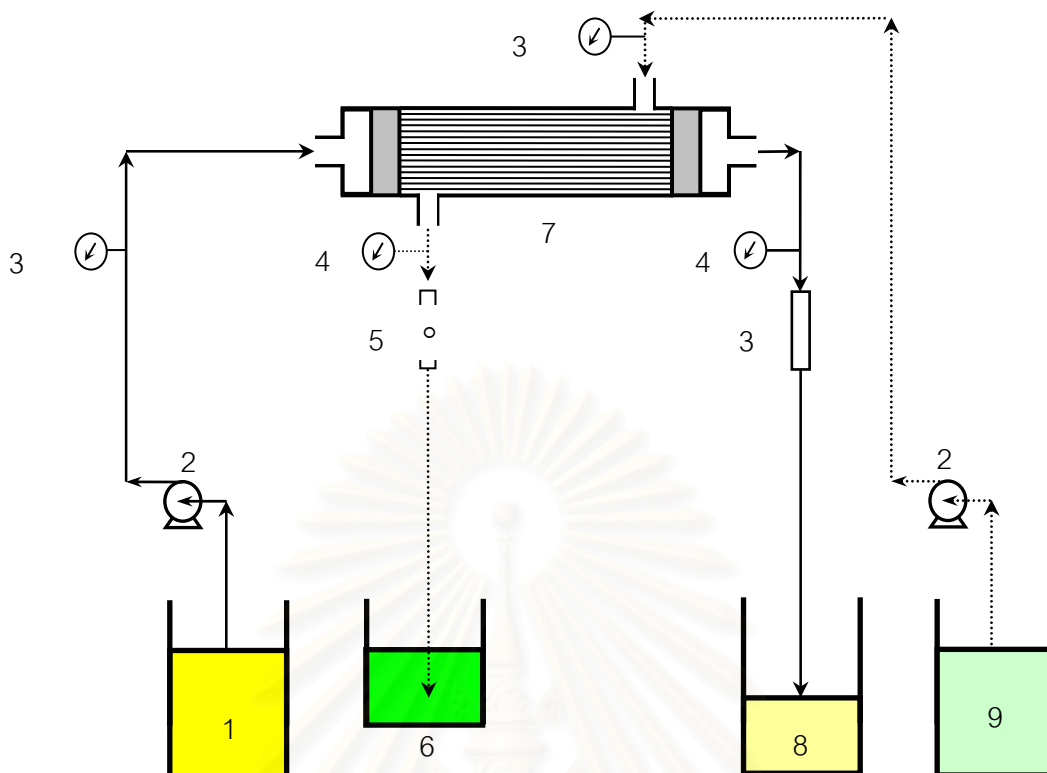
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนู มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทและสารหนู ความเข้มข้นอย่างละ 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกสารปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.3 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ดังนี้ สารละลายผสมของสารสกัด TOA ในโทลูอีนเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูปพูนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูเป็นความเข้มข้นละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ตามลำดับ

- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอท และ สารหนู ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer

3.3.5 ศึกษาผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนู มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทและสารหนู ความเข้มข้นอย่างละ 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เท่ากับความเข้มข้นที่พบในบริเวณอ่าวไทย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยก ไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.3 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ดังนี้
สารละลายผสมของสารสกัด TOA ในโทลูอีน ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกทุกๆ 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอทและ สารหนู ด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer



รูปที่ 3.4 การปฏิบัติการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-Through Mode) โดยที่

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1 = ถังของสารป้อนขาเข้า | 6 = ถังของสารละลายนำกลับขาออก |
| 2 = เครื่องสูบล | 7 = ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง |
| 3 = เกจวัดความดันขาเข้า | 8 = ถังของสารป้อนขาออก |
| 4 = เกจวัดความดันขาออก | 9 = ถังของสารละลายนำกลับขาเข้า |
| 5 = มาตรวัดอัตราการไหล | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวง

ในขั้นตอนการทดลองจะต้องมีการทำความสะอาดเครื่องมือและตัวรองรับเส้นใยกลวงทุกครั้งหลังจากทำการทดลอง เนื่องจากสารเคมีหรือสิ่งสกปรกต่างๆ สามารถเข้าไปอุดตันในรูพรุนเส้นใยกลวงได้ง่าย และจะขวางกั้นการไหลของสารละลายได้ ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวง ประมาณ 10-15 นาที
- 2) เลือกใช้ตัวทำละลายที่สามารถละลายสารที่อุดตันในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้กรดฟอสฟอริกผสมกับกรดไนตริกในสัดส่วนโดยปริมาตร 2 : 3 ให้ไหลวนในโมดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 15-30 นาที
- 3) ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวง ประมาณ 10-15 นาที จนแน่ใจว่าสามารถกำจัดตัวทำละลายในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้หมด
- 4) หลังจากการทำความสะอาดแล้วต้องทำให้เส้นใยกลวงแห้ง โดยให้อากาศไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวง หรืออาจจะใช้ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ไหลวนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เส้นใยกลวงแห้งเร็วยิ่งขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับไอออนปรอทจากสารละลายโลหะผสม โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ความเข้มข้นกรดในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ความเข้มข้นของสารป้อน และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว

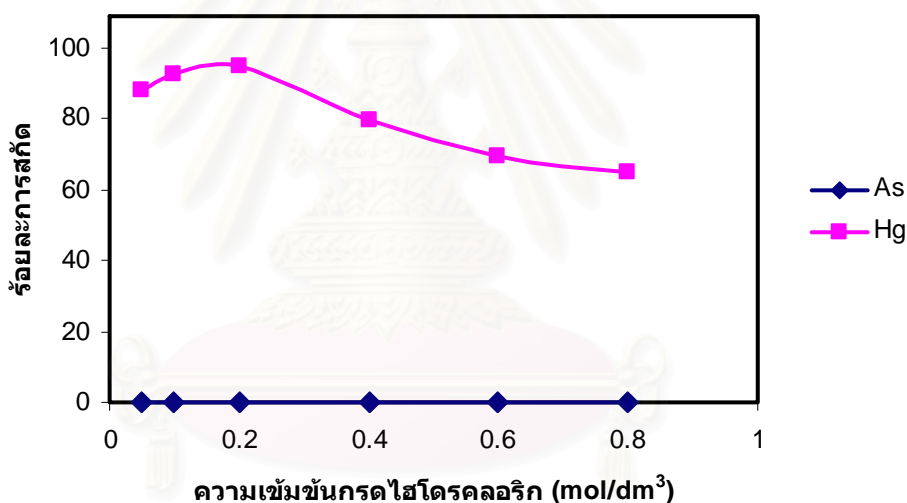
การสกัดไอออนปรอทและสารหนูนั้น เมื่อพิจารณาในโมดูลเส้นใยกลวงซึ่งบรรจุสารสกัด TOA จะพบว่าไอออนปรอทเท่านั้นที่จะเกิดกระบวนการสกัดและนำกลับ เนื่องจากสารสกัด TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่มีประจุลบ ซึ่งไอออนปรอทเท่านั้นที่จะแตกตัวให้ประจุลบ (HgCl_4^{2-}) ในขณะที่ไอออนของสารหนู (H_3AsO_3) จะอยู่ในรูปที่เป็นกลาง (Ioannis and Anastasios, 2002) เป็นเหตุให้ไอออนของสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ ปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับของไอออนปรอท (Quanmin Li, 1996) แสดงดังสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



