

การแยกปรอท โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายเอกพงศ์ อู๊ดดี

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

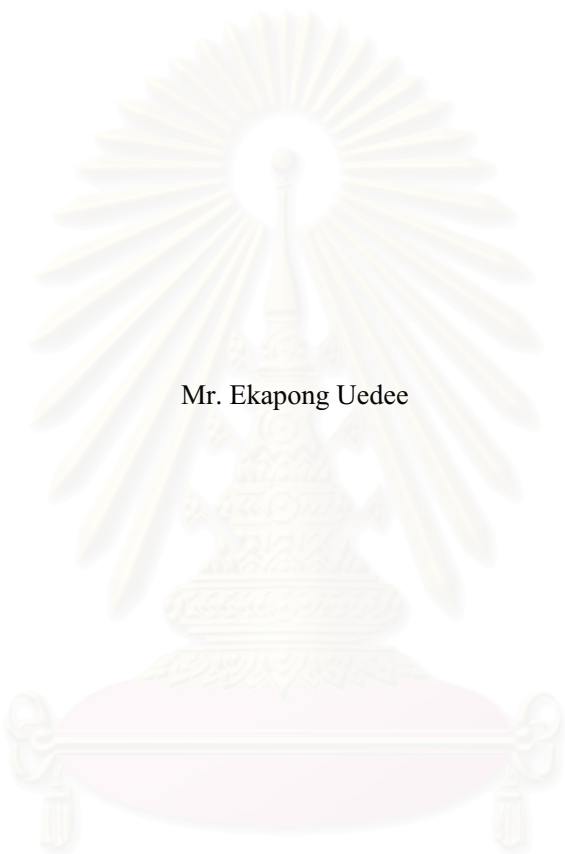
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEPARATION OF MERCURY THROUGH A HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Ekapong Uedee

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแยกโปรตีนโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

โดย

นายเอกพงศ์ อู่ดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

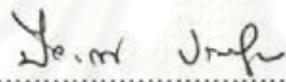
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

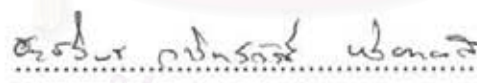
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

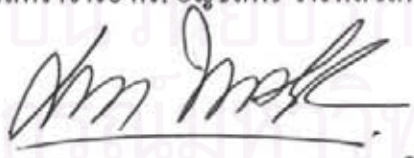
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

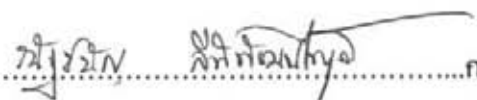
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มถ. สุกกนก ทองใหญ่)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนน ฤทธิพัฒน์ไพบูลย์)

เอกพงศ์ อู่ดี: การแยกปรอทโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Separation of Mercury through a Hollow-fiber-supported Liquid Membrane) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: รศ. ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทจากสารละลายป้อนคือน้ำสังเคราะห์ที่มีไอออนปรอทละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวใช้สารละลายผสมของสารสกัด tri-n-octylamine (TOA) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ พบว่าร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีค่าสูงสุดเท่ากับ 100 และ 97 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับความเข้มข้นของไอออนปรอทในช่วงที่ศึกษาคั้งแต่ 1–100 ppm แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเท่ากับ 0.42 และ 1.67 เซนติเมตรต่อวินาที สังกศได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....นายเอกพงศ์ อู่ดี.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4770547221: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MERCURY / EXTRACTION / LIQUID MEMBRANE / HOLLOW FIBER / MASS TRANSFER

EKAPONG UEDEE: SEPARATION OF MERCURY THROUGH A HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng. Sc., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. ANCHALEEPORN W. LOTHONGKUM, D. Eng., 100 pp.

The experimental study on the extraction and recovery of Hg (II) ions from feed solution containing Hg ions in hydrochloric media using microporous hydrophobic hollow fiber supported liquid membrane has been investigated. Tri-n-octylamine (TOA) dissolved in kerosene was used as an extractant. Sodium hydroxide was used as an stripping solution. 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 stripping solution, the concentration of mercury ions in feed solution, and the flow rates of feed and stripping solutions. The results indicated that the maximum percentages of extraction and recovery of mercury ions of 100 % and 97 % were achieved at the concentration of hydrochloric acid in feed solution of 0.1 mol/l, the concentration of TOA at 3 % (v/v), the concentration of sodium hydroxide at 0.5 mol/l, and the flow rates of the feed and stripping solutions of 100 ml/min. However, the concentration of mercury ions from 1–100 ppm in the feed solution had no effect on the percentages of extraction and recovery of mercury ions.

The mass transfer coefficients of the aqueous phase ( $k_f$ ) and organic phase ( $k_m$ ) were calculated. The mass transfer coefficient of aqueous phase and organic phase are 0.42 and 1.67 cm/s. The mass transfer coefficient of organic phase is higher than that of aqueous phase. Therefore, the rate controlling step is the diffusion of mercury ions through the film layer between feed solution and the liquid membrane.

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....นายเอกพงศ์ ชิต.....  
 Field of study.....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....  
 Academic year .....2007.....Co-advisor's signature.....ศ.ดร.ส.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขรายงานนี้ ขอขอบคุณ คุณสาวิตรี ผาคยานนท์ mentor และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์การทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนวิจัยจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมปี 2548 และตัวทำละลายเคโรซีนจาก บริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสารปรอท.....	2
1.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท.....	2
1.1.3 สารปรอทและความเป็นพิษ.....	3
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดปรอท.....	5
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว.....	6
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	9
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	11
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	11
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process).....	12
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane).....	14
2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat-Sheet Supported Liquid Membrane).....	14

2.1.2.2	เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral–Wound Supported Liquid Membrane).....	15
2.1.2.3	เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow–Fiber Supported Liquid Membrane : HFSLM).....	16
2.1.3	เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo–Liquid Membrane).....	18
2.2	ชนิดของสารสกัด.....	21
2.2.1	สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant).....	21
2.2.2	สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant).....	22
2.2.3	สารสกัดชนิดซอลเวท (Solvating Extractant).....	23
2.3	กลไกการถ่ายโอนมวล.....	24
2.3.1	การถ่ายโอนมวลแบบสวนทาง (Counter–Transport).....	24
2.3.2	การถ่ายโอนมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co–Transport).....	25
2.4	ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายโอนมวล.....	27
2.4.1	การหาค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยา การสกัดไอออนปรอท.....	27
2.4.2	การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ ).....	27
2.4.3	การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, $P$ ).....	28
2.4.4	แบบจำลองการถ่ายโอนมวลและการหาค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient).....	29
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง.....	33
3.1	สารเคมี.....	33
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.3	วิธีการทดลอง.....	36
3.3.1	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรด ไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัด ไอออนปรอท.....	36



3.3.2	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท.....	37
3.3.3	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	38
3.3.4	ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท.....	39
3.3.5	ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายน้ำกลั้วที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวง ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	40
3.3.6	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท ที่เวลาต่างๆ.....	40
3.4	ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวง.....	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	43
4.1	ผลการทดลอง.....	45
4.1.1	ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท.....	45
4.1.2	ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท.....	48
4.1.3	ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	52
4.1.4	ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	55
4.1.5	ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและ สารละลายน้ำกลั้วที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวง ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	58
4.2	การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี.....	60
4.2.1	การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ )	

ของปฏิบัติการสกัดไอออนปรอท.....	60
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, $P$ ).....	61
4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล ของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ).....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา).....	75
ภาคผนวก ข (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ).....	78
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ).....	84
ภาคผนวก ง (การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP อะตอมมิคิมิสชันสเปกโทรสโกปี).....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	สมบัติทางกายภาพของปรอท.....	3
ตารางที่ 1.2	รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของปรอท.....	4
ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	33
ตารางที่ 3.2	สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ตารางที่ 4.1	ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับ ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน.....	47
ตารางที่ 4.2	ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับ ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง.....	51
ตารางที่ 4.3	ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับ ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลของเส้นใยกลวง.....	54
ตารางที่ 4.4	ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับ ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ในช่วง 1–100 ppm.....	57
ตารางที่ 4.5	ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับ ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ.....	60
ตารางที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น ของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูล ของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร.....	63
ตารางที่ ข-1	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท.....	78
ตารางที่ ข-2	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท.....	79

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท.....	80
ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท.....	81
ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดูลของเส้นใยกลวงต่อ การสกัดไอออนปรอท.....	82
ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ (ความเข้มข้นปรอทหน่วย ppm).....	83
ตารางที่ ง-1 ค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โลหะ ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer.....	99

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.2	กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	13
รูปที่ 2.3	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	15
รูปที่ 2.4	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน.....	16
รูปที่ 2.5	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	17
รูปที่ 2.6	ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลางหนึ่งเส้นใน ชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	17
รูปที่ 2.7	ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต.....	19
รูปที่ 2.8	ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะ และไอออนไฮโดรเนียมแบบสวนทาง.....	25
รูปที่ 2.9	ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะ และไอออนไฮโดรเนียมแบบไปทางเดียวกัน.....	26
รูปที่ 2.10	แผนผังการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว.....	29
รูปที่ 3.1	สูตรโครงสร้างของสารสกัด Tri-n-octylamine (TOA).....	33
รูปที่ 3.2	อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel <sup>®</sup> Laboratory และ โมดูลของ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	34
รูปที่ 3.3	โมดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ ในการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.4	การปฏิบัติการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลาง ในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว.....	37
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรด ไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัด ไอออนปรอท.....	45
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรด ไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับ ไอออนปรอท.....	46

รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....	48
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....	49
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....	52
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....	53
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....	55
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....	56
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท.....	58
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท.....	59
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ระหว่าง เริ่มต้นปฏิกิริยากับที่สุดท้ายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลาย เยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร.....	61
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อนกับเวลาเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น ของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูล ของเส้นใยกลวง เมื่อ $[Hg^{2+}]_f = 100$ ppm, $[HCl]_f = 0.1$ โมลต่อลิตร, $[NaOH]_s = 0.5$ โมลต่อลิตร และ $Q_f = Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่ออนาที.....	62

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln (C_f / C_{f0})$  ของไอออนปรอท  
 ในสารละลายเทียบกับเวลา ( $t$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น  
 ของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของ  
 เส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  
 $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที.....63

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $1/[R_3N]^2[H^+]^2$   
 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA  
 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง  
 เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  
 $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที.....64

รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ระหว่างเริ่มต้น  
 ปฏิกริยากับที่สุดท้ายของปฏิกริยาการสกัดไอออนปรอท  
 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลาย  
 เยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร.....88

รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln (C_f / C_{f0})$  ของไอออนปรอท  
 ในสารละลายเทียบกับเวลา ( $t$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้น  
 ของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของ  
 เส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  
 $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที.....91

รูปที่ ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $1/[R_3N]^2[H^+]^2$  เมื่อเปลี่ยนแปลง  
 ค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว  
 ในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  
 $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร  
 และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที.....94

รูปที่ ง-1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP Spectrometer.....98

## สัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

A	พื้นที่การถ่ายโอนมวล
$C_f$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา $t$
$C_{f,0}$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น
$C_{\text{feed}}$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า
$C_{\text{raf}}$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก
$C_{\text{st}}$	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
$D$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient)
% E	ร้อยละการสกัด
$[H^+]$	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม
$H_{\text{FUSION}}$	Enthalpy of Fusion
$J_{\text{extract}}$	ฟลักซ์ของการสกัด
$J_{\text{recovery}}$	ฟลักซ์ของการนำกลับ
$K_{\text{ex}}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (Equilibrium Constant)
$k$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล
$k_B$	ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.3807 \times 10^{-23}$ J/K
$k_i$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน
$k_m$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว
$k_s$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายนำกลับ
L	ความยาวของเส้นใยกลาง
$l$	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
M	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
$M_f$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน



$M_{if}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
$M_{is}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
$M_s$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ
$N$	จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล
$P$	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient)
$P_m$	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว
$Q$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน
$Q_f$	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
$r$	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
$r_i$	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
$r_o$	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
$r_{lm}$	รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง
% R	ร้อยละการนำกลับ
$[R_3N]$	ความเข้มข้นของสารสกัด TOA
S	สารสกัดชนิดซอลเวท
$S_{FUSION}$	Entropy of Fusion
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
t	เวลา
V	ปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวง
$V_f$	ปริมาตรของสารละลายป้อน

## อักษรกรีก

$\varepsilon$	ความพรุนของเส้นใยกลวง
$\pi$	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416
$\eta$	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

## ตัวห้อย

$f$	สารละลายป้อน
$s$	สารละลายนำกลับ
$m$	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
if	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
is	ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติและปิโตรเลียมจากอ่าวไทย นอกจากปริมาณก๊าซธรรมชาติเหลวที่ผลิตได้แล้ว ยังมีน้ำประมาณ 85,000–90,000 บาร์เรลต่อวัน จากหลุมผลิตที่มีความเข้มข้นของปรอทเท่ากับ 2,200 ppb เจือปนอยู่ถูกส่งมากับก๊าซธรรมชาติเหลว (กรมทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2543: 11–13) น้ำจากหลุมผลิตเหล่านี้ไม่สามารถทิ้งลงทะเลได้โดยตรง หากปราศจากการบำบัดที่เหมาะสมเพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารปรอทในอ่าวไทย และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของประชาชนโดยรวม เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารปรอทออกจากน้ำที่มาจากหลุมก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการกำจัดสารปรอท คือ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) แต่เทคนิคนี้มีข้อเสีย คือ ค่าการเลือกสกัด (Selectivity) ที่จำกัดและอัตราเร็วในการสกัดช้ามาก เป็นผลให้ต้องใช้สารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลมาก ส่วนวิธีการบำบัดด้วยการกรองโดยใช้เมมเบรนชนิด Ultrafiltration ถูกจำกัดโดยการสะสมตัวของปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่อุดตันเยื่อกรอง การใช้เมมเบรนชนิด Reverse Osmosis มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของเมมเบรนจากการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ (กิตติพงษ์ เชิญวิวัฒน์ชัย, 2543)

จากปัญหาดังกล่าวและการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น โครงการนี้จึงเสนอวิธีการแยกไอออนปรอทจากสารละลายป้อนซึ่งใช้น้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow-fiber-supported Liquid Membrane) วิธีนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแยกและนำกลับไอออนปรอท ด้วยเหตุผลที่เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีค่าการคัดเลือกสูง มีการปฏิบัติงานรวมกระบวนการสกัด (Extraction Process) และการนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียว การแยกปรอทโดยวิธีนี้มีอัตราการถ่ายโอนมวลสูง และในการสกัดใช้สารอินทรีย์และพลังงานปริมาณต่ำ มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ สามารถดัดแปลงและขยายขนาดได้ง่าย (วิวัฒน์ ปัททวิคองคา, 2541) เทคนิคการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อแยกและเพิ่มความเข้มข้นให้กับไอออนของโลหะชนิดต่างๆ

### 1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสารปรอท (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2541)

ปรอทมีสูตรทางเคมี Hg เป็นธาตุอันดับที่ 80 ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน หมู่ 2B อยู่ท้ายสุดของแถว d ในตารางธาตุ ปรอทมีหลายรูปแบบ คือ ปรอทในรูปโลหะ (Metallic Form) ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Mercury Compound) และปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic Mercury Compound) ปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะโดยมากบริสุทธิ์และไม่ผสมกับสารอื่น ความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ เกือบของปรอทส่วนใหญ่ละลายน้ำได้

สารประกอบ  $\text{HgCl}_2$  ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ระเหิดง่าย มีพันธะโคเวเลนต์ หลอมเหลวแล้วไม่นำไฟฟ้า ละลายน้ำได้ดี แต่เมื่ออยู่ในสารละลายไม่ค่อยแตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นถ้าต้องการไอออนปรอทของสารประกอบ  $\text{HgCl}_2$  ต้องใช้สารละลายกรด เช่น สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นตัวทำละลาย สำหรับสารประกอบเฮไลด์ของปรอท ได้แก่  $\text{Hg}_2\text{X}_2$  ( $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) มีความเสถียรในสารละลายไม่แตกตัวเป็นไอออน โดยธรรมชาติมักพบสารประกอบเฮไลด์ของปรอทเป็นแร่อิสระหรือพบในรูปของ  $\text{HgS}$  ซึ่งมีสีแดงกระจายอยู่ในเนื้อหินที่เรียกว่า “Cinnabar”