โดย R_3N คือสารสกัด TOA เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น TOA ต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเกลือเอมีนที่เหมาะสม นั่นคือ TOA จะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $\text{R}_3\text{NH}^+\text{Cl}^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ (4.1) เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่มีไอออนโลหะ HgCl_4^{2-} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ 4.2 หลังจากนั้นเกิดการนำกลับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการที่ 4.3 ได้ไอออนโลหะมาสู่สารละลายนำกลับและสารสกัดเพื่อนำไปใช้ในการสกัดต่อไป การถ่ายเทมวลนั้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับไอออนไฮโดรเนียมจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแรงขับในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียมนั่นเอง

4.1 ผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นกรดในสารละลายป้อนเป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลต่อลิตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนมีค่า 20 ppm โดยโมดูลเส้นใยกลวงบรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายโทลูอิน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

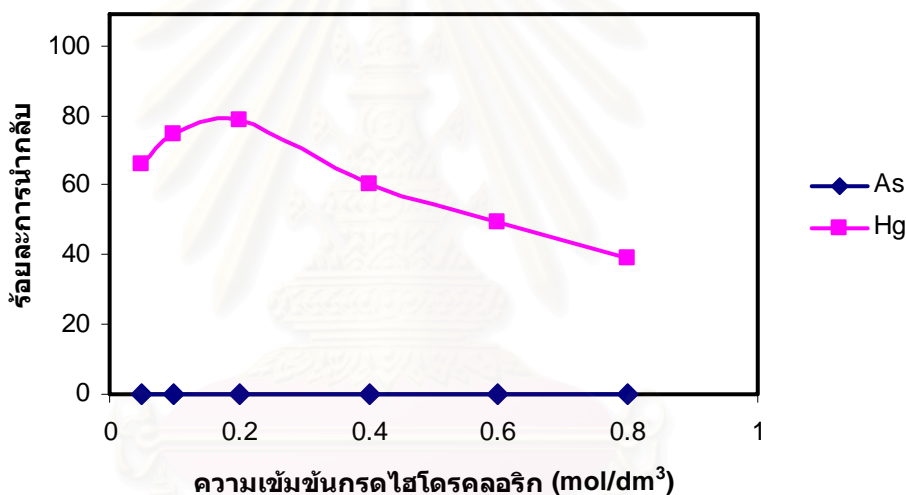


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[TOA]_M = 1\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.1$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเกิดการสกัดและนำกลับเฉพาะไอออนปรอทเท่านั้น โดยเมื่อความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนสูงขึ้น ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.2 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดต่ำลงสามารถอธิบายผลการทดลองด้วยสมการที่ 4.1

เมื่อความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.2 โมลต่อลิตร การสกัดปรอทจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ทำให้เกิดการรวมตัวกับ TOA ได้เกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ $R_3NH^+Cl^-$ เพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ร้อยละการสกัดสูงขึ้น

ส่วนในกรณีที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนมีค่ามากกว่า 0.2 โมลต่อลิตร การสกัดปรอทจะมีค่าลดลง เนื่องจาก TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสจะสามารถทำการสกัดไอออนโลหะได้ดีที่ภาวะความเป็นกรดไม่สูง (Pancharoen et al., 2005) ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ร้อยละการสกัดลดลง นอกจากนี้ผลต่างของความเป็นกรด-เบสระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายนำกลับถือเป็นแรงขับที่สำคัญต่อกลไกการถ่ายเทมวลของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[TOA]_M = 1\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.1$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

ส่วนค่าร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับร้อยละการสกัด เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการสกัดแยกสารละลายผสมของปรอทและสารหนู คือ 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งมีค่าร้อยละการสกัดและนำกลับเป็น 95.04 และ 78.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าพลาซซ์ค่าการซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การแยก จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลต่อลิตร จะให้ค่าต่างๆ สูงสุด

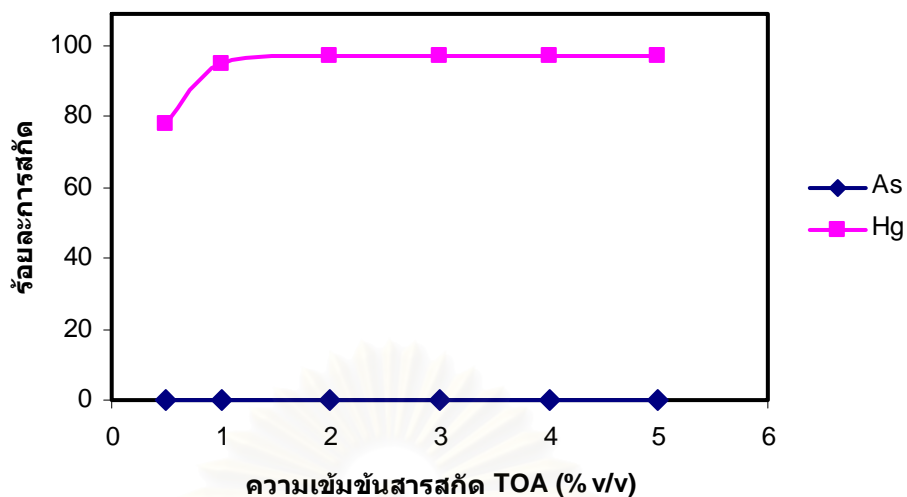
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกไอออนโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน

HCl (M)	ฟลักซ์ (mol/m ² min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
	J _{Hg} x 10 ⁶	J _{As}	P _{Hg} x 10 ⁵	P _{As}	$\alpha_{\text{Hg/As}}$	$\alpha_{\text{As/Hg}}$
0.05	6.31	0	6.29	0	∞	0
0.1	6.67	0	6.6	0	∞	0
0.2	6.69	0	6.79	0	∞	0
0.4	5.71	0	5.7	0	∞	0
0.6	4.91	0	4.98	0	∞	0
0.8	4.60	0	4.64	0	∞	0

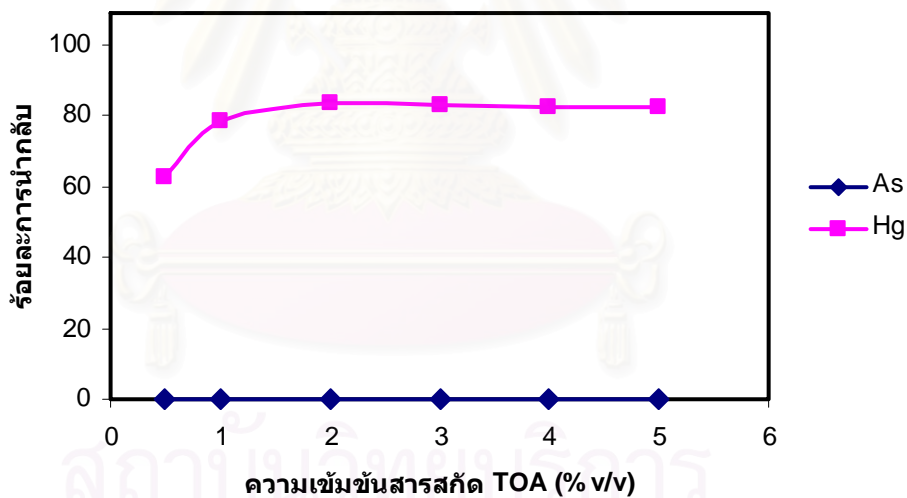
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาปัจจัยเรื่องความเข้มข้นของสารสกัดนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการดำเนินการ โดยคำนึงถึงค่าร้อยละการสกัดและนำกลับโลหะที่ได้

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารสกัด TOA ต่อการแยกไอออนปรอทและสารหนู ทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารสกัด TOA ในตัวทำละลายโทลูอินที่บรรจุในโมดูลเส้นใยกลวงเป็น 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนมีค่า 20 ppm ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.2 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[NaOH]_S = 0.1$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิกรัมต่ออนาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[NaOH]_S = 0.1$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิกรัมต่ออนาที

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด TOA ในโมดูลเส้นใยกลวง พบว่าร้อยละการสกัดและน้ำหนักของไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA จาก 0.5 จนถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากเมื่อพิจารณาสมการที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นสารสกัด ($R_3NH^+Cl^-$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ เกิดการสกัดไอออนปรอทมากขึ้น หรือก็คือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนปรอท ($(R_3NH)_2 HgCl_4$) มากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาการนำกลับด้วยสมการที่ 4.3 ถ้าสารประกอบเชิงซ้อนนี้มากขึ้นจะเกิดการนำกลับมากขึ้นเช่นกัน สำหรับไอออนสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับดังกล่าวไว้ข้างต้น

เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าร้อยละการสกัดและน้ำหนักไอออนปรอทจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น (Luccio et al., 2000) ทำให้ขวางกั้นการถ่ายเทมวลไอออนปรอทจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายเยื่อแผ่นเหลว หรือก็คือจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีค่าน้อยลง ดังสมการของ Nernst ดังนี้

$$D = \frac{RT}{6\Pi\eta r} \quad (4.4)$$

เมื่อ R = ระยะทางในการแพร่
 T = อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
 Π = ค่าคงที่ในสมการมีค่า 3.14
 η = ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
 r = ขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน

นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการสกัดและนำกลับไอออนคงที่ อาจเนื่องมาจากขีดจำกัดของรูพรุนจุลภาคเส้นใยกลวงซึ่งมีผลต่อการจำกัดพื้นที่ในการถ่ายเทมวล กล่าวคือเส้นใยกลวงสามารถบรรจุสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้ในปริมาณจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แม้เพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวก็ไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกไอออนโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในโมดูลเส้นใยกลวง

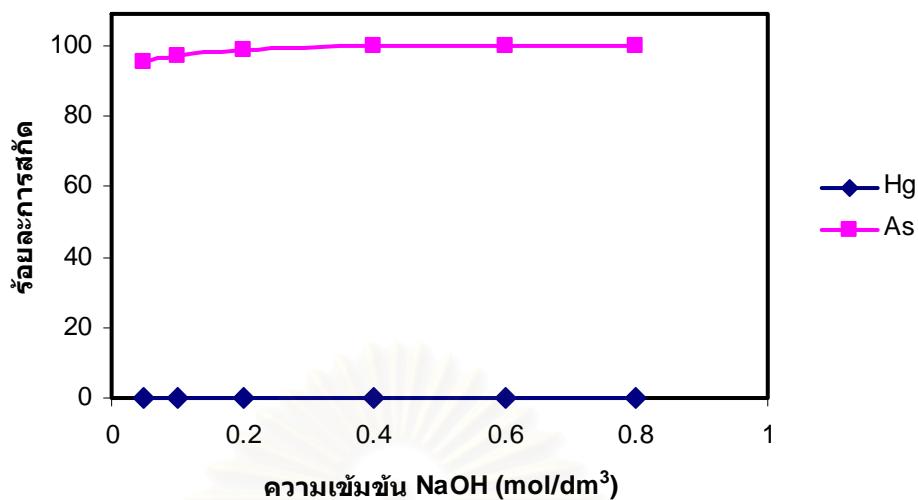
TOA (% v/v)	ฟลักซ์ (mol/m ² min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
	$J_{\text{Hg}} \times 10^6$	J_{As}	$P_{\text{Hg}} \times 10^5$	P_{As}	$\alpha_{\text{Hg/As}}$	$\alpha_{\text{As/Hg}}$
0.5	5.44	0	5.55	0	∞	0
1	6.69	0	6.79	0	∞	0
2	6.81	0	6.95	0	∞	0
3	6.90	0	6.92	0	∞	0
4	6.92	0	6.93	0	∞	0
5	6.85	0	6.93	0	∞	0

จากตารางที่ 4.2 ค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของไอออนปรอทจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากขีดจำกัดในการถ่ายเทมวลดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์คือราคาของสารสกัด ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัด TOA ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการทดลองค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทเท่ากับ 97.25 และ 83.83 ตามลำดับ

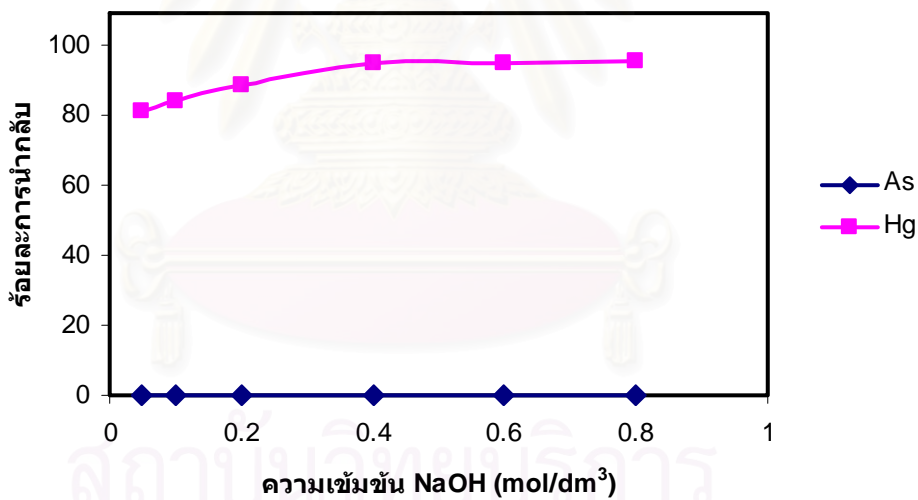
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองของสารสกัดข้างต้น โดยเลือกใช้ปริมาณสารสกัดที่ทำให้เกิดค่าร้อยละการสกัดสูงสุด

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลเส้นใยกลวงทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเป็น 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนมีค่า 20 ppm ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์บรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการสกัดไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.05 จนถึง 0.4 โมลต่อลิตร พบว่าค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาการนำกลับจากสมการที่ 4.3 ที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น หรือการนำกลับมากขึ้น ซึ่งการนำกลับที่ดีขึ้นนี้จะส่งผลให้การสกัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของโมดูลเส้นใยกลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทมวลที่จำกัด พิสูจน์ได้จากค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านจากตารางที่ 4.3 สำหรับไอออนสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับดังกล่าวไว้ข้างต้น

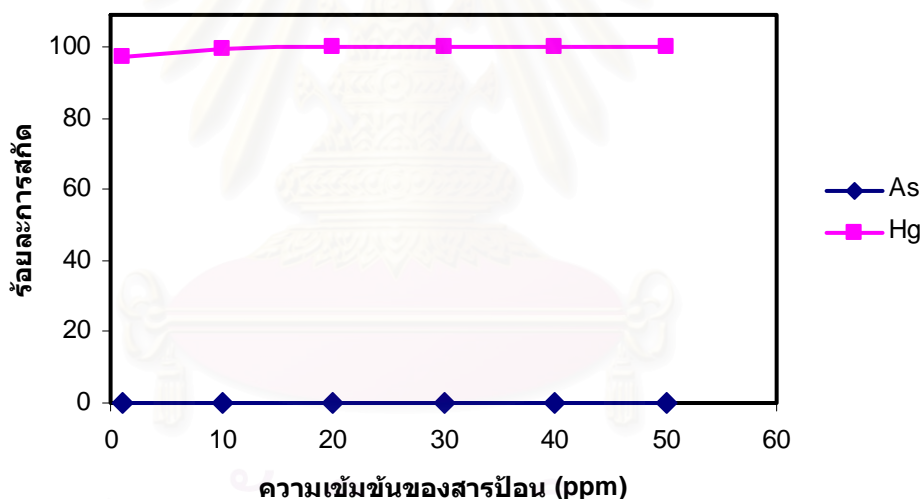
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกไอออนโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลเส้นใยกลวง