### 1.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

ที่อุณหภูมิห้องปรอทเป็นของเหลว มีความหนืดต่ำ ระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย อยู่ในสภาพเป็น mono atomic ปรอทมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีจุดเดือดสูง แตกกลายเป็นไอได้ง่าย ซึ่งแสดงว่าปรอทมี interatomic force ต่ำมาก ปรอทสามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าโลหะอื่น การละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มออกซิเจนลงไป นอกจากนี้ปรอทยังละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น นอร์มัลเฮกเซน ( $2.7 \times 10^{-7} \text{ g} / 100 \text{ g}$  ที่  $40^\circ\text{C}$ ) ในเบนซีน ( $2.0 \times 10^{-7} \text{ g} / 100 \text{ g}$  ที่  $20^\circ\text{C}$ ) ในเมทานอล ( $3.6 \times 10^{-7} \text{ g} / 100 \text{ g}$  ที่  $63^\circ\text{C}$ ) และในไดออกเซน ( $7.0 \times 10^{-7} \text{ g} / 100 \text{ g}$  ที่  $25^\circ\text{C}$ ) ปรอททำปฏิกิริยากับฮาโลเจนโดยตรงที่อุณหภูมิห้องแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ถ้าที่อุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$  จะได้  $\text{HgO}$  ปรอทไม่ทำปฏิกิริยากับไฮโดรด์ของ  $\text{HF}, \text{HCl}, \text{H}_2\text{S}, \text{NH}_3, \text{PH}_3$  และ  $\text{AsH}_3$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $200^\circ\text{C}$  แต่ทำปฏิกิริยากับ  $\text{HBr}, \text{HI}$  ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับคลอรีนและไอโอดีนได้  $\text{HgCl}_2$  และ  $\text{HgI}_2$  สมบัติต่างๆ ทางกายภาพของปรอทแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของปรอท

สมบัติทางกายภาพ	ค่าที่วัดได้
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	200.59
จุดหลอมเหลว (Melting Point, °C)	-38.87
$H_{\text{FUSION}}$ , (Enthalpy of Fusion, kcal mole <sup>-1</sup> )	0.5486
$S_{\text{FUSION}}$ , (Entropy of Fusion, cal deg <sup>-1</sup> mole <sup>-1</sup> )	2.37
จุดเดือด (Boiling Point, °C)	356.57
ความดันไอ (Vapor Pressure)	1 mm Hg ที่ 126 °C, 10 mm Hg ที่ 184 °C, 100 mm Hg ที่ 261 °C
ความหนาแน่น (Density)	13.534 g/cm <sup>3</sup> ที่ 25 °C
ค่าการละลายน้ำ (Solubility in Water 100 g)	6 x 10 <sup>-6</sup> g ที่ 25 °C
Ohmic resistance	95.76 x 10 <sup>-8</sup> ohm m ที่ 20°C
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	13.545

### 1.1.3 สารปรอทและความเป็นพิษ

สารประกอบของปรอทมีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +1 และ +2 เมื่อเลขออกซิเดชันเป็น +1 เรียกสารประกอบนั้นว่า เมอร์คิวรัส (Mercurous) เมื่อเป็น +2 เรียกว่า เมอร์คิวริก (Mercuric) อย่างไรก็ตามสารประกอบเมอร์คิวรัสมีปรอทสองอะตอมอยู่คู่กันเสมอ เรียกว่าเกิดเป็นไดเมอร์ (Dimer) ดังนั้นเมื่อสารเมอร์คิวรัสละลายน้ำจะอยู่เป็นประจุกู่เสมอ คือ เป็น  $\text{Hg}_2^{2+}$  แต่สมบัติทางเคมีอื่นๆ คล้ายคลึงกับประจุกเดี่ยวทั่วไป เช่น  $\text{Hg}^+$  จะทำปฏิกิริยากับประจุของคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ได้เป็น เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (Mercurous Chloride) มีสูตร  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  ซึ่งเป็นตะกอนสีขาวมีพิษอย่างร้ายแรง เรียกว่า คาโลเมล (Calomel) ความเป็นพิษของสารปรอทขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของปรอท

รูปแบบ	ความเป็นพิษ
Hg	โลหะปรอทบริสุทธิ์ : ก่อนข้างเฉื่อยและไม่เป็นพิษ แต่ไอปรอทเป็นพิษอย่างร้ายแรง เมื่อสูดเข้าไป
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	ประจุเมอร์คิวรัส : ไม่ละลายน้ำ สามารถรวมตัวเป็นสารประกอบคลอไรด์เป็นพิษน้อย
Hg <sup>2+</sup>	ประจุเมอร์คิวริก : เป็นพิษ มีสัมพรรคภาพ (Affinity) สูงกับกลุ่มไทออล (Thiol Group, SH) สามารถจับตัวกับซัลเฟอร์ในเม็ดเลือดแดง เซรัม (Serum) และในโปรตีนชนิดต่างๆ แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายข้ามเนื้อเยื่อที่ติดกัน เช่น Blood-brain Barrier ได้ สะสมและทำอันตรายต่อไต
RHg <sup>+</sup>	สารปรอทอินทรีย์เชิงเดี่ยว : มีความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะ CH <sub>3</sub> Hg <sup>+</sup> (Methyl Mercury) ทำลายระบบประสาทและสมองอย่างถาวร สามารถเคลื่อนย้ายข้ามเนื้อเยื่อที่ติดกัน เช่น Blood-brain Barrier ได้ สะสมได้ดีในเนื้อเยื่อไขมัน
R <sub>2</sub> Hg	สารปรอทอินทรีย์เชิงคู่ : มีความเป็นพิษต่ำ แต่สามารถถูกเปลี่ยนรูปแบบเป็น RHg <sup>+</sup> ได้ในตัวกลางที่เป็นกรด
HgS	สารประกอบปรอทซัลไฟด์ ไม่ละลายในน้ำและไม่เป็นพิษ พบตามธรรมชาติในดิน

สารประกอบอินทรีย์ของปรอท (Organo Mercury Compound) เป็นสารประกอบปรอทที่เป็นพิษมากที่สุด เช่น สารประกอบจำพวกอัลคิลเมอร์คิวรี (Alkyl Mercury) เช่น เมทิลเมอร์คิวรี มีอำนาจในการขัดขวางปฏิกิริยาในร่างกายได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีสารประกอบพวก aryl mercury โดยเฉพาะ CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup> (Methyl Mercury) สารนี้ละลายได้ดีในไขมัน ร่างกายสามารถดูดซึม methyl mercury ในทางเดินอาหารได้สูงถึง 95–98 % แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมากเนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ ปรอทรูปนี้สามารถยึดติดกับเม็ดเลือดแดงและแพร่กระจายไปยังทุกส่วนของร่างกาย โดยพบว่าประมาณ 15 % จะสะสมอยู่ในสมอง ส่วนปรอทในรูปโลหะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังและลมหายใจได้ง่าย ปรอทรูปที่อันตรายต่อชีวิตมนุษย์มากที่สุดคือในรูปไอระเหยซึ่งสามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลันถ้าหายใจเข้าไปในช่วง 1,200–8,500 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสารประกอบอินทรีย์ของปรอทมีความเป็นพิษน้อยที่สุด เพราะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหารได้น้อยมากไม่เกิน 2 % และยิ่งกว่านั้นยังถูกขับออกจากร่างกายได้ง่าย ปรอทที่สะสมอยู่ในร่างกายก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบประสาท ปรอทสามารถแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มสมองเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลาง ปรอทส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในสมองส่วนเซเลเบลลัม (Cerebellum) และเซเลเบลคอร์เท็กซ์ (Cerebral Cortex) ซึ่งทำอันตราย

ต่อเนื้อเยื่อสมองส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึก ทำให้ผู้รับสารปรอทมีอาการผิดปกติเกี่ยวกับระบบประสาทการมองเห็นและความรู้สึก ดังนั้นจึงสามารถสะสมได้ดีในเนื้อเยื่อต่างๆ รวมทั้งเนื้อเยื่อสมองของมนุษย์ สารประกอบปรอทอินทรีย์สามารถผ่านเนื้อเยื่อ Blood-brain Barrier (BBB) ที่ช่วยป้องกันไม่ให้สารพิษผ่านจากกระแสโลหิตเข้าสู่เนื้อเยื่อสมอง ดังนั้นสารปรอทอินทรีย์จึงสามารถทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลางได้อย่างถาวร

นอกจากนี้พิษของปรอทสามารถทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะต่างๆ ที่กระจายไปถึง เช่น ทำลายเนื้อเยื่อตับ ไफเบอร์ของกล้ามเนื้อหัวใจ หลอดไต กระเพาะ และลำไส้ส่วนดูโอดินัม (Duodenum) และทำให้การผลิตเซลล์เม็ดเลือดแดงของไขกระดูกลดลง เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกาย จะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ประเภทที่มีกลุ่มซัลไฮไดรล (Sulhydryl) โดยมีผลขัดขวางหรือยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เช่น ทำให้ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์น้อยลง หรือทำให้การเผาผลาญอาหารในไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) ไม่เกิดขึ้น เป็นต้น

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดปรอท

**Quanmin Li et al. (1996)** ศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออนปรอท  $Hg^{2+}$  ผ่านสารสกัด tri-n-octylamine (TOA) ที่ละลายในตัวทำละลายทอลูอิน สารละลายนำกลับ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความสามารถในการแยกไอออนปรอทของเยื่อแผ่นเหลวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ สารสกัด TOA และ Span 80 ในสารละลายป้อนที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ ซึ่งไอออน  $Hg^{2+}$  สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.025 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด TOA  $1.5 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ Span 80 3 % (w/v) และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร ในระบบนี้สามารถแยกไอออนปรอทออกจากไอออนของ Cu, Zn, Fe, Co, Ni, Pb, Mn และ Cd ได้อย่างสมบูรณ์

**A. Safavi และ E. Shams (1998)** ใช้สารประกอบเชิงซ้อนของ methyl red (BDH) เป็นตัวพา และเตรียมไอออนปรอทจากเมอร์คิวรี (II) ในเตรต เตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจาก 1,2-dichloroethane สารละลายนำกลับเป็นสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกรดซัลฟิวริก และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกอย่างเฉื่อย การวิเคราะห์ปริมาณไอออนปรอทใช้ A Philips Pye Unicam SP9 AAS พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที ไอออน  $Hg^{2+}$  สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ประมาณ 90 %

**Ali Jabbari et al. (2001)** ใช้สารประกอบเชิงซ้อน Potassium–dicyclohexyl–18–crown–6 ion เป็นตัวถ่ายโอนไอออนปรอท  $\text{HgCl}_4^{2-}$  เตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane) จากสารสกัด Dicyclohexyl–18–crown–6 (DC18C6) และใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ สารละลายนำกลับใช้ ammonium thiocyanate ( $\text{NH}_4\text{SCN}$ ) ในการวิเคราะห์ไอออนปรอทใช้วิธี cold vapor atomic absorption spectrometry การถ่ายโอนมวลของไอออนปรอทผ่านเยื่อแผ่นเหลวภายหลัง 2 ชั่วโมง ได้  $95.4 \pm 1.5 \%$  สัดส่วนไอออนโลหะอื่นต่อไอออนปรอท  $M^{n+}/\text{Hg}^{2+}$  molar ratio of  $\geq 100$  สามารถคัดเลือกไอออนปรอทจากสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนโลหะอื่นๆ ได้แก่  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Tl}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{3+}$

**Mojtaba Shamsipur et al. (2002)** ศึกษาการเคลื่อนที่ของไอออน  $\text{Hg}^{2+}$  ผ่านเยื่อแผ่นเหลวคลอโรฟอร์มซึ่งมีสารประกอบเชิงซ้อน tetrathia–12–crown–4 (TT12C4) เป็นไอออนตัวพา ไอออนปรอทสามารถเคลื่อนที่ได้โดยมีประสิทธิภาพผ่านเยื่อแผ่นเหลวเมื่อมีกรด ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) เป็นสารนำกลับ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง ไอออนปรอทสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้  $99 \pm 1 \%$

**Claudia Fontas et al. (2005)** ศึกษาการแยกและนำกลับไอออนปรอทโดยใช้โมดูลของเส้นใยกลวง 4 ชนิด ได้แก่ Accurel PP–2E, Celgard 2402, Celgard 2500 และ Durapore โดยเตรียมสารละลายไอออนโลหะ  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{HgCl}_2$  ใน  $\text{NaNO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด–เบสด้วยกรดไนตริกใช้สารละลายของคิวมีนและ decaline เป็นสารสกัด สารละลายนำกลับ คือ Thiourea ความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร พบว่าสามารถแยกและนำกลับไอออนปรอทได้ 100 % ที่ความเข้มข้นไอออนปรอท 10 mg/l

### 1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว

**สุภัทร สัมมาภักดิ์ (2549)** ศึกษาการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ที่อยู่ในรูปเค้กของสารประกอบของโลหะ โดยใช้การสกัดด้วยหอสกัดแบบจานมีรูยึดติดกับที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ (pulse sieve plate column) และใช้ tributylphosphate ที่ละลายในน้ำมันก๊าดเป็นสารสกัด จากผลการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายาก คือ ความเข้มข้นของ tributylphosphate ในน้ำมันก๊าดสำหรับการสกัดยูเรเนียมเท่ากับ 10 % โดยปริมาตร และความเข้มข้นของ tributylphosphate ในน้ำมันก๊าดสำหรับการสกัดทอเรียมเท่ากับ 20 % โดยปริมาตร ความเป็นกรดของสารละลายป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 3 อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้าต่อสารสกัดคงที่เท่ากับ 1 ต่อ 1 จังหวะการเขย่า (pulse setting number) เท่ากับ 7 ซึ่งความสามารถของหอสกัดในการสกัดยูเรเนียมและ



ทองเตรียม เท่ากับ 89.5 % และ 76.1 % ตามลำดับ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเท่ากับ 40 นาที

**Ramakul และ Pancharoen (2003)** ศึกษาการแยกไอออนแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในงานนี้นอกจากจะสามารถแยกธาตุแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันได้แล้ว ยังเป็นครั้งแรกที่นำการสกัดแบบเสริมฤทธิ์มาใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในการทดลองใช้สารสกัดสองชนิดผสมกันคือ สารสกัด HTTA และสารสกัด TOA ละลายในตัวทำละลายเบนซีน พบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA 0.01 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร และ pH ของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 จะได้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุด

**Patthaveekongka et al. (2003)** ทดลองนำธาตุแพลลาเดียมจากน้ำทิ้งในกระบวนการแปรรูปทองคำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในการทดลองใช้สารสกัด 2 ชนิดผสมกันคือ thioridazine HCl กับกรดโอเลอิกที่ละลายในคลอโรฟอร์ม และใช้ sodium nitrite เป็นสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ thioridazine ความเข้มข้น 0.0005 โมลต่อลิตร และกรดโอเลอิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร สามารถแยกธาตุแพลลาเดียมออกได้มากที่สุดเท่ากับ 29.1 % และถ้าให้สารละลายป้อนไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวง 3 รอบ จะสามารถแยกธาตุแพลลาเดียมได้ 65 %

**Ramakul et al. (2004)** ศึกษาการแยกไอออนผสมของทองแดง โครเมียม และสังกะสีออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในกระบวนการแยกใช้โมดูลของเส้นใยกลวงสองโมดูล และไหลผ่านครั้งเดียว โมดูลแรกจะสกัดไอออนทองแดงด้วย LIX84 โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับ และโมดูลที่สองจะสกัดไอออนโครเมียมออกด้วย Aliquat336 โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายนำกลับ ส่วนไอออนสังกะสีจะออกมาทางสารละลายป้อนขาออก (raffinate) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดและได้ค่าสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดจะลดลง ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมคือ 2.5 ร้อยละการนำกลับไอออนทองแดงและโครเมียมเท่ากับ 33 % และ 92 %

**Ramakul et al. (2005)** ศึกษาการแยกไอออนของธาตุในอนุกรมแลนทานาไนด์ชนิด trivalent ออกจากชนิด tetravalent โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสารละลายป้อนประกอบด้วยไอออนนีโอดีเมียม Nd (III) ซึ่งเป็นไอออนชนิด trivalent และไอออนซีเรียม Ce (IV) ซึ่งเป็นไอออนชนิด tetravalent โดยใช้ tri-n-octylamine (TOA) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนเป็นสารสกัด และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารละลาย

นำกลับ จากการทดลองพบว่าไม่สามารถแยกไอออนนีโอติเมียม Nd (III) แยกไอออนซีเรียม Ce (IV) ได้ถึง 71 % ภาวะที่ดีที่สุด คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเป็น 0.2 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 4 % โดยปริมาตร

**Pancharoen et al. (2005)** ศึกษาการแยกไอออนแลนทานัม (III) และซีเรียม (IV) ออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารละลายของกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายป้อน สารละลาย TOA เป็นสารสกัด และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารละลายนำกลับ สามารถแยกไอออนซีเรียมออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ในสารละลายนำกลับขาออก ส่วนไอออนของแลนทานัมไม่ถูกสกัด ภาวะที่ดีที่สุดในการสกัด คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 5 % โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 1 โมลต่อลิตร ร้อยละการสกัดไอออนซีเรียม เท่ากับ 67 %