NaOH (M)	ฟลักซ์ (mol/m ² min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
	J _{Hg} x 10 ⁶	J _{As}	P _{Hg} x 10 ⁵	P _{As}	α _{Hg/As}	α _{As/Hg}
0.05	6.80	0	6.79	0	∞	0
0.1	6.81	0	6.94	0	∞	0
0.2	7.08	0	7.06	0	∞	0
0.4	7.24	0	7.14	0	∞	0
0.6	7.22	0	7.14	0	∞	0
0.8	7.21	0	7.14	0	∞	0

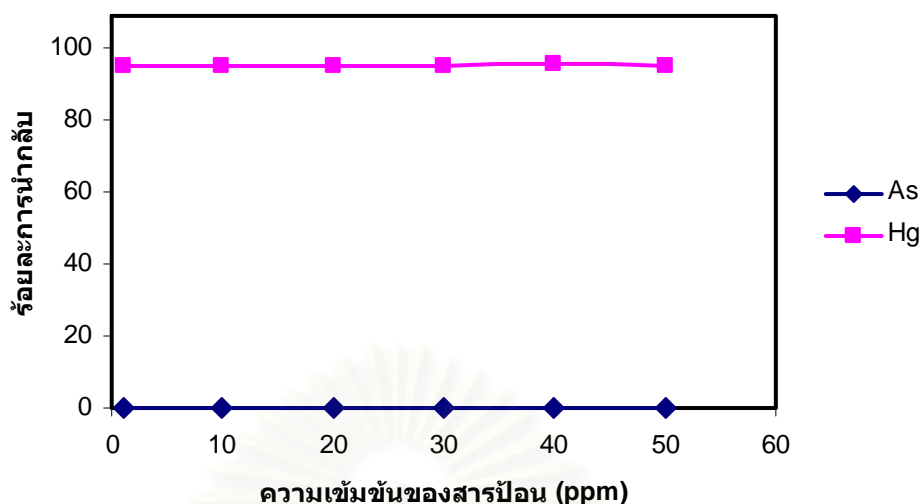
จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของไอออนปรอทมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.1 จนถึง 0.4 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.3 ร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทจากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการใช้ศึกษา คือ 0.4 โมลต่อลิตร โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทเป็น 100 และ 94.98 ตามลำดับ

4.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง ทำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูเป็น 1, 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) โดยโมดูลเส้นใยกลวงบรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนโลหะ เมื่อ $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.4$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อ นาที

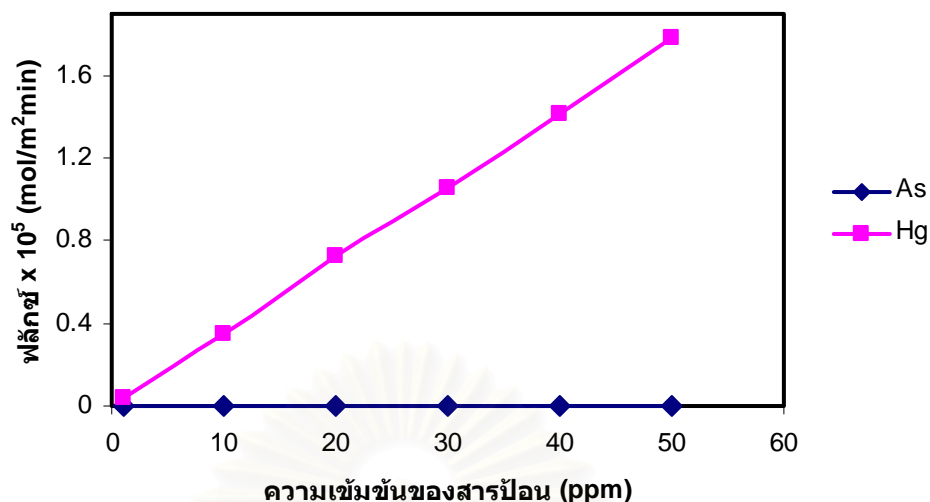


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนโลหะ เมื่อ $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.4$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในช่วงที่ทำการทดลองค่อนข้างจะไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ แต่จะมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟลักซ์ของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุ่งด้วยเส้นใยกลางจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนน้อยมากๆ (Rovira และ Sastre, 1988) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกไอออนโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายป้อน

Hg/As (ppm)	ฟลักซ์ (mol/m ² min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
	$J_{Hg} \times 10^6$	J_{As}	$P_{Hg} \times 10^5$	P_{As}	$\alpha_{Hg/As}$	$\alpha_{As/Hg}$
1	0.04	0	7.14	0	∞	0
10	0.35	0	7.14	0	∞	0
20	7.24	0	7.14	0	∞	0
30	1.06	0	7.14	0	∞	0
40	1.42	0	7.14	0	∞	0
50	1.79	0	7.14	0	∞	0

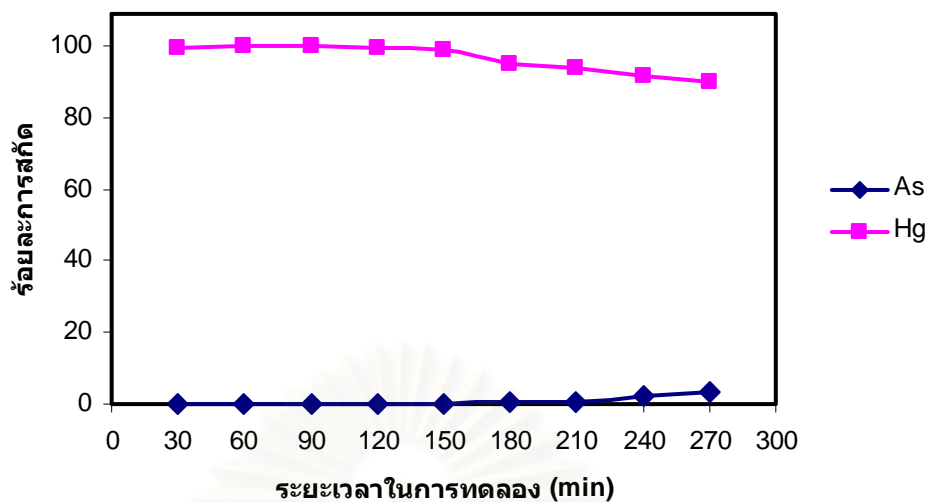


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายปรอทกับค่าฟลักซ์ เมื่อ $[\text{HCl}]_F = 0.2 \text{ M}$, $[\text{TOA}]_M = 2\% \text{ v/v}$, $[\text{NaOH}]_S = 0.4 \text{ M}$ และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

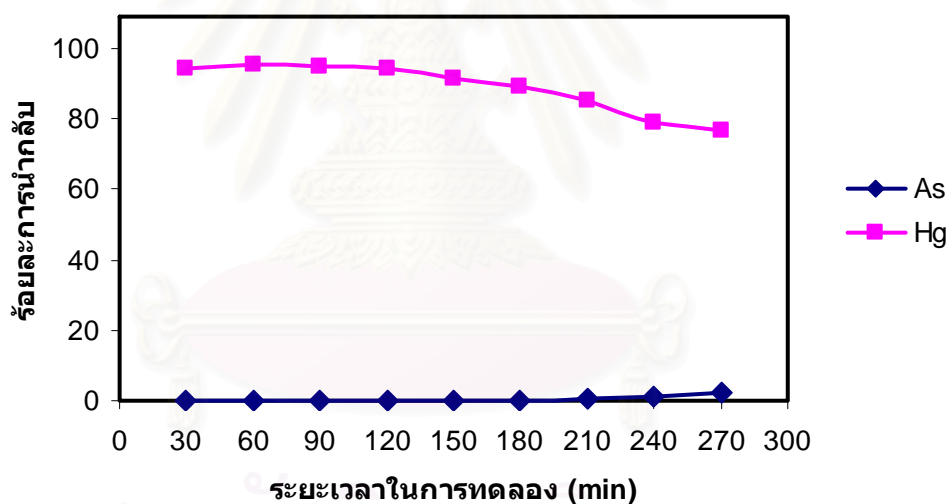
4.5 ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ทำโดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) โดยโมดูลเส้นใยกลวงบรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอิน และใช้ไซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายนำกลับ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3) อัตราการไหลของสารละลายปรอทและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าในช่วงระยะเวลา 120 นาทีแรก ร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทค่อนข้างคงที่ ส่วนไอออนสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ แต่หลังจาก 120 นาที พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลวจากการสะสมของไอออนปรอททำให้พื้นที่ผิวในการสกัดลดลง ส่วนไอออนสารหนูเริ่มเกิดการสกัดและนำกลับเนื่องจากเกิดการหลุดของเยื่อแผ่นเหลวที่ตรึงอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสกัดแยกปรอทออกจากสารหนูลดลง ดังนั้นอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวที่จะให้ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนปรอทและสารหนูในภาวะที่ทำการทดลองได้ดีที่สุด คือ ไม่เกิน 120 นาที



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัด เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.4$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับ เมื่อ $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 2\%$ v/v, $[NaOH]_S = 0.4$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการสกัดไอออนปรอทและสารหนู โดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง สารละลายป้อนที่ใช้คือ สารละลายที่มีไอออนของปรอทและสารหนู ชนิดละ 20 ppm ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว โดยอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การปฏิบัติการเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว ในทิศทางสวนทางกัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดลองพบว่า สารสกัด TOA เกิดการสกัดและนำกลับเฉพาะไอออนปรอท ส่วนไอออนสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ ทำให้ไอออนสารหนูเท่านั้นที่ยังคงอยู่ในสารละลายป้อนขาออก ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสามารถแยกไอออนโลหะทั้งสองชนิดออกจากกันได้
2. เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนในช่วง 0.05 ถึง 0.8 โมลต่อลิตร โดยให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่า ค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสม คือ 0.2 โมลต่อลิตร โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทสูงสุด
3. ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA สำหรับการสกัดไอออนปรอท ศึกษาผลในช่วงความเข้มข้น 0.5 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่า เมื่อสารสกัด TOA เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสกัดและนำกลับไอออนปรอทเพิ่มสูงขึ้น โดยความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่เหมาะสม คือ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งแม้จะใช้เวลาเข้มข้นมากกว่านี้ก็ไม่ทำให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับเพิ่มขึ้น
4. ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการนำกลับไอออนปรอท ในช่วงความเข้มข้น 0.05 ถึง 0.8 โมลต่อลิตร โดยให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ส่งผลให้การสกัดและนำกลับไอออนปรอทเพิ่มสูงขึ้น และจะคงที่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.4 โมลต่อลิตร ดังนั้น

ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม คือ 0.4 โมลต่อลิตร

5. ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนในช่วง 1-50 ppm ที่ศึกษาไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดแต่จะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Rovira และ Sastre, 1988 ว่าเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนน้อยมากๆ ฟลักซ์ของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน
6. ภาวะในการดำเนินการทดลองที่เหมาะสม เมื่อใช้สารละลายป้อนที่มีไอออนปรอทและสารหนูชนิดละ 20 ppm คือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.2 โมลต่อลิตร โดยโมดูลเส้นใยกลวงบรรจุด้วยสารสกัด TOA สำหรับสกัดและนำกลับไอออนปรอทความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ส่วนไอออนสารหนูจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเมื่อทำการทดลองหาอายุการทำงานของเยื่อแผ่นเหลวที่ให้ประสิทธิภาพของการสกัดแยกไอออนโลหะปรอทและสารหนูที่ดีที่สุด พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสม คือ ไม่เกิน 120 นาที โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทเป็น 100 และ 95 ตามลำดับ ส่วนไอออนของสารหนูไม่เกิดการสกัดและนำกลับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการวิเคราะห์ไอออนด้วยเครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer ให้ค่าที่มีความละเอียดระดับในล้านส่วน (ppm) แต่กฎหมายกำหนดให้การปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมมีไอออนปรอทไม่เกิน 10 ppb ดังนั้นถ้าต้องการวัดในระดับในพันล้านส่วน (ppb) จึงไม่สามารถทำได้ ในการศึกษาต่อไปจะต้องหาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความละเอียดสูงยิ่งขึ้น
2. จากผลการทดลองที่ได้ก็นำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จึงต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดของกระบวนการนำกลับและการสกัดเพื่อนำมาใช้กับอุตสาหกรรมๆ ได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ 2541. ปรอท. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ 2541. สารหนู. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ขวัญตา นัคราเรือง. 2546. การสกัดแยกและการนำกลับไอออนทองแดง โครเมียม และสังกะสี จากสารละลายผสมของไอออน โดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิสิต สุไลมาน. 2544. การสกัดนีโอดีเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเนียม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์.
- วีรวัฒน์ ปัตทวิทกศา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อิสรา เกษมเศรษฐ. 2541. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Campderros, M.E., Acosta, A. and Marchese, J. 1998. Selective separation of copper with LIX 864 in a hollow fiber module. Talanta 47: 19-24.
- Dahuron, L. and Cussler, E.L. 1988. Protein Extraction with Hollow Fiber. AIChE Journal. 34(1): 130-136.
- Danesi, P.R. and Rickert, P.G. 1986. Some Observaton on the Performance of Hollow Fiber Supported Liquid Membranes for Co-Ni Separations. Solvent Extraction and Ion Exchange. 4(1): 149-164.
- Gu, Z. 1990. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science 52: 77-88.
- Iberhan, L. and Wisniewski, M. 2002. Extraction of arsenic (III) and arsenic (V) with Cyanex 925, Cyanex 301 and their mixtures. Hydrometallurgy 63: 23-30.
- Ioannis, K. and Anastasios, Z. 2002. Removal of arsenic from contaminated water sources by sorption onto iron-oxide-coated polymeric materials. Water Research 36: 5141-5155.
- Izatt, R.M., Lamb, J.D. and Bruening, R.L. 1988. Comparison of Bulk, Emulsion, Thin Sheet Supported, and Hollow Fiber Supported Liquid Membranes in Macrocycle-Mediated Cation Separations. Science and Technology. 23(12&13): 1645- 1658.
- Komasawa, I., Otake, T. and Yamashita, T. 1983. Mechanism kinetics of copper permeation through a supported liquid membrane containing a hydroxime as a mobile carrier. Industrial Engineering and Chemical Fundamental. 22: 127-131.
- Liacono, O., Drioli, E. and Molinari, R. 1986. Metal ion separation and concentration with supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 28: 123-138.
- Luccio, M.D., Smith, B.D., Kida, T., Borges, C.P. and Alves, T.L.M. 2000. Separation of fructose from a mixture of sugars using supported liquid membranes. Journal of Membrane Science 174: 217-224.
- Maciej Wisniewski. 1997. Extraction of arsenic from sulphuric acid solutions by Cyanex 923. Hydrometallurgy 46:235-241.
- Marr, R. and Kopp, A. 1982. Liquid membrane technology-a survey of phenomena, mechanisms, and models. American Institute of Chemical Engineers, 44-60.