**Patthaveekongka et al. (2006)** นำทฤษฎีสมดุลของปฏิกิริยาการสกัดมาใช้ในการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้โมดูลของเส้นใยกลวงสองโมดูล พิจารณาสมดุลที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว วิธีการทำการวาดกราฟตามทฤษฎีของ Henry's Law เพื่อหาค่าคงที่สมดุลและทำนายผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าผลจากการคำนวณทางทฤษฎีสอดคล้องกับผลการทดลอง ไอออนของธาตุที่นำมาทดลอง คือ แลนทานัม ซีเรียม นีโอติเมียม และแพลลาเดียม ที่ความเข้มข้น 100 ppm

**Ramakul et al. (2006)** ศึกษาการแยกไอออนซีเรียมจากสารละลายซัลเฟตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารละลาย TOA เป็นสารสกัด โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ งานวิจัยนี้ นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนมวลมาใช้ทำนายผลการทดลอง สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของทางด้านสารละลายป้อนและทางด้านเยื่อแผ่นเหลวได้  $9.47 \times 10^{-2}$  และ 6.303 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สรุปได้ว่าขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายโอนมวล คือ การถ่ายโอนมวลของไอออนซีเรียมจากสารละลายป้อนไปสารละลายเยื่อแผ่นเหลว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นที่น่าพอใจ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการแยกไอออนปรอทจากน้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาผลของการสกัดไอออนปรอทจากน้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.4.2 หาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนปรอทโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท ได้แก่
- (1) ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนในช่วง 0.01–2 โมลต่อลิตร
  - (2) ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์เคโรซีนในช่วง 0.1–10 % โดยปริมาตร
  - (3) ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 0.01–0.7 โมลต่อลิตร
  - (4) ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนในช่วง 1–100 ส่วนในล้านส่วน
  - (5) ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 20– 900 มิลลิลิตรต่อนาที

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

- 1.5.1 รวบรวมข้อมูลการปนเปื้อนปรอท ทฤษฎีการกำจัดปรอทวิธีต่างๆ และวิธีเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.5.2 เตรียมอุปกรณ์และชุดทดลองเส้นใยกลวง
- 1.5.3 หาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.5.4 หาค่าความเข้มข้นของสารสกัด tri-n-octylamine (TOA) ในสารละลายอินทรีย์เคโรซีนที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.5.5 หาค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.5.6 หาค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.5.7 หาอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท

- 1.5.8 การตรวจวัดความเข้มข้นของไอออนปรอทใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer
- 1.5.9 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.6.1 ทราบความเป็นไปได้ในการนำระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.2 ทราบผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.3 ทราบผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์เคโรซีนต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.4 ทราบผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.5 ทราบผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.6 ทราบผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท
- 1.6.7 เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการนำกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

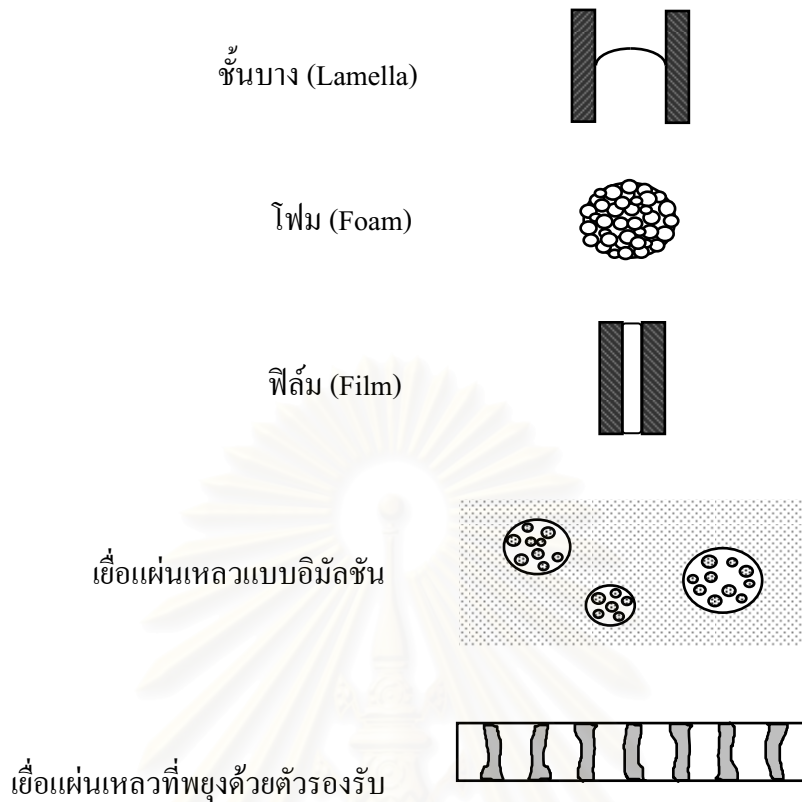
#### 2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) ประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่

1. ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน
2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ประกอบด้วยสารสกัด (Extractant) ที่ละลายในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน
3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (Stripping Phase) ทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนซึ่งถ่ายโอนผ่านเยื่อแผ่นเหลว

ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ (Stripping Solution) องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายโอนองค์ประกอบที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้

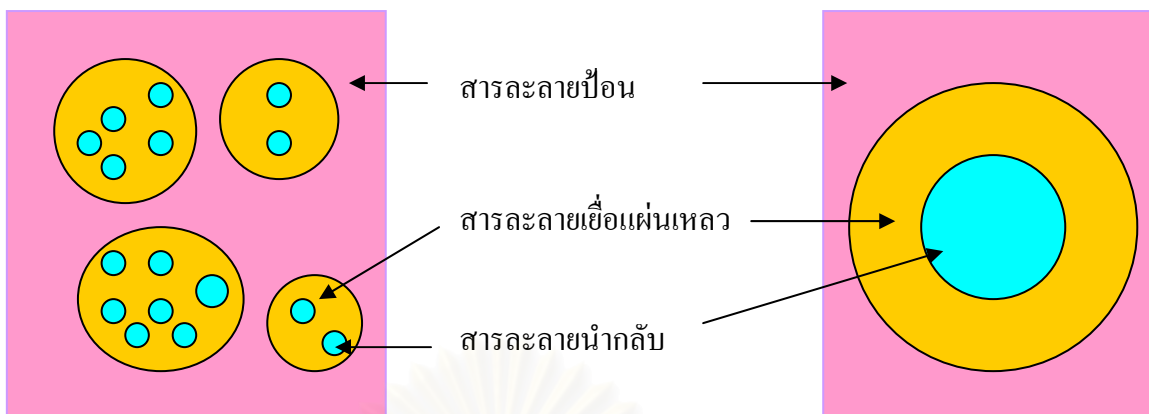
ดังนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าชนิดอื่นๆ (Schultz, 1988)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (Schultz, 1988)

### 2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปอิมัลชัน สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) และจะเกิดกระบวนการถ่ายโอนองค์ประกอบคั่งที่จะได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ส่วนสารละลายนำกลับจะอยู่ภายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกทีดังรูปที่ 2.2 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.2 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (ประกร รามกุล, 2544)

เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำไปลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็น วัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายป้อน ตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (Double Emulsion) กระบวนการแยกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ใน สารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และไอออนไฮโดรเนียม สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่าง ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่าง เยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไอออน ไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้ สารสกัดกลับมามีอีกครั้งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำ ปฏิกิริยาองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไปเมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยก จะไปอยู่ในสารละลายนำกลับสารละลายป้อนที่แยกองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไป (Raffinate) จะถูกแยกออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่าน กระบวนการสกัดแล้วไปแยกไอออนโลหะออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ สารละลายเยื่อแผ่น เหลวจะถูกนำกลับไปใช้ได้

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ

ข. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

ในกรณีที่สารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน มากระจายในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงวัฏภาคจากด้านใน ไปยังด้านนอก คือ น้ำ-น้ำมัน-น้ำ (w/o/w) แต่ถ้าสารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำมัน ก็จะกลับกันคือจะเรียงจาก น้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจึงมี สารลดแรงตึงผิวสองประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ

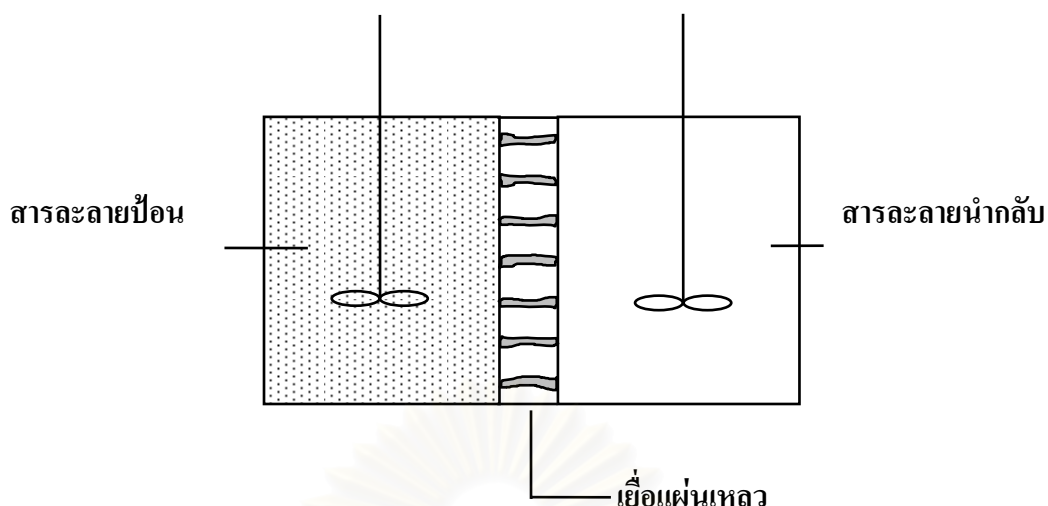
### 2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลว เอาไว้ในรูพรุนด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary Force) (Marr และ Kopp, 1989; Schultz, 1988) เพื่อให้ เยื่อแผ่นเหลวไม่มีการเคลื่อนที่และมีความเสถียรมากขึ้น เรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า Immobilize Liquid Membrane (Schultz, 1988) และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหา ของกระบวนการสกัด (Fernandez et al., 1987) รูพรุนจุลภาคที่ใช้เป็นตัวรองรับนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติด อยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น และอีกชนิดคือรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำมัน เป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น ตัวรองรับมีหลายชนิด ได้แก่ ชนิด แผ่นบาง (Flat Sheet) ชนิดแผ่นม้วน (Spiral Wound) และชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ คือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้ มีปริมาณน้อย (O' Hara และ Bohrer, 1989; Shiau และ Chen, 1993)

#### 2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat-Sheet Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ใช้ตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่มีความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น polypropylene (PP) polyethylene (PE) polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นต้น เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลเนื่องจากมี รูปแบบของตัวรองรับที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีอัตราการถ่ายโอนมวลต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลน้อย รูปที่ 2.3 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ ชนิดแผ่นบาง



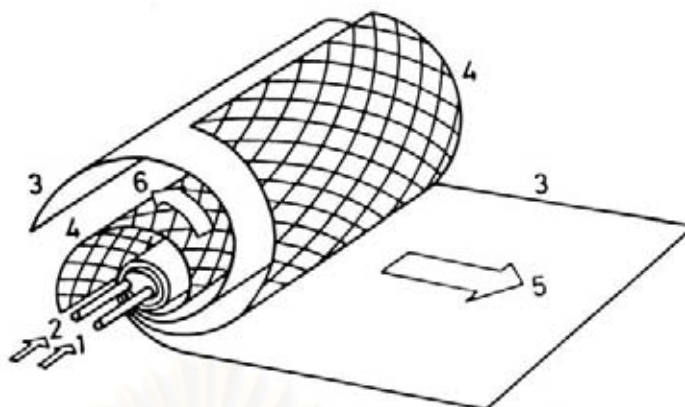


รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Komasawa et al., 1983)

#### 2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-Wound Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนผลิตขึ้น โดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบเพื่อนำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วและสารละลายนำกลับที่ได้จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

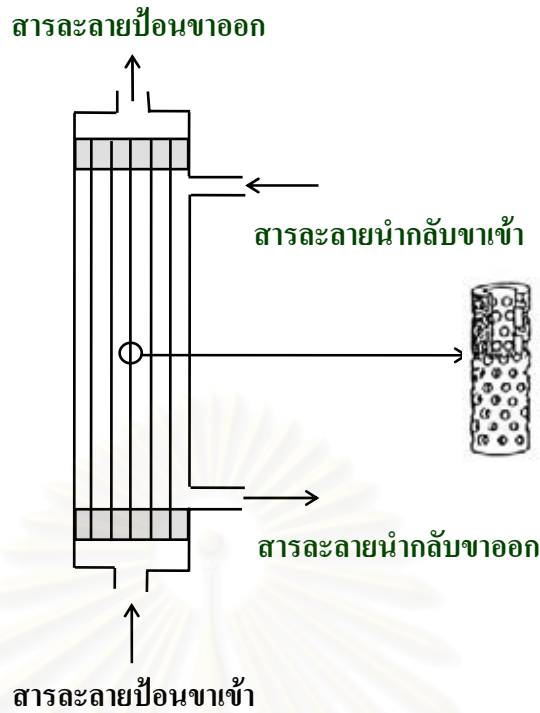


รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

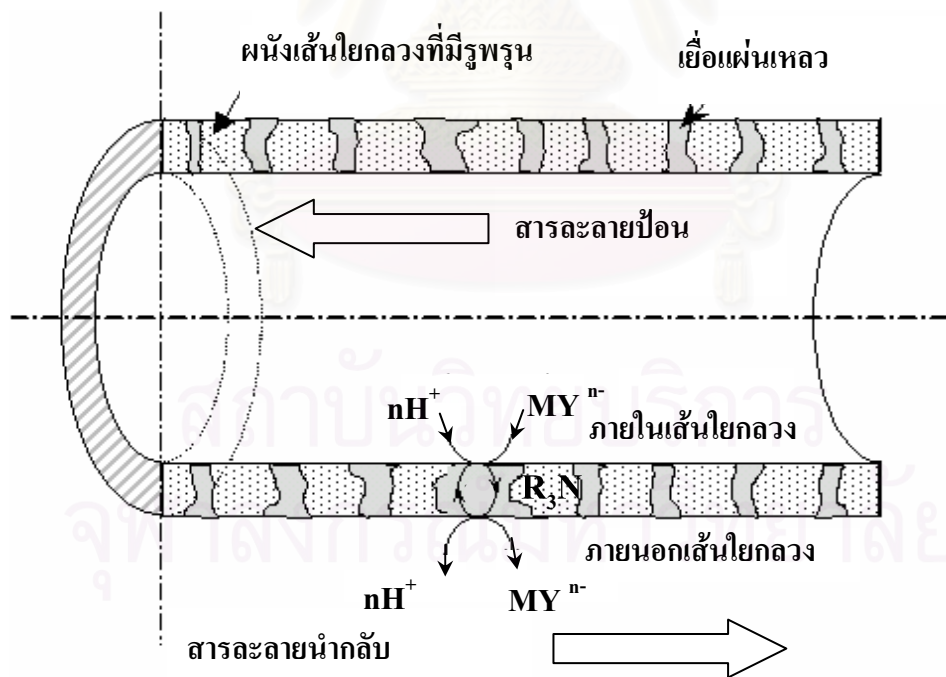
หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน	หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ
หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว	หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น
หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน	หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับ

#### 2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow-Fiber Supported Liquid Membrane: HFSLM)

เป็นรูปแบบที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (Resin) ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (Tube Side) และฝั่งเปลือก (Shell Side) ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้วิจัยว่าจะให้สายใดอยู่ฝั่งไหน ในงานวิจัยนี้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในฝั่งท่อและฝั่งเปลือกของโมดูลตามลำดับ สำหรับเยื่อแผ่นเหลวจะฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลทางเดียวกันและแบบสวนทางกัน รูปที่ 2.6 แสดงการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.5 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1988)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (ประกร รามกุล, 2544)

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับเมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายโอนไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (ประกร รามกุล, 2544)