- Mojtaba Shamsipur, Mohammad Hossein Mashhadizadch and Gholanhasan Azimi. 2001. Highly selective and efficient transport of mercury(II) ions across a bulk liquid membrane containing tetrathia-12-crown-4 as a specific ion carrier. Separation and Purification Technology 27:155-161.
- Nakano, M., Takahashi, K. and Takeuchi, H. 1987. A Method for Continuous Operation of Supported Liquid Membranes. Journal of Chemical Engineering of Japan. 20: 326-328.
- O' Hara, P.A. and Bohrer, M.P. 1989. Supported Liquid Membrane for Copper Transport. Journal of Membrane Science. 44: 273-287.
- Pancharoen, U., Ramkul, P. and Patthaveekongka, W. 2005 Purely Separation of Mixture of Cerium (V) and Lanthanum via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 11(6): 926-931.
- Patthaveekongka, W., Vijitchalermping, N. and Pancharoen, U. 2003. Selective Recovery of Palladium from Used Aqua Regia by Hollow Fiber Supported With Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 20(6): 1092-1096.
- Quanmin Li, Qi Liu and Xianjun Wei, 1996. Separation study of mercury through and emulsion liquid membrane. Talanta. 43:1837-1842.
- Ramkul, P. and Pancharoen, U. 2003. Synergistic Extraction and Separation of Mixture of Lanthanum and Neodmium by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 20(4): 724-730.
- Rovira, M. and Sastre, A.M. 1998. Modelling of mass transfer in facilitated supported liquid membrane transport of palladium (II) using di-(2-ethylhexyl) thiophosphoric acid. Journal of Membrane Science. 149: 241-250.
- Safavi, A. and Shams, E. 1998. Selective efficient transport of Hg (II) through bulk liquid membrane using methly red as carrier. Journal of Membrane Science 144: 37-43.
- Schulz, G. 1988. Separation techniques with supported liquid membranes. Desalination 68: 191-202.
- Shiau, Ching-Yeh and Chen, Pai-Zoh. 1993. Theoretical Analysis of Copper- Ion Extraction through Hollow Fiber Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology. 34(8):1689-1701.
- Tanigaki, M., Shiode, T., Ueda, M. and Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part I. Transport Mechanism. Separation Science and Technology 23(10&11): 1145-1159.

- Tavlarides, L.L., Bae, J.H. and Lee, C.K. 1987. Solvent Extraction, Membranes, and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology 22(2&3): 581-617.
- Teramoto, M., Masuyama, H., Takaya, H. and Asano, S. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology 22(11): 2175-2201.
- Thompson, M. and Walsh, J.N. 1989. Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry. 2nd ed. Blackie & Son Ltd.
- Varnes, A. W. 1997. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. In F. A. Settle (ed.), Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry, pp.395-418. Prentice Hall PTR.
- Yang, Ming-Chien and Cussler, E.L. 1986. Designing Hollow Fiber Contractor. AIChE Journal. 32(11): 1910-1916.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. HCl (M)	[Hg] ²⁺ (ppm)			[As] ³⁺ (ppm)		
	สารละลายป้อน		สารละลาย	สารละลายป้อน		สารละลาย
	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ
0.05	20.14	2.41	13.31	19.67	19.66	< 0.05
0.1	20.28	1.54	15.15	20.33	20.29	< 0.05
0.2	19.77	0.98	15.52	20.21	20.21	< 0.05
0.4	20.08	4.05	12.09	20.15	20.13	< 0.05
0.6	19.81	6.01	9.74	19.54	19.53	< 0.05
0.8	19.92	6.99	7.79	20.23	20.21	< 0.05

ภาวะที่ทดลอง: [Hg²⁺]_F = [As³⁺]_F = 20 ppm, [TOA]_M = 1 % v/v, [NaOH]_S = 0.1 M และ Q_F = Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.2 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. HCl (M)	ไอออน Hg		ไอออน As	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.05	88.03	66.09	0.05	< 0.25
0.1	92.41	74.70	0.20	< 0.24
0.2	95.04	78.50	0	< 0.24
0.4	79.83	60.21	0.10	< 0.24
0.6	69.66	49.17	0.05	< 0.25
0.8	64.91	39.11	0.10	< 0.24

ภาวะที่ทดลอง: $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20 \text{ ppm}$, $[TOA]_M = 1 \% \text{ v/v}$, $[NaOH]_S = 0.1 \text{ M}$ และ $Q_F = Q_S = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$

ตาราง ก.3 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. TOA (% v/v)	[Hg] ²⁺ (ppm)			[As] ³⁺ (ppm)		
	สารละลายป้อน		สารละลาย	สารละลายป้อน		สารละลาย
	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ
0.5	19.67	4.38	12.29	20.08	20.06	< 0.05
1	19.77	0.98	15.52	20.21	20.21	< 0.05
2	19.66	0.54	16.48	19.78	19.77	< 0.05
3	20.01	0.62	16.66	19.85	19.85	< 0.05
4	20.05	0.61	16.53	19.89	19.86	< 0.05
5	19.83	0.58	16.35	20.11	20.11	< 0.05

ภาวะที่ทดลอง: [Hg²⁺]_F = [As³⁺]_F = 20 ppm, [HCl]_F = 0.2 M, [NaOH]_S = 0.1 M และ Q_F = Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.4 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. TOA (% v/v)	ไอออน Hg		ไอออน As	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.5	77.73	62.48	0.09	< 0.24
1	95.04	78.50	0	< 0.24
2	97.25	83.83	0.05	< 0.25
3	96.90	83.26	0	< 0.25
4	96.95	82.44	0.15	< 0.25
5	97.07	82.45	0	< 0.24

ภาวะที่ทดลอง: $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[NaOH]_S = 0.1$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิกรัมต่อนาที

ตาราง ก.5 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดและน้ำกลับ

Conc. NaOH (M)	[Hg] ²⁺ (ppm)			[As] ³⁺ (ppm)		
	สารละลายป้อน		สารละลาย	สารละลายป้อน		สารละลาย
	ขาเข้า	ขาออก	น้ำกลับ	ขาเข้า	ขาออก	น้ำกลับ
0.05	20.09	0.98	16.23	20.28	20.24	< 0.05
0.1	19.66	0.54	16.48	19.78	19.77	< 0.05
0.2	20.11	0.24	17.81	20.09	20.07	< 0.05
0.4	20.32	< 0.03	19.3	18.89	18.89	< 0.05
0.6	20.25	< 0.03	19.21	19.67	19.66	< 0.05
0.8	20.28	< 0.03	19.27	19.84	19.81	< 0.05

ภาวะที่ทดลอง: [Hg²⁺]_F = [As³⁺]_F = 20 ppm, [HCl]_F = 0.2 M, [TOA]_M = 2 % v/v และ Q_F = Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.6 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. NaOH (M)	ไอออน Hg		ไอออน As	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.05	95.12	80.79	0.19	< 0.24
0.1	97.25	83.83	0.05	< 0.25
0.2	98.81	88.56	0.10	< 0.24
0.4	> 99.85	94.98	0	< 0.25
0.6	> 99.85	94.86	0.05	< 0.25
0.8	> 99.85	95.02	0.15	< 0.25

ภาวะที่ทดลอง: $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20 \text{ ppm}$, $[HCl]_F = 0.2 \text{ M}$, $[TOA]_M = 2 \% \text{ v/v}$ และ $Q_F = Q_S = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$