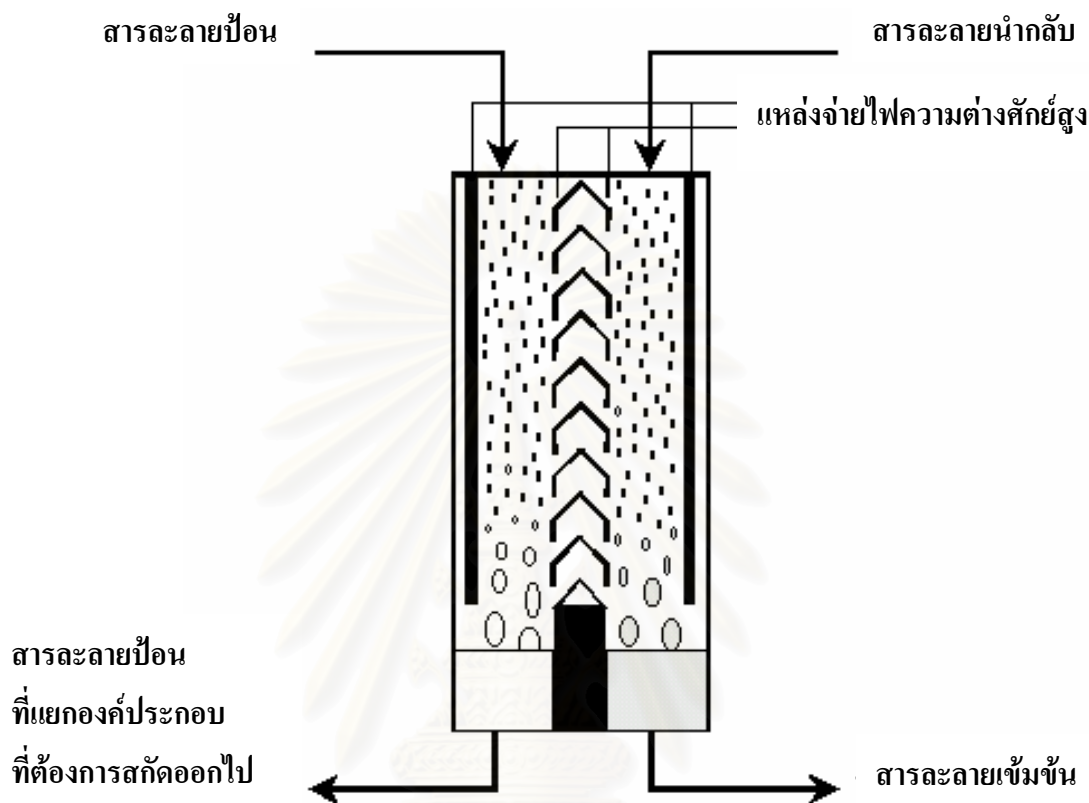
- มีสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีอัตราการถ่ายโอนมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีการคัดเลือกสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- สามารถที่จะใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถตัดแปลงได้
- สามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง (Yang และ Cussler, 1986; Dahuron และ Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi และ Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) จึงใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้

### 2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo-Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ชนิดหอสกัดแบบหยด หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว จึงสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ความเสถียรของเยื่อแผ่นเหลวและการ

ปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น ลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 2.7 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (ประกร รามกุล, 2544)

จากรูปที่ 2.7 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle Plate) เป็นโลหะซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกันแต่ละแผ่นเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันเท่ากัน โดยมีลวดโลหะร้อยยึดแผ่นกั้นแต่ละแผ่นเอาไว้ ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่บสำหรับกั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนที่แยกองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไป (Raffinate) กับสารละลายนำกลับขาออกในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับมีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวชั้นตอนทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์จนได้ระดับปริมาตรที่ต้องการเยื่อแผ่นเหลวนี้อจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต จากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว และเกิดการสกัดแยกและ

นำกลับสารที่ต้องการสกัดออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยเสริมให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ ถ้าหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไประหว่างแผ่นกั้น หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัฏภาคของสารละลายมีรูปร่างยืดยาวออกเป็นรูปร่างรีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวัฏภาคสารละลาย และตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคของสารละลายกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวดังกล่าว (Gu, 1990)

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มาก เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์เยื่อแผ่นเหลว ต้องมีความเป็นขั้วต่ำและใช้กับกระบวนการที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำจึงเป็นข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เป็นต้น ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุไลมาน, 2544)

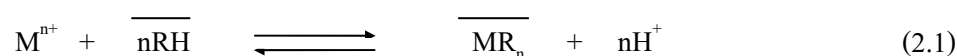
เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	- มีค่าการคัดเลือกสูง	- สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ	- มีเสถียรภาพสูง	- มีกำลังการผลิตต่ำ
- มีกำลังการผลิตสูง	- ใช้พลังงานสูง	- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ	- ประสิทธิภาพสูง	- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ดต่ำ
- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	- มีปัญหาการปนเปื้อน	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ	- มีการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว	- การปนเปื้อนต่ำ	- สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น
	- ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- ขยายขนาดง่าย		- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น
		- ใช้พลังงานต่ำ			- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก
		- อัตราการถ่ายโอนมวลสูง			

## 2.2 ชนิดของสารสกัด

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

### 2.2.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-COOH$ ,  $=P(O)OH$ ,  $-SO_3H$  ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ



เครื่องหมายขีดคั่นบนหมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ สมการนี้แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายอินทรีย์และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ ความสามารถในการสกัดสูงเมื่อวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เป็นกรดและไอออนโลหะมีประจุบวก (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดชนิดกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพหุวัณซ์ ได้แก่ อนุพันธ์อินทรีย์ของกรดฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดชนิดนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids: D2EHPA)

สารสกัดชนิดคีเลต ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยหมู่ที่ให้ไอออนลบ (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดชนิดคีเลตเชิงพหุวัณซ์จำกัดอยู่เพียง 2 ประเภท คือ (ก) ประเภทกลุ่ม 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) ประเภทกลุ่ม 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์

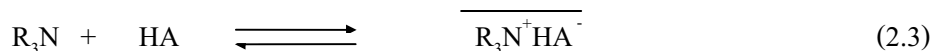
### 2.2.2 สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดด่างที่ใช้เชิงพหุวัณซ์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary:  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary:  $\text{R}_2\text{NR}$ ) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary:  $\text{R}_3\text{N}$ ) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary:  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นกับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะประจุลบ (Anionic Species) ที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ ปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดชนิดด่าง แสดงดังสมการที่ 2.2



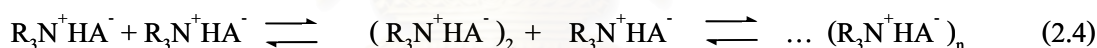


เพื่อให้การแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะเกิดขึ้นเอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม ดังสมการที่ 2.3



จากสมการที่ 2.3 เอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว  $R_3N^+HA^-$  ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ  $MY^{n-}$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ 2.2

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดเอมีนคือการรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นกับสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Ammonium Anion) การรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการที่ 2.4



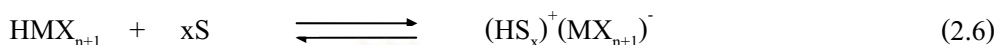
วัฏภาคที่สามจะทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifier) เช่น long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

### 2.2.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดชนิดขอลเวทหรือสารสกัดชนิดกลาง (Neutral Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบ ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ 2.5



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทดังสมการที่ 2.6



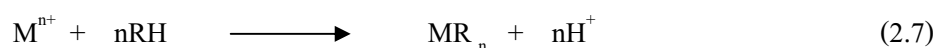
### 2.3 กลไกการถ่ายโอนมวล

การถ่ายโอนมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายโอนมวลแบบควบคู่ คือ กระบวนการถ่ายโอนมวลของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อถ่ายโอนองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายโอนมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านของสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน

การถ่ายโอนมวลแบบควบคู่แบ่งเป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนไฮโดรเนียม ( $H^+$ ) ในสารละลายป้อนและสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะในเยื่อแผ่นเหลว

#### 2.3.1 การถ่ายโอนมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport)

การถ่ายโอนมวลแบบสวนทางเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทางของสารประกอบเชิงซ้อน ( $MR_n$ ) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะ ( $M^{n+}$ ) ในสารละลายป้อนและสารสกัดกรด (RH) ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.7 กับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน

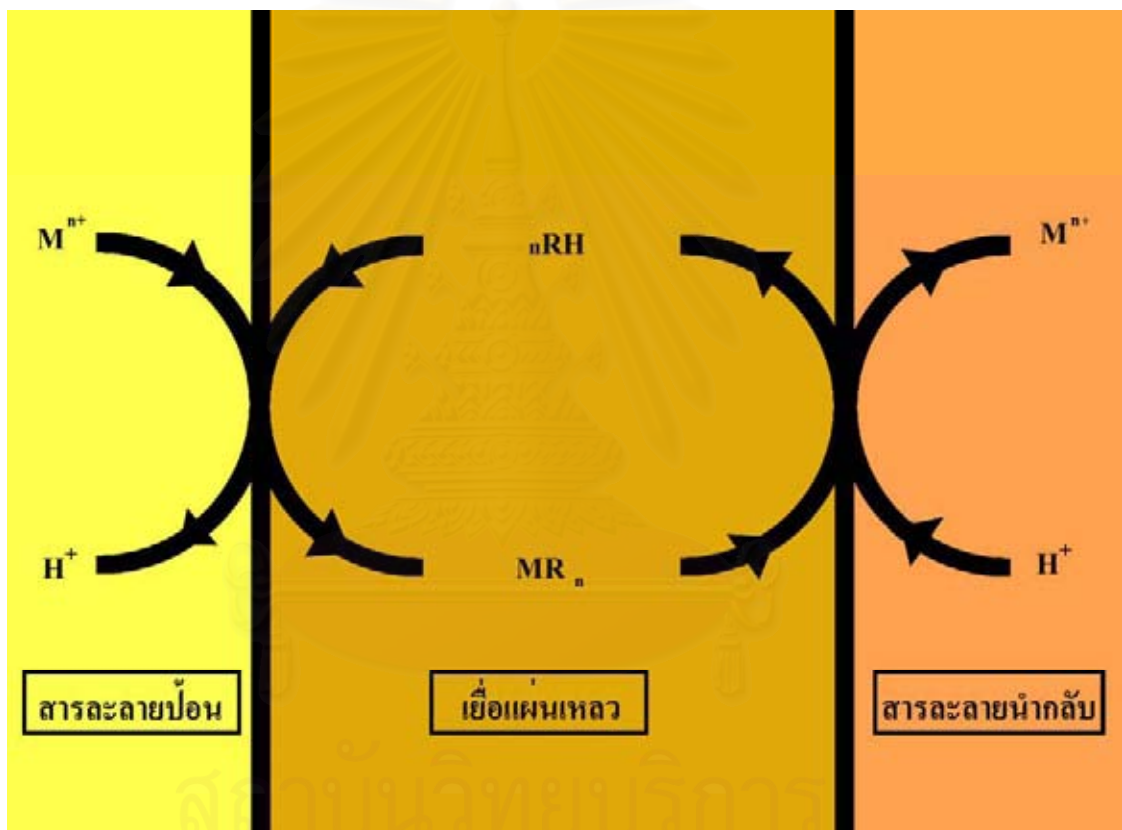


การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน ( $MR_n$ ) จะทำปฏิกิริยาย้อนกลับ

กับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (RH) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.8



ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแบบสวนทาง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแบบสวนทาง

### 2.3.2 การถ่ายโอนมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

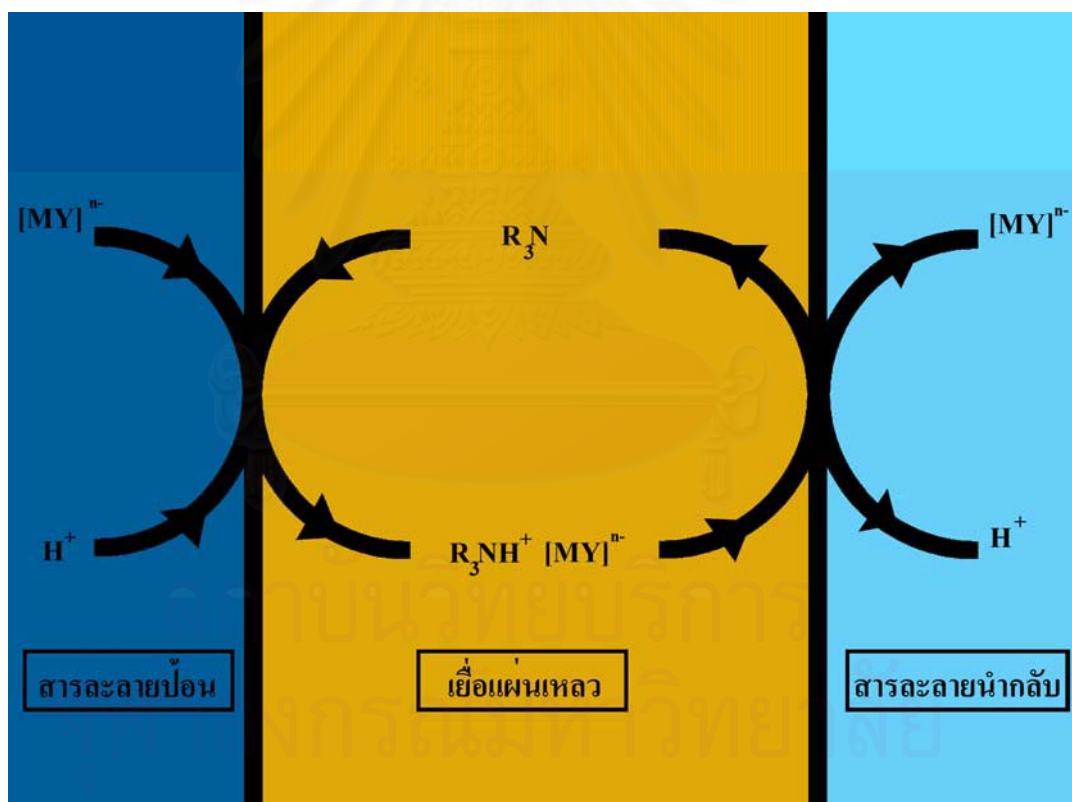
การถ่ายโอนมวลแบบไปทางเดียวกันเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะประจุลบ  $[MY]^-$  และไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน ไอออนโลหะประจุลบและไอออนไฮโดรเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดที่เป็นเบส ( $R_3N$ ) ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ( $R_3NH^+ [MY]^-$ ) ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.9



การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด ( $R_3N$ ) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.10



ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแบบไปทางเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ทิศทางการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแบบไปทางเดียวกัน

ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

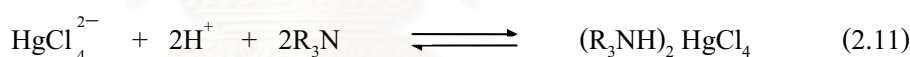
1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว

2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ ส่วนสารสกัดจะแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนเพื่อไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะอีก

## 2.4 ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

### 2.4.1 การหาค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

การศึกษาการสกัดไอออนปรอทผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ TOA ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์เคโรซีนเป็นสารสกัด ปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทแสดงดังสมการที่ 2.11



จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ดังสมการที่ 2.12

$$K_{ex} = \frac{[(\text{R}_3\text{NH})_2\text{HgCl}_4]}{[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{H}^+]^2[\text{R}_3\text{N}]^2} \quad (2.12)$$

### 2.4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient) หรืออัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลาย (Seader and Ernest, 1984; Rathore et al., 2001) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนปรอทแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$D = \frac{[(\text{R}_3\text{NH})_2\text{HgCl}_4]}{[\text{HgCl}_4^{2-}]} = K_{ex} [\text{H}^+]^2 [\text{R}_3\text{N}]^2 \quad (2.13)$$

### 2.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, $P$ )

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านใช้สมมติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ( $D$ ) ของการสกัดไอออนปรอททางด้านสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าทางด้านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับเป็นอย่างมาก (Danesi, 1984) โดยใช้สมการ

$$V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{\phi}{\phi+1} t \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \quad (2.15)$$

เมื่อ

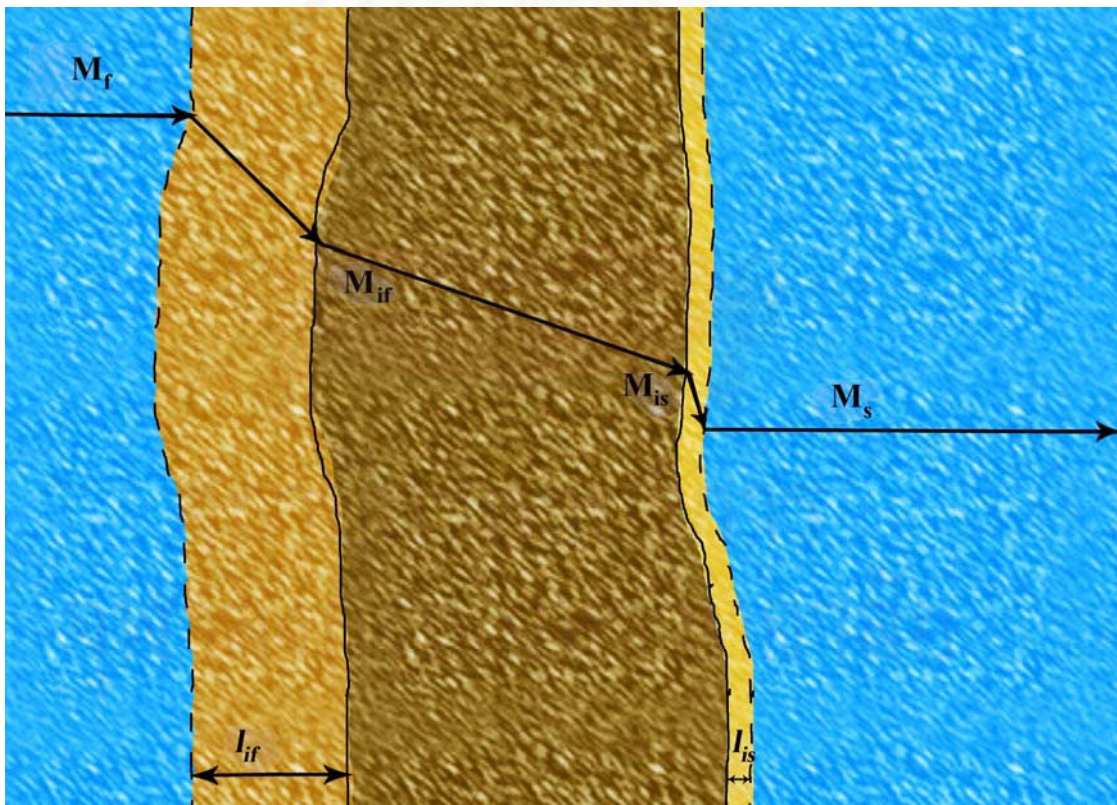
$P$	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	(เซนติเมตรต่อวินาที)
$C_{f,0}$	= ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น	(โมลต่อลิตร)
$C_f$	= ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา $t$	(โมลต่อลิตร)
$A$	= พื้นที่การถ่ายโอนมวล	(ตารางเซนติเมตร)
$V_f$	= ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$Q_f$	= อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
$L$	= ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$N$	= จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล	(เส้น)
$r_i$	= รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$\varepsilon$	= ความพรุนของเส้นใยกลวง	
$\pi$	= 3.1416	

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทำได้โดยสร้างกราฟระหว่าง  $-V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$  กับเวลา ( $t$ ) จะได้ความชันของกราฟ คือ  $AP \frac{\phi}{\phi+1}$  ซึ่งทำให้หาค่า  $P$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

#### 2.4.4 แบบจำลองการถ่ายโอนมวลและการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient)

แบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการแยกไอออนโปรทโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนโปรท ( $P$ ) ในการหาค่าอื่นๆ ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต้านทานการถ่ายโอนมวลโดยที่ชั้นตอนของกลไกการถ่ายโอนมวลมี 3 ชั้นตอน (Kumar et al., 2000) ดังรูปที่ 2.10 ได้แก่

1. ไอออนโลหะถ่ายโอนจากชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับเยื่อแผ่นเหลว
2. ไอออนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากไอออนโลหะทำปฏิกิริยากับสารสกัดและถ่ายโอนจากด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวไปยังอีกด้านหนึ่ง
3. ไอออนโลหะที่นำกลับซึ่งถ่ายโอนจากผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังชั้นฟิล์มของสารละลายนำกลับ



รูปที่ 2.10 แผนผังการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว (ประกร รามกุล, 2544)

เมื่อ

$M_f$  = ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)

$M_{if}$  = ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลิตร)

$M_{is}$  = ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)

$M_s$  = ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)

$l_{if}$  = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตร)

$l_{is}$  = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (เซนติเมตร)

และในแต่ละชั้นตอนจะเกิดความต้านทานการถ่ายโอนมวลขึ้น ได้แก่

1. ความต้านทานเมื่อของเหลวไหลผ่านเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยกลวง
2. ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนปรอทกับสารสกัดผ่านเข้าไปในเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกต้องไว้ในผนังรูพรุนของเส้นใยกลวง
3. ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายนำกลับและสารละลายอินทรีย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของเส้นใยกลวง

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของการถ่ายโอนมวลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.16 (Rathore et al., 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$r_{lm}$  = รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

$r_o$  = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

$k_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)



$k_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายนำกลับ (เช่นติเมตรต่อวินาที)

$P_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (เช่นติเมตรต่อวินาที)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว ( $P_m$ ) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient,  $D$ ) ดังสมการที่ 2.18 (Rathore et al., 2001)

$$P_m = Dk_m \quad (2.18)$$

รวมสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.18 จะได้

$$P_m = K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2 \quad (2.19)$$

โดยที่  $k_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว

ค่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลในสารละลายนำกลับสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายนำกลับ ( $k_s$ ) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) อยู่มากซึ่งมีสาเหตุมาจาก (ประกร รามกุล, 2544)

1. ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมีค่ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับมาก ดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนจะมีการรวมตัวกันของไอออนโลหะและกรดที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อน ในขณะที่ด้านกรนำกลับนั้นมีเพียงสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวจึงไม่เกิดการรวมตัวกันของตัวทำละลายที่จะทำให้เพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มทำให้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวได้โดยตรงตามสมการ (Bird et al., 1960)

$$k_i = \frac{D}{l_{if}} \quad (2.20)$$

และ

$$k_s = \frac{D}{l_{is}} \quad (2.21)$$

โดยที่  $D$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)

จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายนำกลับ ( $k_s$ ) อย่างมาก

## 2. จากสมการ

$$\text{Flux} = k_i (M_f - M_{if}) = k_s (M_{is} - M_s) \quad (2.22)$$

ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน ( $M_f$ ) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว ( $M_{if}$ ) มีค่ามากกว่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ( $M_{is}$ ) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ ( $M_s$ ) (Porter, 1990)

3. เนื่องจากที่ด้านการนำกลับจะมีการใช้สารละลายนำกลับเพียงชนิดเดียวคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะสัมผัสโดยตรงกับเยื่อแผ่นเหลวทำให้เกิดการละลายขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเราสามารถตัดเทอมสุดท้ายของสมการที่ 2.16 ทิ้งได้ และเมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว ( $P_m$ ) จากสมการที่ 2.19 ในสมการที่ 2.16 จะได้

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{im}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2} \quad (2.23)$$

ดังนั้นเมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P}$  กับ  $\frac{1}{[R_3N]^2 [H^+]^2}$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{r_i}{r_{im}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) สามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$

### บทที่ 3

#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง

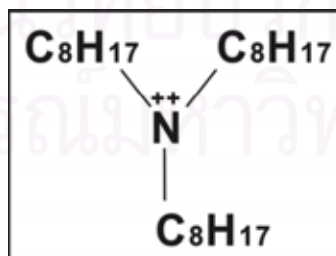
##### 3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำกลั่น

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารละลายป้อน (ไอออนโลหะ)	Mercury (II) chloride	HgCl <sub>2</sub>	Polskie Odczynniki Chemiczne SA
สารละลายป้อน (ตัวทำละลายไอออนโลหะ)	กรดไฮโดรคลอริก	HCl	Merck Ltd.
สารสกัด	Tri-n-octylamine (TOA)	C <sub>24</sub> H <sub>51</sub> N	Sigma Chemical Co.
ตัวทำละลายอินทรีย์	เคโรซีน	-	บริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)
สารละลายน้ำกลับ	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	Merck Ltd.

สารสกัด Tri-n-octylamine (TOA) ที่ใช้ในการทดลองมีสูตร โครงสร้างดังรูปที่ 3.1



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

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

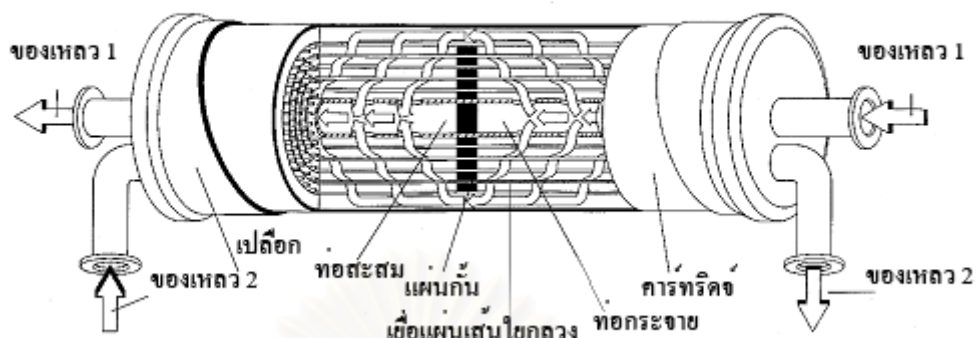
3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation (รูปที่ 3.2) ประกอบด้วย

- เครื่องสูบ 2 ชุด ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
- มาตรวัดและชุดควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด
- มาตรวัดความดัน 2 ชุด

3.2.2 อุปกรณ์เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรไพลีนชนิดมีรูพรุน Celgard<sup>®</sup> X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นโมดูล ดังรูปที่ 3.3 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel<sup>®</sup> Laboratory และ โมดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง



รูปที่ 3.3 โมดูลของเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิโพรไพลีนที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุเส้นใยกลาง	พอลิโพรไพลีน
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง ( $\mu\text{m}$ )	240
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง ( $\mu\text{m}$ )	300
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ ( $\mu\text{m}$ )	0.05
ความพรุนของเส้นใยกลาง (%)	30
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	$1.4 \text{ m}^2$ ( $15.2 \text{ ft}^2$ )
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	$29.3 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ( $74.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )
ขนาดของโมดูล (เส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาว)	$6.3 \times 20.3 \text{ cm}$ ( $2.5 \times 8 \text{ inch}$ )
ความดันแตกต่างสูงสุด ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	4.2
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการ ( $^{\circ}\text{C}$ )	1-60

3.2.3 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP–AES) Perkin

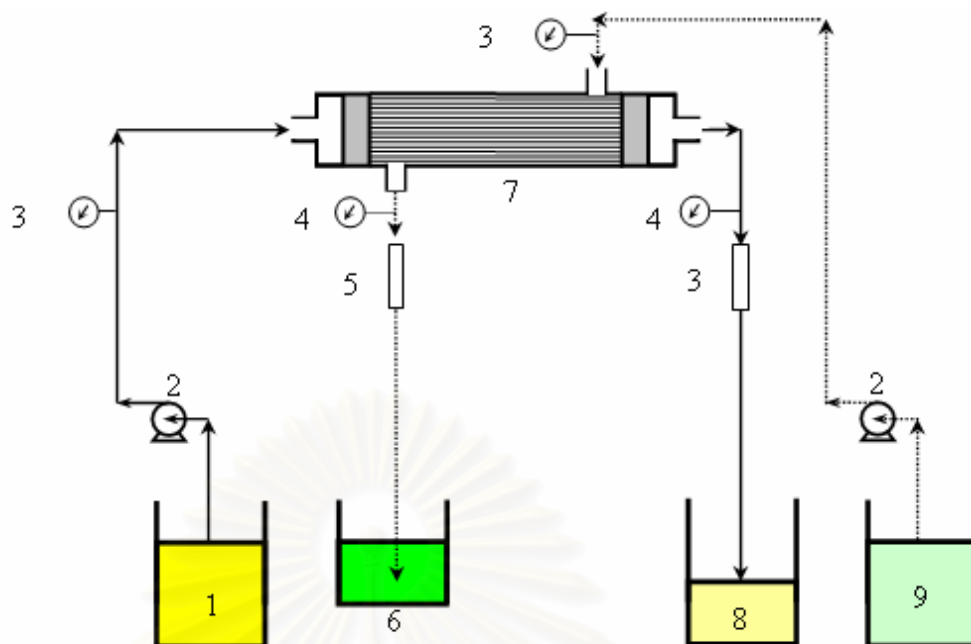
Elmer Model PLASMA–1000 ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอท

3.2.4 อุปกรณ์เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ปิเปต กรวยแยกสาร แท่งแก้วคนสาร

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) โดยชั่ง  $\text{HgCl}_2$  0.677 กรัม (สำหรับสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตร) ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
- 3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงคอลัมน์จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลอง โมดูลของเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ (ใช้ความเข้มข้นของไอออนปรอทมากที่สุดได้ไม่เกิน 100 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากเป็นค่าความสามารถสูงสุดของเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) Perkin Elmer Model PLASMA-1000)
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry



**รูปที่ 3.4** การปฏิบัติการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว โดยที่ ① คือ ถังของสารละลายป้อนขาเข้า ② คือ ปั๊ม ③ คือ เกจวัดความดันขาเข้า ④ คือ เกจวัดความดันขาออก ⑤ คือ มาตรวัดอัตราการไหล ⑥ คือ ถังของสารละลายนำกลับขาออก ⑦ คือ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง ⑧ คือ ถังของสารละลายป้อนขาออก ⑨ คือ ถังของสารละลายนำกลับขาเข้า (เอกพิชญ์ ทรงคุณ, 2548)

### 3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่มีความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังหัวข้อ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
- 3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงคอลัมน์จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ความเข้มข้น 0.1 %

โดยปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร ยึดตรึงในรูปพรมจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง

- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลของเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ที่ใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงเป็น 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5 และ 10 % โดยปริมาตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry

### 3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังหัวข้อ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
- 3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงคอลัมน์ ปริมาตร 1 ลิตร จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ยึดตรึงในรูปพรมจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลของเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์



- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP–AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry

### 3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.3
- 3) เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลของเส้นใยกลางคอลัมน์ ปริมาตร 1 ลิตร จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลางในชุดทดลอง
- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลอง โมดูลของเส้นใยกลาง โดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทเป็น 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP–AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry

### 3.3.5 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังหัวข้อ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.3
- 3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงคอลัมน์ ปริมาตร 1 ลิตร จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ยึดตรึงในรูปทรงจลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลของเส้นใยกลวงโดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ 40, 60, 80, 100, 300, 500, 700 และ 900 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry

### 3.3.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ

- 1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทที่ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังหัวข้อ 3.3.1 ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลาย

กรดไฮโดรคลอริกที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์

- 2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.3
- 3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงคอลัมน์จากสารละลายผสมของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ความเข้มข้น 0.1 % โดยปริมาตร ปริมาตร 1 ลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- 4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลของเส้นใยกลวงโดยมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกทุกๆ 5 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ใน Kerosene Jet A-1 ที่ใช้ในโมดูลของเส้นใยกลวงเป็น 0.3, 0.5, 0.7, 1 และ 3 % โดยปริมาตร ตามลำดับ (ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด TOA มากที่สุด 3 % โดยปริมาตร เนื่องจากเป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2)
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-AES และใช้วิธีวิเคราะห์ ICP atomic emission spectrometry

### 3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวง

ต้องทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวงทุกครั้งหลังจากทำการทดลองเนื่องจากสารเคมีหรือสิ่งสกปรกต่างๆ สามารถเข้าไปอุดตันในรูพรุนเส้นใยกลวงได้ง่ายและจะขวางกั้นการไหลของสารละลายได้ การทำความสะอาดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวงประมาณ 30 นาที

- 2) เลือกใช้ตัวทำลายที่สามารถละลายสารที่อุดตันในรูพรุนของเส้นใยกลงได้ ในที่นี้เลือกใช้กรดฟอสฟอริกผสมกับกรดไนตริกในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2 : 3 ให้ไหลวนในโมดูลเส้นใยกลงเป็นเวลา 45 นาที
- 3) ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลงประมาณ 30 นาที จนแน่ใจว่าสามารถกำจัดตัวทำลายในรูพรุนของเส้นใยกลงได้หมด
- 4) หลังจากทำความสะอาดแล้วอาจทำให้เส้นใยกลงแห้งโดยให้อากาศไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลงหรืออาจจะใช้ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ไหลวนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เส้นใยกลงแห้งเร็วยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัด (Percent Extraction, % E) ค่าร้อยละการนำกลับ (Percent Recovery, % R) ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอท (Flux of Extraction,  $J_{\text{extract}}$ ) และค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอท (Flux of Recovery,  $J_{\text{recovery}}$ ) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการสกัดไอออนปรอทเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้

ค่าร้อยละการสกัดคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้ากับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกกับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า คูณด้วย 100 ดังสมการที่ 4.1 ค่าร้อยละการนำกลับคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกกับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า คูณด้วย 100 ดังสมการที่ 4.2 สำหรับค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้ากับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกคูณกับปริมาตรของสารละลายป้อนขาออกกับผลคูณของพื้นที่ผิวของเส้นใยกลวงกับเวลาในการดำเนินการ ดังสมการที่ 4.3 และค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกคูณกับปริมาตรของสารละลายนำกลับขาออกกับผลคูณของพื้นที่ผิวของเส้นใยกลวงกับเวลาในการดำเนินการ ดังสมการที่ 4.4