ตาราง ก.7 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารป้อนต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. Hg/As (ppm)	[Hg] ²⁺ (ppm)			[As] ³⁺ (ppm)		
	สารละลายป้อน		สารละลาย	สารละลายป้อน		สารละลาย
	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ	ขาเข้า	ขาออก	นำกลับ
1	1.18	< 0.03	1.12	1.23	1.23	< 0.05
10	9.82	< 0.03	9.32	9.78	9.76	< 0.05
20	20.32	< 0.03	19.3	18.89	18.89	< 0.05
30	29.77	< 0.03	28.38	29.82	29.82	< 0.05
40	39.78	< 0.03	37.96	38.78	38.74	< 0.05
50	50.14	< 0.03	47.77	49.54	49.52	< 0.05

ภาวะที่ทดลอง: [HCl]_F = 0.2 M, [TOA]_M = 2 % v/v, [NaOH]_S = 0.4 M และ Q_F = Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.8 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาความเข้มข้นของสารป้อนต่อการสกัดและนำกลับ

Conc. Hg/As (ppm)	ไอออน Hg		ไอออน As	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
1	> 97.46	94.92	0	< 4.06
10	> 99.69	94.91	0.20	< 0.51
20	> 99.85	94.98	0	< 0.26
30	> 99.90	95.33	0	< 0.16
40	> 99.92	95.42	0.10	< 0.12
50	> 99.94	95.27	0.04	< 0.10

ภาวะที่ทดลอง: $[HCl]_F = 0.2 \text{ M}$, $[TOA]_M = 2 \% \text{ v/v}$, $[NaOH]_S = 0.4 \text{ M}$ และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.9 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดและนำกลับ

Time (min)	[Hg] ²⁺ (ppm)			[As] ³⁺ (ppm)		
	สารละลายป้อน		สารละลาย นำกลับ	สารละลายป้อน		สารละลาย นำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
30	20.14	0.08	19.02	19.67	19.66	< 0.05
60	19.78	< 0.03	18.81	19.85	19.85	< 0.05
90	19.78	< 0.03	18.77	19.85	19.84	< 0.05
120	19.88	0.05	18.69	20.03	20.02	< 0.05
150	19.88	0.24	18.22	20.03	20.01	< 0.05
180	19.54	0.99	17.39	20.11	20.01	0.05
210	19.54	1.14	16.69	20.11	19.95	0.09
240	20.21	1.71	15.96	19.94	19.53	0.28
270	20.21	1.98	15.45	19.94	19.3	0.41

ภาวะที่ทดลอง: [Hg]²⁺_F = [As]³⁺_F = 20 ppm, [HCl]_F = 0.2 M, [TOA]_M = 2 % v/v, [NaOH]_S = 0.4 M และ Q_F = Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ก.10 ข้อมูลร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะของการศึกษาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดและนำกลับ

Time (min)	ไอออน Hg		ไอออน As	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
30	99.60	94.43	0.05	< 0.25
60	> 99.85	95.09	0	< 0.25
90	> 99.85	94.89	0.05	< 0.25
120	99.75	94.01	0.05	< 0.24
150	98.79	91.65	0.2	< 0.24
180	94.93	88.99	0.49	0.24
210	94.16	85.41	0.79	0.44
240	91.53	78.97	2.05	1.40
270	90.20	76.44	3.21	2.06

ภาวะที่ทดลอง: $[Hg^{2+}]_F = [As^{3+}]_F = 20$ ppm, $[HCl]_F = 0.2$ M, $[TOA]_M = 1$ % v/v, $[NaOH]_S = 0.4$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ข

คำนิยาม

ข.1 ร้อยละการสกัด (% Extraction)

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนที่สกัดได้}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น}} \times 100$$

ข.2 ร้อยละการนำกลับ (% Recovery)

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนที่นำกลับได้}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น}} \times 100$$

ข.3 ฟลักซ์ (Flux, J)

$$\text{ฟลักซ์} = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนที่สกัดได้}}{\text{เวลาในการดำเนินการ}} \times \frac{\text{ปริมาตร}}{\text{พื้นที่ผิวของเส้นใยกลวง}}$$

ข.4 ค่าการซึมผ่าน (Permeability, P)

$$\text{ค่าการซึมผ่าน} = \frac{\text{ฟลักซ์}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น}}$$

ข.5 สัมประสิทธิ์การแยก (Separation Factor, α)

$$\text{สัมประสิทธิ์การแยก} = \frac{\text{ค่าการซึมผ่านของโลหะที่สนใจหลัก}}{\text{ค่าการซึมผ่านของโลหะที่สนใจรอง}}$$

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

จากภาคผนวก ก. ตาราง ก.1 พิจารณาที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกของสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า	19.77	ppm
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก	0.98	ppm

$$\begin{aligned}\text{ร้อยละการสกัด} &= \frac{19.77 - 0.98}{19.77} \times 100 \\ &= 95.04\end{aligned}\quad (\text{ดังตาราง ก.2})$$

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

จากภาคผนวก ก. ตาราง ก.1 พิจารณาที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกของสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า	19.77	ppm
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาเข้า	0	ppm
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาออก	15.52	ppm

$$\begin{aligned}\text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{15.52 - 0}{19.77} \times 100 \\ &= 78.50\end{aligned}\quad (\text{ดังตาราง ก.2})$$

ค.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าฟลักซ์ การซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การแยก

ข้อมูลจากภาคผนวก ก ตาราง ก.1 พิจารณาข้อมูลที่เป็นเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกของสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า	19.77	ppm
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก	0.98	ppm
น้ำหนักโมเลกุลของปรอท	200.59	กรัมต่อโมล
ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนขาเข้า	20.21	ppm
ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนขาออก	20.21	ppm
น้ำหนักโมเลกุลของสารหนู	74.92	กรัมต่อโมล
ปริมาตรของสารละลายป้อนขาออก	5	ลิตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพของโมดูลเส้นใยกลวง	1.4	ตารางเมตร
เวลาที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง	50	นาที

1) การคำนวณค่าฟลักซ์

สำหรับปรอท

$$= \frac{(19.77 - 0.98) \times 10^{-3}}{200.59} \times \frac{5}{(1.4)(50)}$$

$$= 6.69 \times 10^{-6}$$

(ดังตารางที่ 4.1)

สำหรับสารหนู

$$= \frac{(20.21 - 20.21) \times 10^{-3}}{74.92} \times \frac{5}{(1.4)(50)}$$

$$= 0$$

(ดังตารางที่ 4.1)

2) การคำนวณค่าการซึมผ่าน

สำหรับปรอท

$$= \frac{(6.69 \times 10^{-6})}{19.77} \times 200.59$$

$$= 6.79 \times 10^{-5}$$

(ดังตารางที่ 4.1)

สำหรับสารหนู

$$= \frac{0}{20.21} \times 74.92$$

$$= 0$$

(ดังตารางที่ 4.1)

3) การคำนวณสัมประสิทธิ์การแยก

เมื่อปรอทเป็นโลหะที่สนใจ

$$= \frac{(6.79 \times 10^{-5})}{0}$$

$$= \infty$$

(ดังตารางที่ 4.1)

เมื่อสารหนูเป็นโลหะที่สนใจ

$$= \frac{0}{(6.79 \times 10^{-5})}$$

$$= 0$$

(ดังตารางที่ 4.1)

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP อะตอมมิคอะมิสชันสเปกโทรสโกปี

(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES)