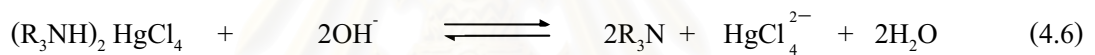
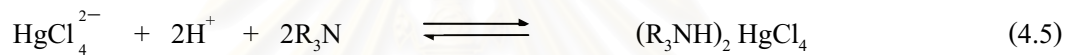
$$\% E = \frac{C_{\text{feed}} - C_{\text{raf}}}{C_{\text{feed}}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\% R = \frac{C_{\text{st}}}{C_{\text{feed}}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$J_{\text{extract}} = \frac{(C_{\text{feed}} - C_{\text{raf}}) \times V}{A \times t} \quad (4.3)$$

$$J_{\text{recovery}} = \frac{C_{\text{st}} \times V}{A \times t} \quad (4.4)$$

เมื่อพิจารณาในโมดูลของเส้นใยกลวงซึ่งบรรจุสารสกัด TOA พบว่าเกิดการสกัดไอออนปรอท สารสกัด TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่มีประจุลบ ซึ่ง ไอออนปรอทจะแตกตัวให้ประจุลบ ( $\text{HgCl}_4^{2-}$ ) ปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท แสดงดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 โดย  $\text{R}_3\text{N}$  คือ สารสกัด TOA

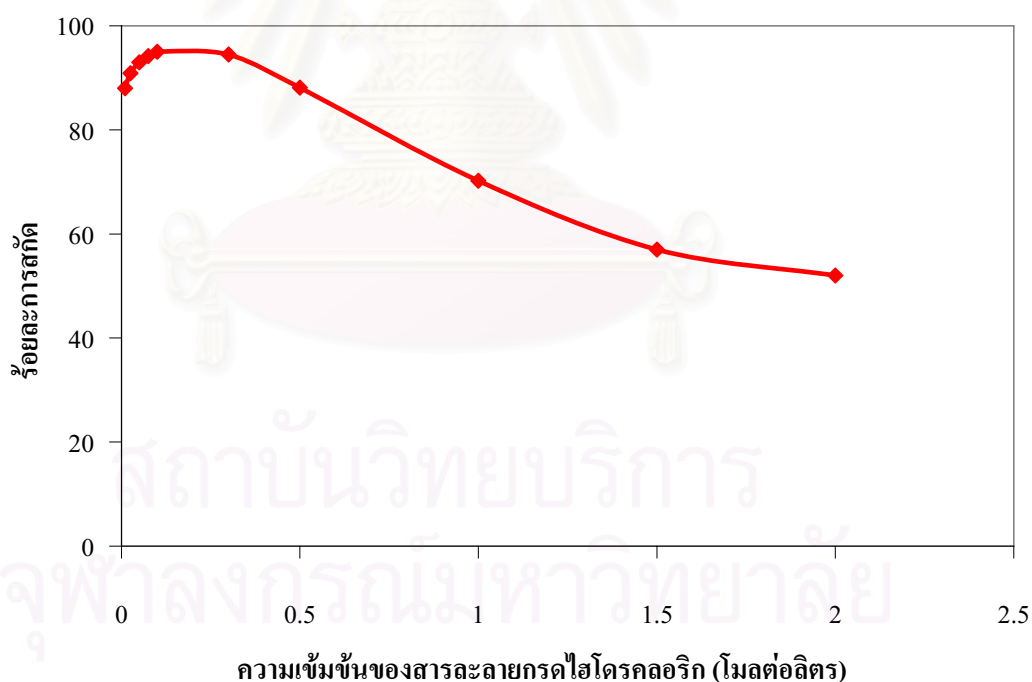


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

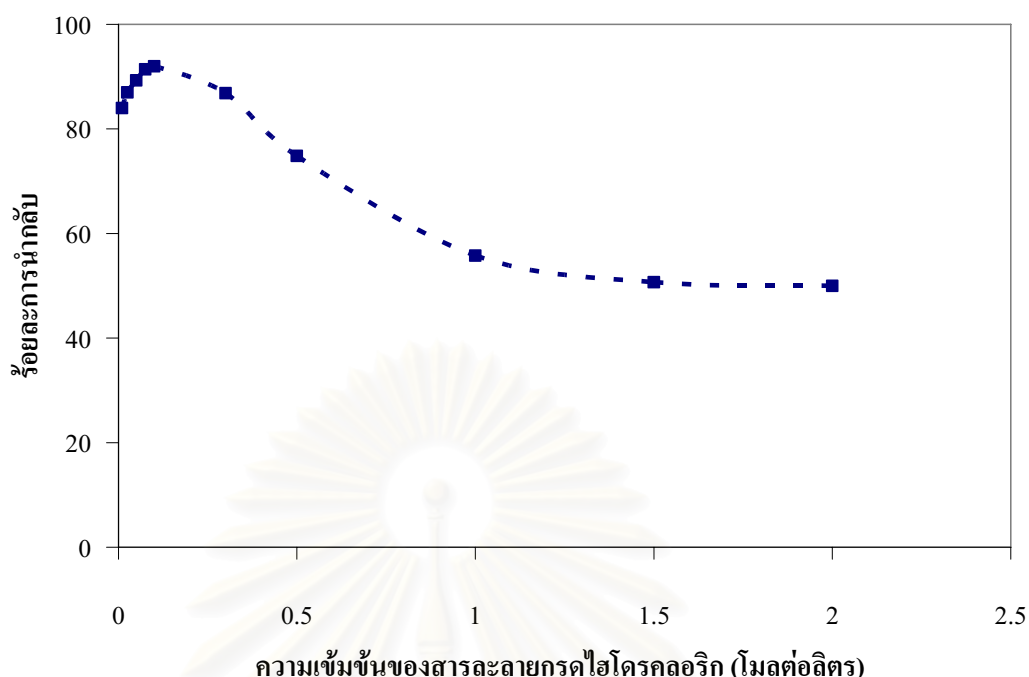
#### 4.1 ผลการทดลอง

##### 4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โมลต่อลิตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายป้อนมีค่า 100 ppm โมดูลของเส้นใยกลวงบรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 1 % โดยปริมาตร ที่ละลายในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่าน โมดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[TOA]_m = 1$  % โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.05$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[TOA]_m = 1$  % โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.05$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.1 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดต่ำลงเนื่องจากในสมการการสกัดตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ (Kotz และ Purcell, 1991) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้สมดุลเลื่อนไปข้างหน้าทำให้การสกัดไอออนปรอทมีค่าสูงขึ้นและปริมาณไอออนปรอททางด้านผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนมีค่ามากกว่า 0.1 โมลต่อลิตร การสกัดไอออนปรอทจะมีค่าลดลง เนื่องจาก TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสจะทำการสกัดไอออนโลหะได้ดีที่ภาวะความเป็นกรดไม่สูง (Pancharoen et al., 2005) ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ร้อยละการสกัดลดลง

ส่วนค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าร้อยละการสกัดเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสม คือ 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งมีค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเท่ากับ 95 และ 92 ตามลำดับ นอกจากนี้ถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าฟลักซ์ของการสกัด



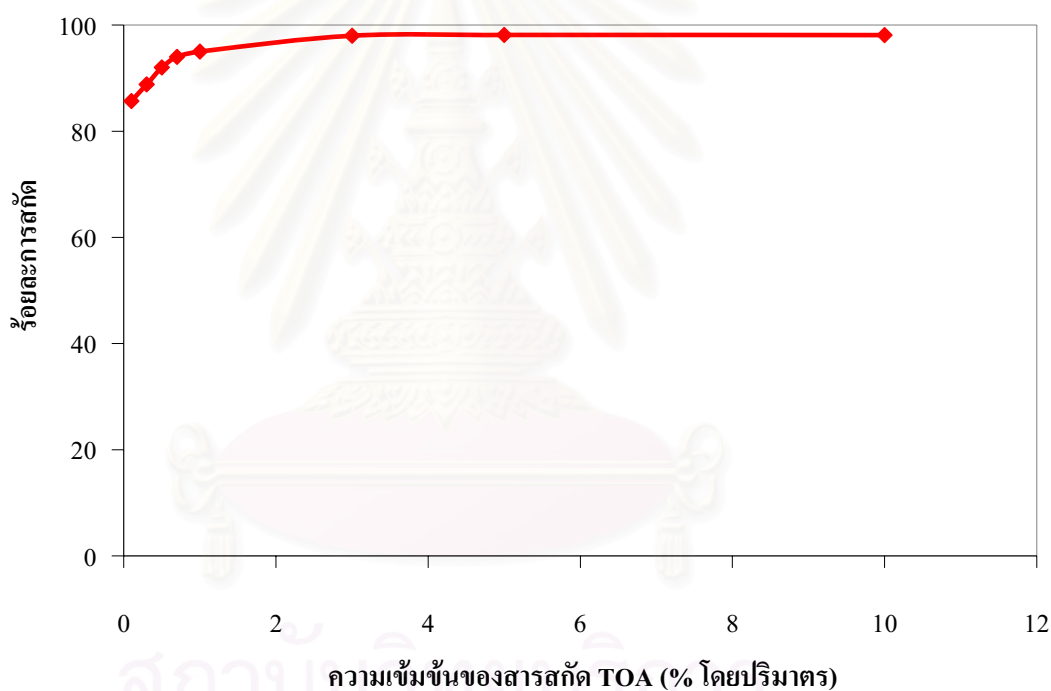
ไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอท จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร จะให้ค่าทั้งสองสูงสุด

**ตารางที่ 4.1** ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน

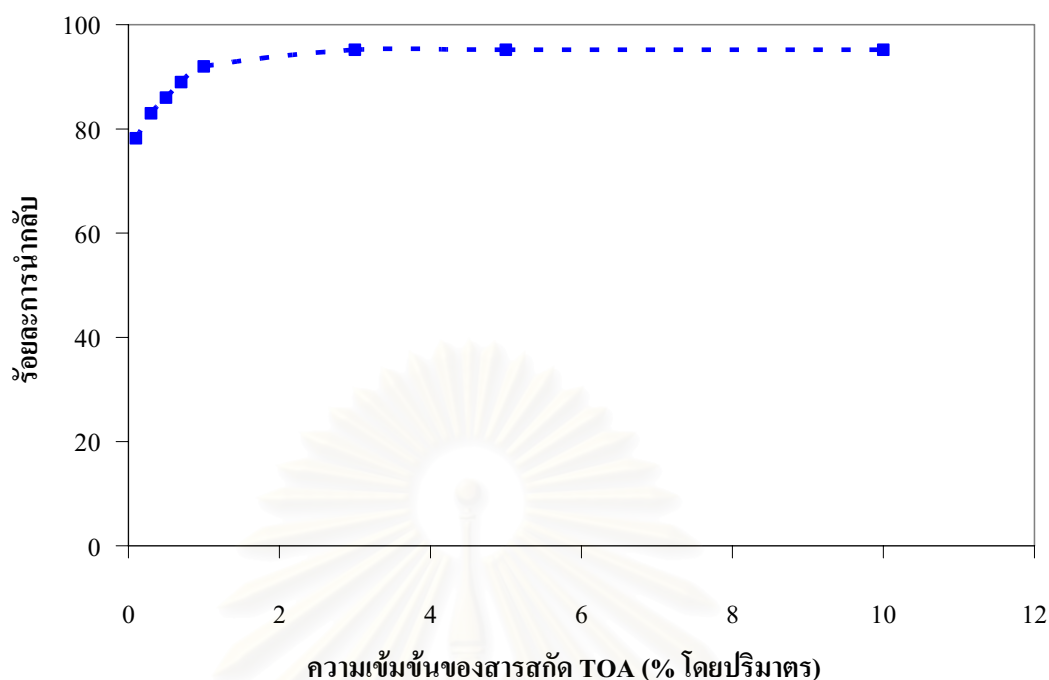
ความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (mol/l)	ฟลักซ์ของการสกัด $J_{\text{extract}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$	ฟลักซ์ของการนำกลับ $J_{\text{recovery}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$
0.01	2.69	2.57
0.025	2.72	2.60
0.05	2.74	2.64
0.075	2.75	2.66
0.1	2.78	2.69
0.3	2.73	2.51
0.5	2.71	2.30
1	2.20	1.74
1.5	1.80	1.60
2	1.56	1.50

#### 4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอท

การศึกษาปัจจัยผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้พิจารณาจากค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทที่ได้ โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA เป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5 และ 10 % โดยปริมาตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายป้อนมีค่า 100 ppm ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.1 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.1) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงครึ่งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.05$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.05$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด TOA ในโมดูลของเส้นใยกลวง พบว่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA จาก 0.1 จนถึง 3 % โดยปริมาตร อธิบายได้ด้วยทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากไอออนปรอทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $(R_3NH)_2HgCl_4$  กับสารสกัดและไอออนปรอทถูกสกัดมากขึ้น ทำให้เกิดการนำกลับไอออนปรอทมากขึ้นเช่นกัน และเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 3 % โดยปริมาตร ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากขีดจำกัดของรูพรุนจุลภาคภายในเส้นใยกลวงซึ่งมีผลจำกัดพื้นที่ในการถ่ายโอนมวล กล่าวคือเส้นใยกลวงสามารถบรรจุสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้ในปริมาณจำกัดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แม้เพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวก็ไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น (Luccio et al., 2000) ทำให้ขวางกั้นการถ่ายโอนมวลไอออนปรอทจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวหรือก็คือจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง

ไอออนปรอทกับสารสกัดที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีค่าน้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein (Schulz, 1988 และ Cussler, 1997)

$$D = \frac{k_B T}{6\pi \eta r} \quad (4.7)$$

เมื่อ

D	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	(m <sup>2</sup> /s)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว	(K)
$\eta$	=	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว	(kg/m s)
r	=	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน	(m)
$k_B$	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.3807 \times 10^{-23}$ J/K	
$\pi$	=	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416	

นอกจากนี้ถ้าพิจารณาตารางที่ 4.2 ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 3 % โดยปริมาตร เนื่องจากขีดจำกัดในการถ่ายโอนมวลดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทจากผลการทดลองและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์คือราคาของสารสกัด ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัด TOA ที่ความเข้มข้น 3 % โดยปริมาตร ซึ่งได้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเท่ากับ 98 และ 95 ตามลำดับ

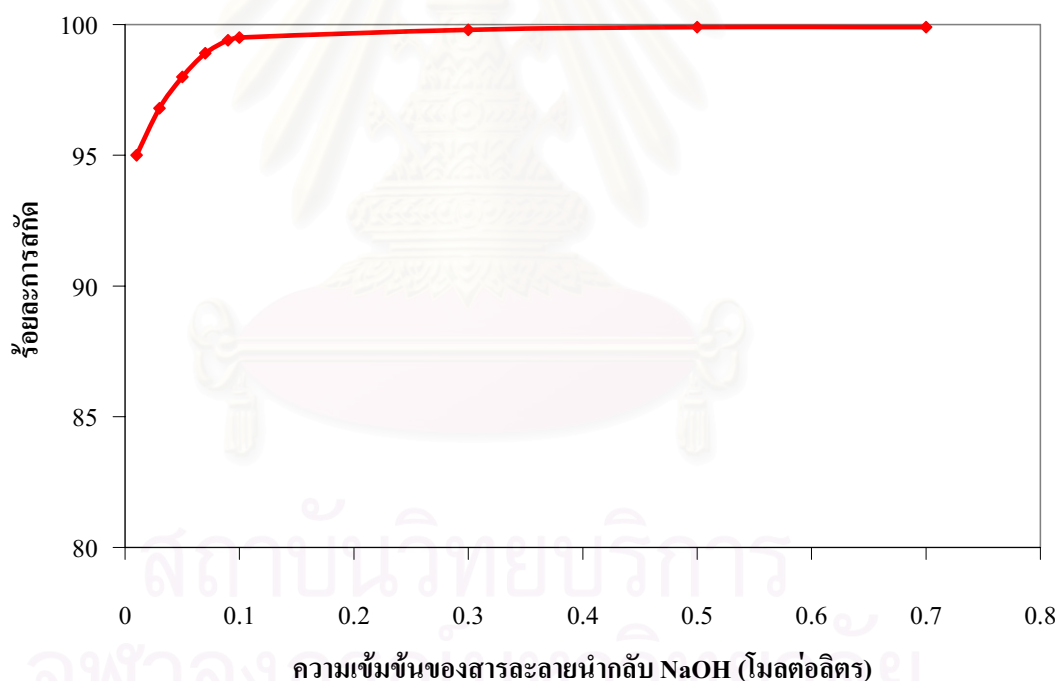
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเชื้อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง

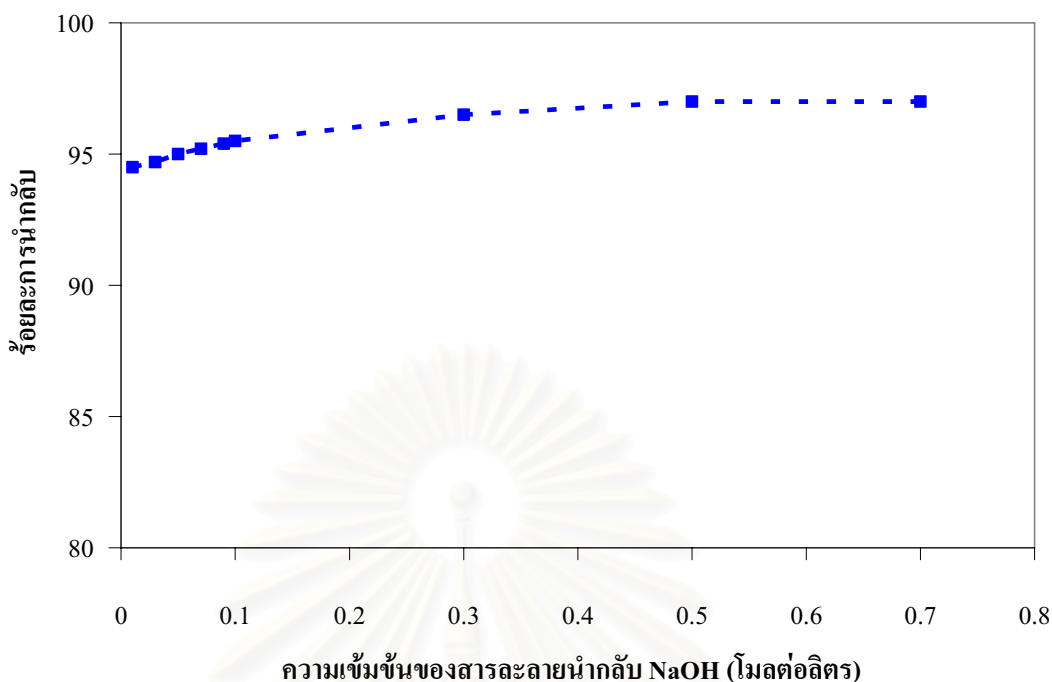
ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (% โดยปริมาตร)	ฟลักซ์ของการสกัด $J_{\text{extract}}^*$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$	ฟลักซ์ของการนำกลับ $J_{\text{recovery}}^*$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$
0.1	1.83	1.67
0.3	2.74	2.56
0.5	2.89	2.71
0.7	3.04	2.88
1	3.24	3.14
3	3.37	3.27
5	3.37	3.27
10	3.37	3.27

### 4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท

การศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนปรอทจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารสกัดข้างต้นที่ให้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทสูงสุด โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โมลต่อลิตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของปรอทในสารละลายป้อนมีค่า 100 ppm ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.1) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในโมดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 3 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.2) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[TOA]_m = 3$  % โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้บโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการนำกลั้บไอออนปรอท เมื่อ  $[\text{Hg}^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[\text{HCl}]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[\text{TOA}]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้บโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.01 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าค่าร้อยละการสกัดและการนำกลั้บไอออนปรอทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาการนำกลั้บจากสมการที่ 4.6 ที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้บโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเกิดมากขึ้นหรือการนำกลั้บมากขึ้น ซึ่งการนำกลั้บที่ดีขึ้นนี้จะส่งผลให้การสกัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยและหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลของโมดูลเส้นใยกลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายโอนมวลที่จำกัด ยืนยันได้จากค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลั้บไอออนปรอท จากตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลของเส้นใยกลวง

ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (mol/l)	ฟลักซ์ของการสกัด $J_{\text{extract}}^*$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$	ฟลักซ์ของการนำกลับ $J_{\text{recovery}}^*$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$
0.01	2.91	2.89
0.03	3.05	2.99
0.05	3.37	3.27
0.07	3.40	3.28
0.09	3.42	3.29
0.1	3.43	3.30
0.3	3.45	3.33
0.5	3.45	3.35
0.7	3.45	3.35

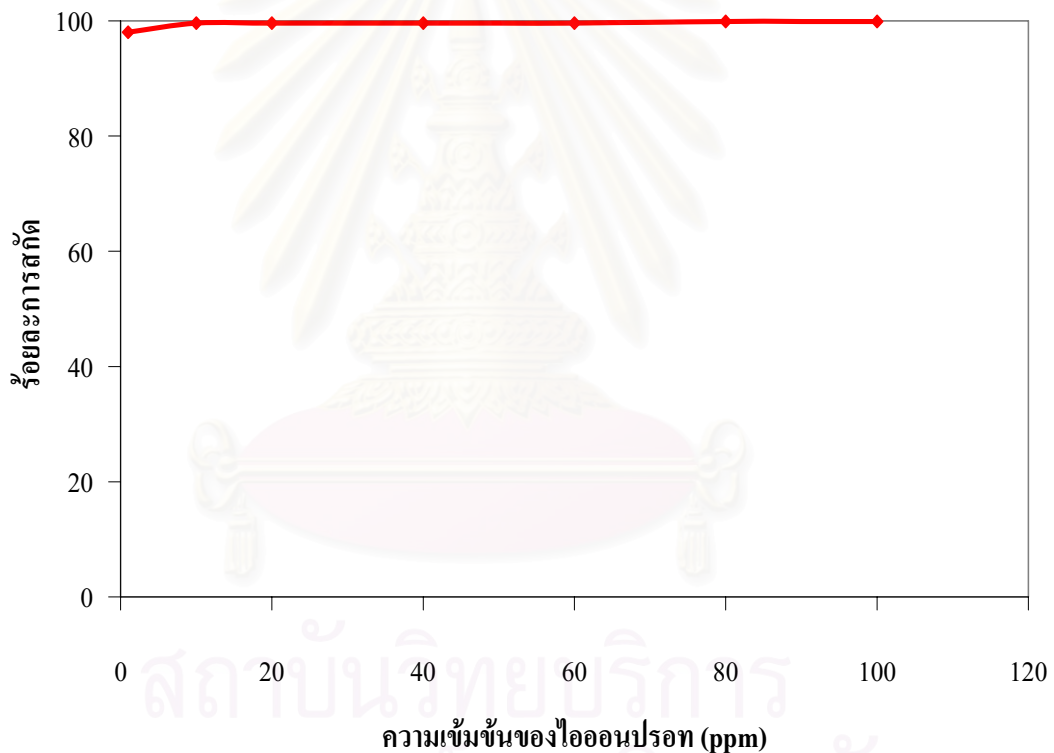
จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.01 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร และเมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.3 ร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทจากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเป็น 100 และ 97 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

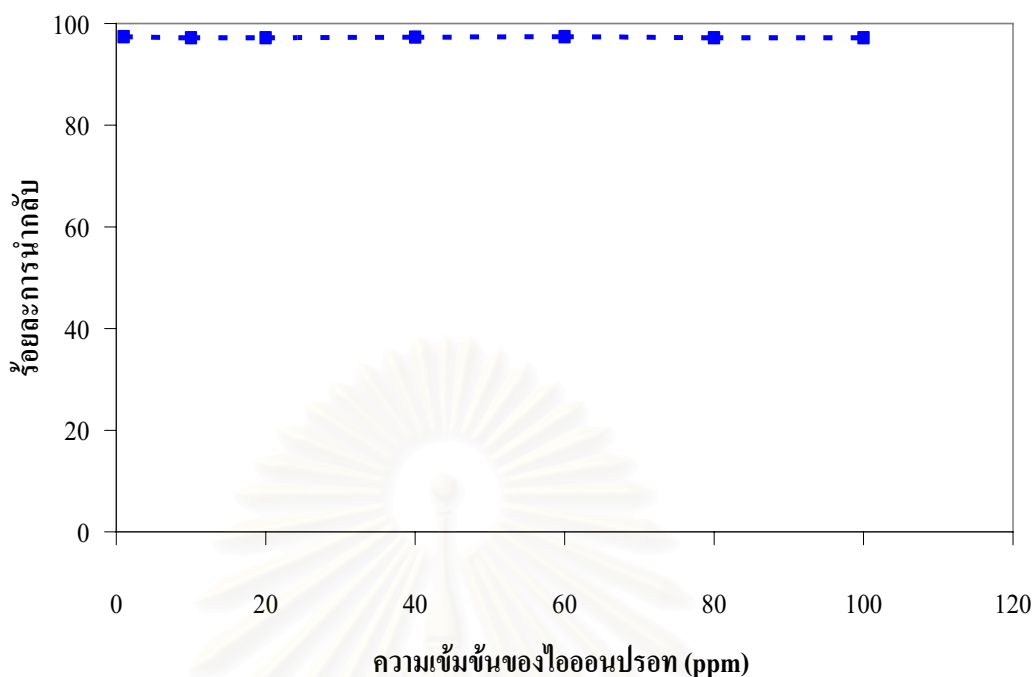


#### 4.1.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวง ทำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทเป็น 1, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.1) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในโมดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 3 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.2) และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.3) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[TOA]_m = 3$  % โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[TOA]_m = 3\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในช่วงที่ทำการทดลองค่อนข้างจะไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท แต่จะมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากฟลักซ์ของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนน้อยมากๆ ในช่วง 25 ถึง 180 ppm (Rovira และ Sastre, 1988) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

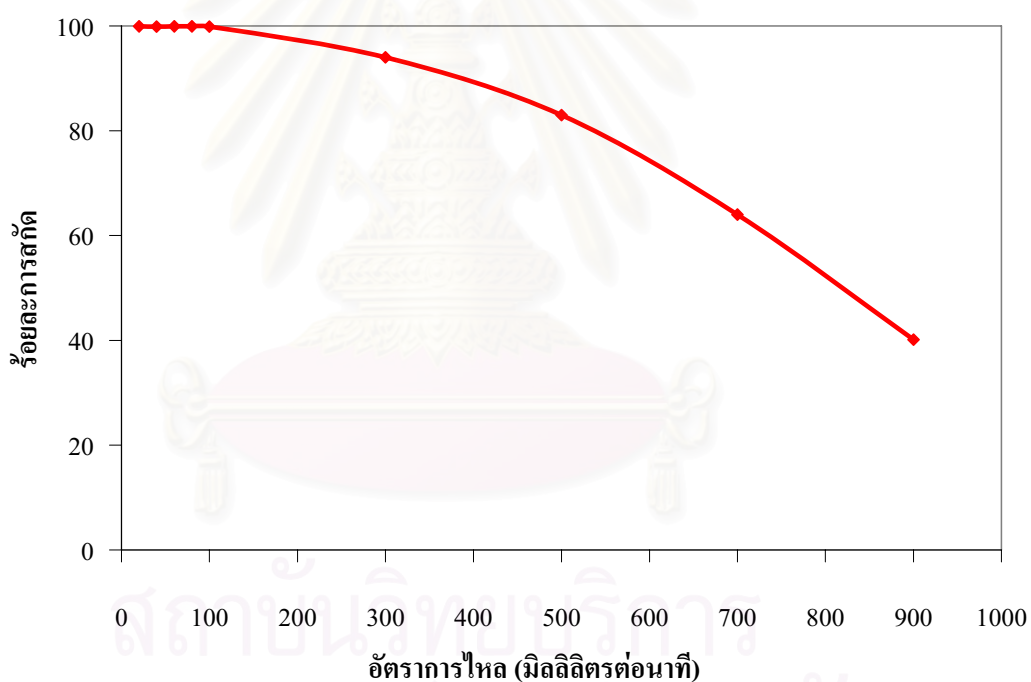
ตารางที่ 4.4 ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในช่วง 1–100 ppm

ความเข้มข้นของไอออนปรอท (ppm)	ฟลักซ์ของการสกัด	ฟลักซ์ของการนำกลับ
	$J_{\text{extract}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$	$J_{\text{recovery}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$
1	0.05	0.04
10	0.37	0.36
20	0.71	0.69
40	1.45	1.41
60	2.14	2.09
80	2.84	2.77
100	3.45	3.36

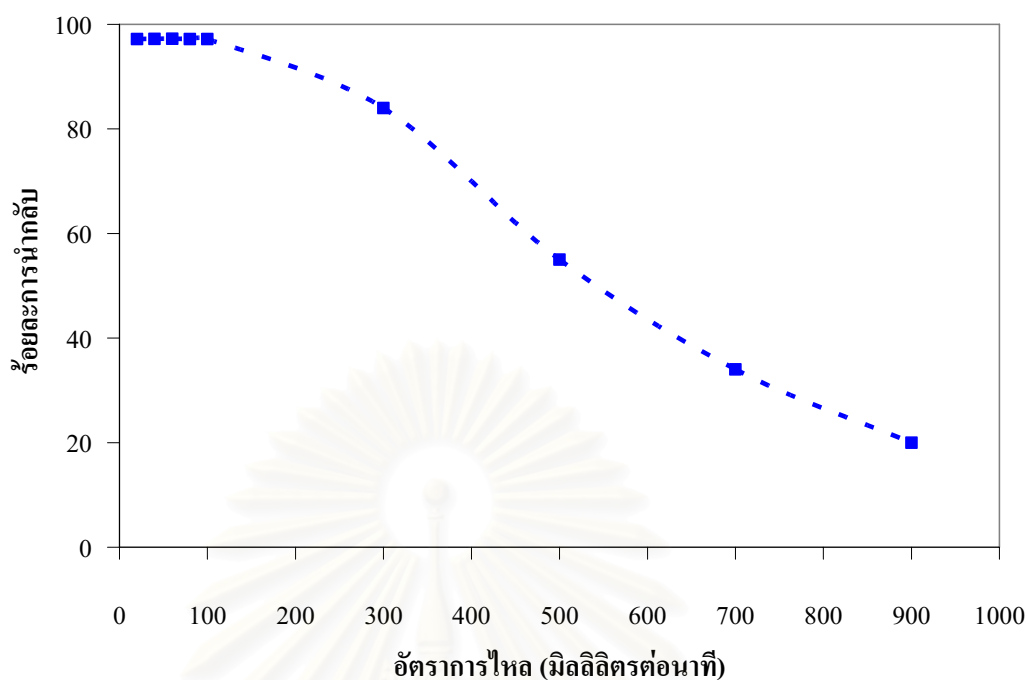
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1.5 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงทำโดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเป็น 20, 40, 60, 80, 100, 300, 500, 700 และ 900 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.1) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในโมดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 3 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.2) และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.3) ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[TOA]_m = 3$  % โดยปริมาตร และ  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ  $[\text{Hg}^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[\text{HCl}]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[\text{TOA}]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $[\text{NaOH}]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทจะลดลงเนื่องจากระยะเวลาที่ไอออนปรอทและสารสกัด TOA ในชุดทดลองเส้นใยกลวงสัมผัสกัน หรือ Resident Time ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวง (V) กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน (Q) หรืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวงกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายนำกลับมีค่าลดลง

ถ้าพิจารณาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ กระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทควรมีกำลังการผลิตสูง คือ มีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสูงๆ แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 และ 4.10 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริง คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอท จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันในช่วง 20–100 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทไม่แตกต่างกันนัก แต่เมื่อ

อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ค่าทั้งสองลดลง

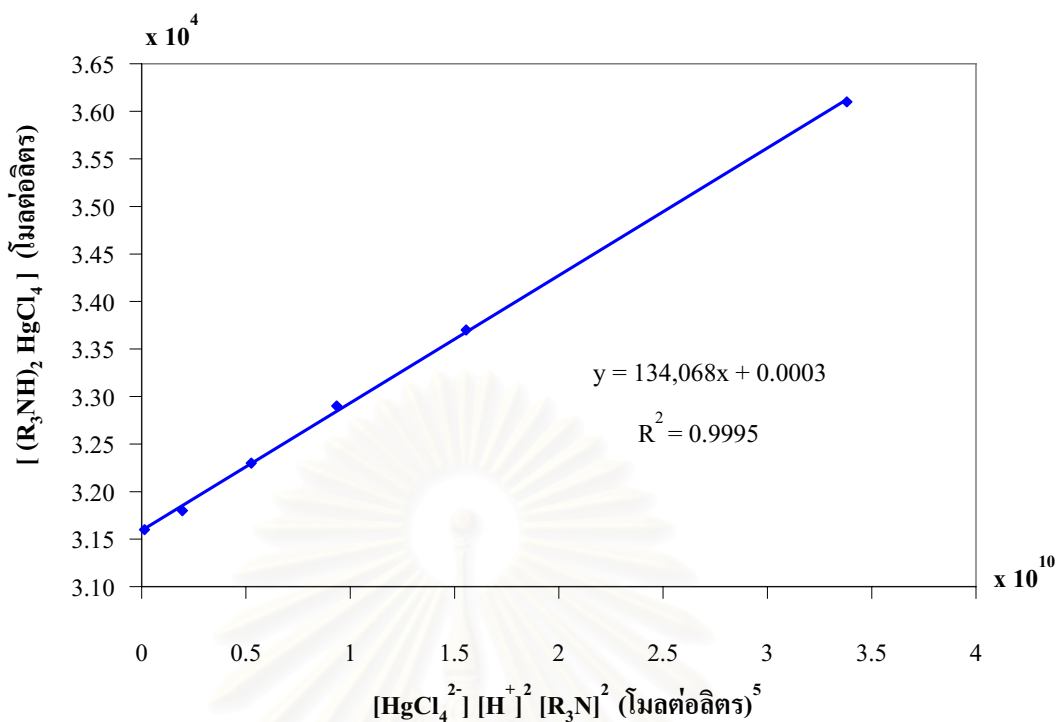
**ตารางที่ 4.5** ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ฟลักซ์ของการสกัด $J_{\text{extract}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$	ฟลักซ์ของการนำกลับ $J_{\text{recovery}}$ $\text{mol/m}^2\text{-min} \times 10^5$
20	3.45	3.36
40	3.45	3.36
60	3.45	3.36
80	3.45	3.36
100	3.45	3.36
300	3.24	2.90
500	2.86	1.90
700	2.25	1.20
900	1.38	0.69