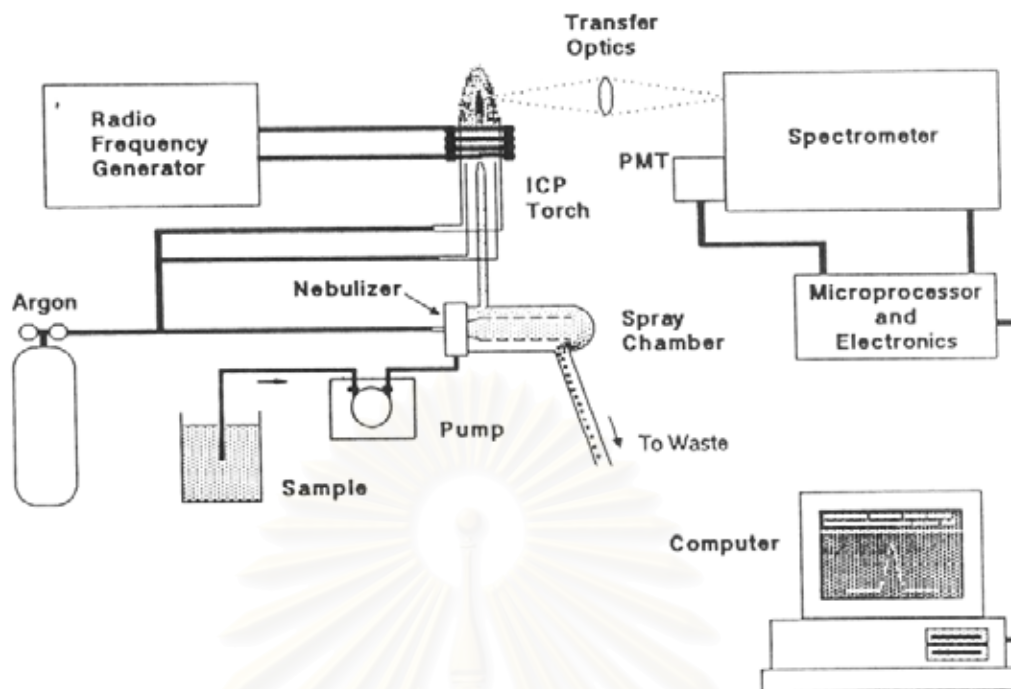
อะมิสชันสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีการวิเคราะห์ซึ่งอาศัยหลักการทำให้สารที่วิเคราะห์เปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นด้วยกระบวนการที่เหมาะสม เป็นการทำให้สารที่จะวิเคราะห์นั้นสามารถเปล่งแสง รังสี หรือสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะอยู่ในช่วงยูวี-วิสิเบิลและมีลักษณะเฉพาะตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณได้อย่างรวดเร็วและวิเคราะห์ได้หลายๆ ธาตุในขณะเดียวกัน (Simultaneous Multielements Analysis) โดยสารตัวอย่างอาจอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสิ้น (แม้นอมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2535)

ง.1 องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่อง ICP Spectrometer

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP สเปกโตรมิเตอร์ มีดังนี้

- 1) Nebulizer, Spray Chamber และแก๊สอาร์กอน
- 2) ICP Torch
- 3) Radiofrequency Generator
- 4) Spectrometer
- 5) Microprocessor และคอมพิวเตอร์

หลักการทำงานของเครื่องมีดังนี้คือ สารที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์จะถูกส่งเข้าเครื่อง โดยสารละลายจะถูกเปลี่ยนให้เป็นละอองลอย (Aerosol) โดยกระบวนการ Nebulization แล้วสารละลายที่เป็นตัวอย่างนี้จะถูกพาเข้าพลาสมาของ ICP Torch ซึ่งจะทำการแห้งกลายเป็นไอและเป็นอะตอม แล้วทำการกระตุ้นหรือไอออไนซ์ หลังจากนั้นอะตอมหรือไอออนที่ถูกกระตุ้นจะเปล่งแสงซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวออกมา แสงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เพื่อแยกเอาเฉพาะแสงที่ต้องการวัดที่ความยาวคลื่นต้องการ แล้วให้แสงดังกล่าวตกลงบนดีเทคเตอร์เพื่อวัดออกมาเป็นสัญญาณซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นความเข้มขึ้นได้ ในการควบคุมแต่ละขั้นตอนตลอดจนข้อมูลที่ได้จะถูกพิมพ์หรือเก็บไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP Spectrometer (แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2535)

ง.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ โดยความเข้มข้นต้องอยู่ในช่วงของความเข้มข้นของตัวอย่าง เตรียมสารละลายมาตรฐานประมาณ 5 ตัวอย่าง
- 2) เตรียมเครื่องมือ ICP Spectrometer ที่ต้องการวิเคราะห์ให้พร้อมใช้งาน โดยต้องเลือกความยาวคลื่นที่จะใช้ ซึ่งความยาวคลื่นแต่ละค่าเหมาะสมต่อโลหะเฉพาะชนิดเท่านั้น ดังตาราง ง.1
- 3) นำสารละลายมาตรฐานมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer เพื่อทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Standard Curve)
- 4) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer โดยเทียบกับค่าของกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน ทำให้ทราบความเข้มข้นของโลหะในสารละลายตัวอย่างได้

ง.3 การนำ ICP Spectrometer ไปประยุกต์ใช้งาน (Varnes, 1997)

- 1) ใช้ในการวิเคราะห์โลหะที่ปนเปื้อนในน้ำ ดิน ของเสีย และตัวอย่างอากาศ
- 2) ใช้ในการวิเคราะห์โลหะที่ก่อให้เกิดความรู้สึกหอรในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

- 3) ใช้ในการควบคุมคุณภาพเพื่อหาส่วนประกอบของธาตุต่างๆ อย่างแน่นอนของวัตถุดิบอินเตอร์มีเดียท และผลิตภัณฑ์
- 4) ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 5) ใช้ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุในสารที่ไม่ทราบค่า (Unknown Materials)

ตาราง ง.1 แสดงค่าสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โลหะด้วยเครื่อง ICP Spectrometer (Thompson and Walsh, 1989)

Element	Wavelength (nm)	Element	Wavelength (nm)
Al	394.400	Mo	281.620
Al	308.215	Na	589.590
As	193.760	Nb	319.500
B	249.680	Ni	341.480
Bi	223.060	Ni	231.600
Ca	315.890	P	178.290
Ca	393.370	Pb	220.350
Co	228.620	S	180.731
Co	237.862	Si	288.160
Cr	267.720	Sn	189.990
Cu	324.750	Sn	326.230
Fe	259.940	Sr	407.770
Fe	302.060	Ta	240.060
Ge	303.910	Ti	337.280
Hg	194.227	V	311.070
Mg	280.270	W	239.710
Mg	383.230	Zn	202.550
Mn	293.310	Zr	349.620

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นางสาวสิวลี แสงธำรง

เกิด วันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์

การศึกษา

พ.ศ. 2533-2538	ศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลนครสวรรค์
พ.ศ. 2538-2541	ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนสตรีนครสวรรค์
พ.ศ. 2541-2543	ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนนครสวรรค์
พ.ศ. 2543-2547	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547-2549	ศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์

พ.ศ. 2546	นักศึกษาฝึกงานในฝ่ายกระบวนการผลิต บริษัทปิโตรเคมีคัลไทย จำกัด มหาชน
-----------	--

ทุนสนับสนุนงานวิจัย

พ.ศ. 2548	กองทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
-----------	--

ผลงานทางวิชาการ

1. Seewalee Sangtumrong, Prakorn Ramakul, Satayaprasert Chairit, Ura Pancharoen and Anchaleeporn W. Lothongkum. Purely Extraction of Mixture of Mercury and Arsenic Via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. RGJ Seminar Series XLVIII Engineering Applications 19 มกราคม 2550 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. Seewalee Sangtumrong, Prakorn Ramakul, Satayaprasert Chairit, Ura Pancharoen and Anchaleeporn W. Lothongkum. Purely Extraction of Mixture of Mercury and Arsenic Via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry (under revision)