## 4.2 การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี

### 4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

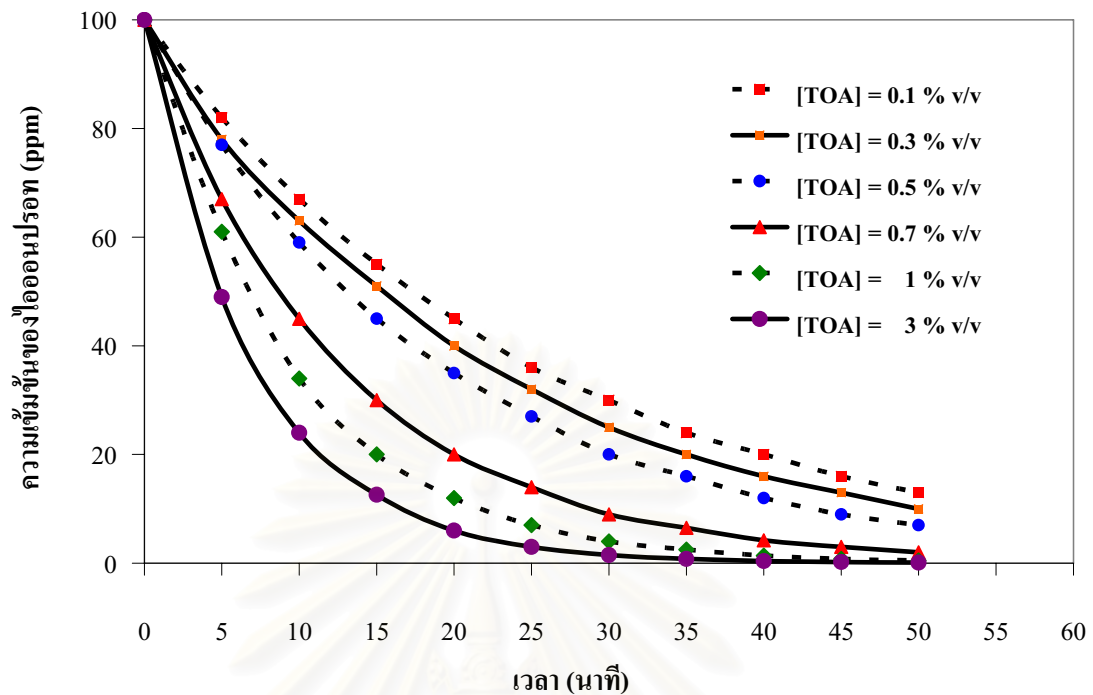
การคำนวณค่าคงที่สมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทโดยใช้สมการที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท ( $K_{ex}$ ) อ่านได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.11 มีค่าเท่ากับ  $1.34 \times 10^5$  (ลิตรต่อโมล)<sup>4</sup> ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร แสดงดังตารางที่ 4.6 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-5)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ระหว่างเริ่มต้นปฏิกิริยากับที่สุดท้ายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร

#### 4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, $P$ )

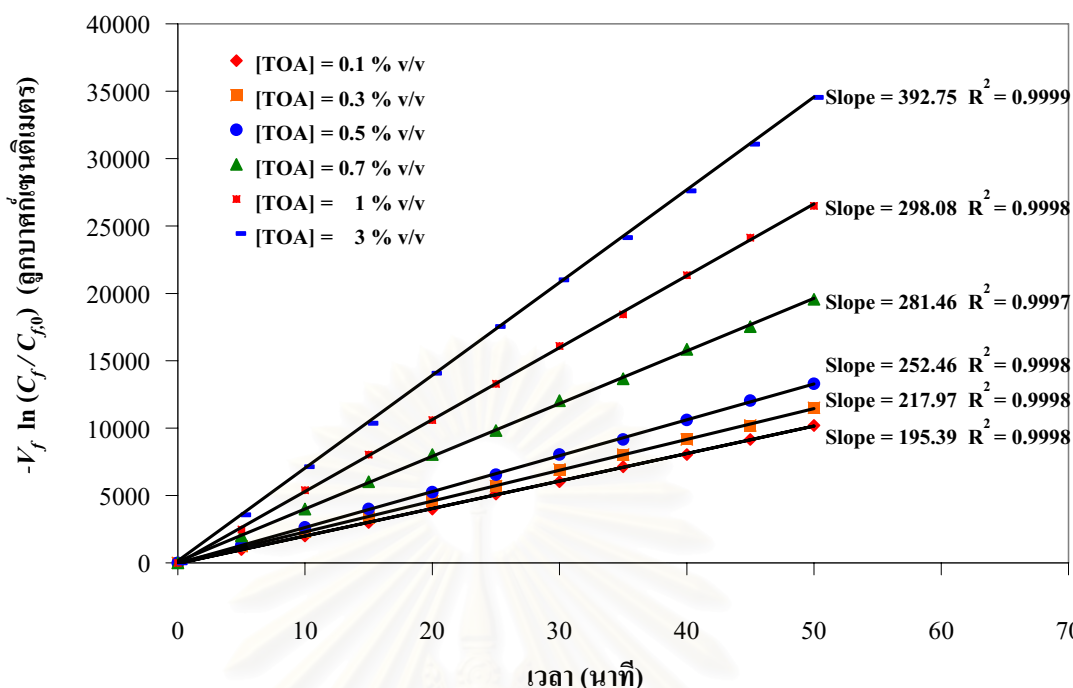
จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ ทำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลาเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

แทนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.14 และ 2.15 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร ทำโดยสร้างกราฟระหว่าง  $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$  กับเวลา ( $t$ ) แสดงดังรูปที่ 4.13 จะได้ความชันของกราฟ คือ  $AP \frac{\phi}{\phi+1}$  ซึ่งทำให้หาค่า  $P$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังตารางที่ 4.6 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค-6)





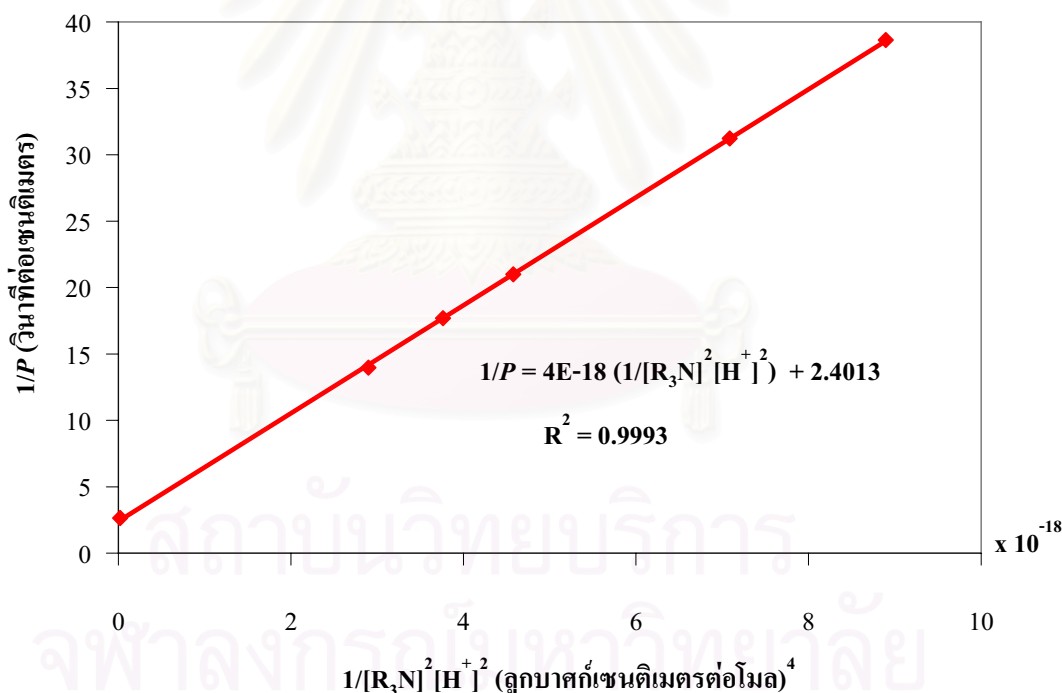
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f / C_{f,0})$  ของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลา ( $t$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[\text{Hg}^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[\text{HCl}]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[\text{NaOH}]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร

ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (% โดยปริมาตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย $D$ (-)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน $P$ , $\text{cm/s} \times 10^2$
0.1	3.08	2.58
0.3	9.24	3.20
0.5	15.40	4.45
0.7	21.56	5.97
1	30.80	7.16
3	92.40	37.8

### 4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $P$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในตารางที่ 4.6 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้จากสมการที่ 2.21 โดยสร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P}$  กับ  $\frac{1}{[R_3N]^2 [H^+]^2}$  แสดงดังรูปที่ 4.14 (หรือรูปที่ ค-3) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้จากความชันของกราฟซึ่งคือเทอม  $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$  และ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) ได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$  (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค-7)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $1/[R_3N]^2 [H^+]^2$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.14 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ 0.42 และ 1.67 เซนติเมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการสกัดไอออนปรอทโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยมีรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว สารละลายป้อนที่ใช้คือ สารละลายที่มีไอออนปรอท 100 ppm ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการสกัดไอออนปรอทเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนในช่วง 0.01 ถึง 2 โมลต่อลิตร โดยให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่ให้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทสูงสุด คือ 0.1 โมลต่อลิตร

5.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในช่วง 0.1 ถึง 10 % โดยปริมาตร ต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเมื่อปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่เหมาะสม คือ 3 % โดยปริมาตร ซึ่งแม้จะใช้ความเข้มข้นสูงกว่านี้ก็ไม่ทำให้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับเพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น 0.01 ถึง 0.7 โมลต่อลิตร ต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเมื่อปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้การสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเพิ่มสูงขึ้นและจะคงที่เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 0.5 โมลต่อลิตร ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม คือ 0.5 โมลต่อลิตร

5.1.4 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนในช่วงความเข้มข้น 1–100 ppm ที่ศึกษาไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนปรอทแต่จะทำให้ค่าฟลักซ์ของการสกัดไอออนปรอทและค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนปรอทเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Rovira และ Sastre, 1988 ว่าเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนน้อยมากๆ ฟลักซ์ของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน

5.1.5 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 20 ถึง 900 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจาก 20–100 มิลลิลิตรต่อนาที การสกัดและการนำกลับไอออนปรอทคงที่ แต่จะลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังนั้นอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสม คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5.1.6 ภาวะในการดำเนินการทดลองที่เหมาะสมเมื่อสารละลายป้อนมีไอออนปรอท 100 ppm คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร โดยโมดูลของเส้นใยกลวงบรรจุด้วยสารสกัด TOA ความเข้มข้น 3 % โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเท่ากับ 100 และ 97 ตามลำดับ

5.1.7 จากการศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการสกัดไอออนปรอทเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร และศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ อยู่ในภาวะการดำเนินการทดลองที่เหมาะสมและมีค่าคงที่ ดังนี้คือ สารละลายป้อนมีไอออนปรอท 100 ppm ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว พบว่า

– ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท ( $K_{ex}$ ) มีค่าเท่ากับ  $1.34 \times 10^5$  (ลิตรต่อโมล)<sup>4</sup>

– ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนปรอท ( $D$ ) ในปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 และ 3 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 3.08, 9.24, 15.40, 21.56, 30.80 และ 92.40 ตามลำดับ

– ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนปรอท ( $P$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1 และ 3 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ  $2.58 \times 10^{-2}$ ,  $3.20 \times 10^{-2}$ ,  $4.45 \times 10^{-2}$ ,  $5.97 \times 10^{-2}$ ,  $7.16 \times 10^{-2}$  และ  $37.8 \times 10^{-2}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

– ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อนที่มีไอออนปรอท ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) มีค่าเท่ากับ 0.42 และ 1.67 เซนติเมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เมื่อมีการใช้ระบบนี้อย่างต่อเนื่องอาจทำให้สารสกัดที่ละลายอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวบางส่วนหลุดออกจากรูพรุนจุลภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวของเส้นใยกลวง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทลดลง จึงควรเติมสารสกัดเป็นระยะๆ เพื่อให้แน่ใจว่ามีสารสกัดอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเยื่อแผ่นเหลวเพียงพอต่อการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท

5.2.2 เครื่อง ICP Atomic Emission Spectrometer ที่ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทมีประสิทธิภาพในการวัดที่จำกัด คือ ไม่สามารถวัดความเข้มข้นของไอออนปรอทที่ต่ำกว่า 30 ppb ได้ ดังนั้นในการวัดความเข้มข้นของไอออนปรอทที่ต่ำกว่า 30 ppb ควรเลือกใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ให้ค่าความละเอียดมากกว่านี้ กฎหมายกำหนดให้การปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมต้องมีไอออนปรอทปนเปื้อนไม่เกิน 10 ppb

5.2.3 จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมจึงควรศึกษความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดของกระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท เพื่อที่จะนำมาใช้กับสารละลายป้อนที่มีปริมาณมากๆ ระดับอุตสาหกรรม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ 2541. ปรอท. กรุงเทพมหานคร:  
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- ทรัพยากรธรณี, กรม. 2543. ปรอท. กรุงเทพมหานคร: กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี.  
(อัครสำเนา)
- กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการ  
กรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิสิต สุไลมาน. 2544. การสกัดนีโอดีเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเนียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่  
พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ:  
ชวนพิมพ์.
- วีรวัฒน์ ปัตทวิทกคา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับ  
โซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- สุภัทร สัมมาภัสร์. 2549. การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัด  
แบบจานมีรูยึดติดคงที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- Ali Jabbari, Majid Esmacili and Mojtaba Shamsipur. 2001. Selective transport of mercury as  $\text{HgCl}_4^{2-}$  through a bulk liquid membrane using  $\text{K}^+$ -dicyclohexyl-18-crown-6 as carrier, Journal of Separation and Purification Technology 24:139–145.
- A. Safavi, E. Shams. 1998. Highly selective and efficient transport of Hg (II) through bulk liquid membrane using methyl red as carrier, Journal of Membrane Science 144: 37–43.
- Bird R.B. Stewart W.E., and Lightfoot E.N. 1960. Transport Phenomena John Wiley & Sons
- Claudia Fontas, Manuela Hidalgo, Victoria Salvado, Enriqueta Antico. 2005. Selective recovery and preconcentration of mercury with a benzoylthiourea–solid supported liquid membrane system, Journal of Analytica Chimica Acta 547: 255–261.
- Cussler E.L. 1997. Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems Cambridge University Press, USA.
- Dahuron, L. and Cussler, E.L. 1988. Protein Extraction with Hollow Fiber. AIChE Journal, 34(1): 130–136.
- Danesi, P. R. 1984. A simplified model for the coupled transport of metal ions through hollow fiber supported liquid membranes. Journal of Membrane Science, 20: 231.
- Fernandez, L., Aparicio, J., and Muhammed, M. 1987. The role of feed metal concentration in the coupled transport of zinc through a bis-(2-ethylhexyl) phosphoric acid solid supported liquid membrane from aqueous perchlorate media. Separation Science and Technology 22(6): 1575–1593.
- Gu, Z. 1990. A new liquid membrane technology–electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science 52: 77–88.
- 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 separation. Separation Science and Technology 23(12&13): 1645–1658.
- John C. Kotz and Keith F. Purcell, CHEMISTRY & CHEMICAL REACTIVITY, 2<sup>nd</sup> edition, Saunders College Publishing, the United States of America (1991), p. 569.
- Komasawa, Isao, Otake, Tsutao and Yamashita, Tomohiro. 1983. Mechanism kinetic of copper permeation through a supported liquid membrane containing a hydroxyoxime as mobile carrier. Ind. Eng. Chem. Fundam 22: 127–131.
- Kumar, A., Haddad, R., Benzal, G., Ninou, R., and Sastre, A.M. 2000. Use of modified



- membrane carrier system for recovery of gold cyanide from alkaline cyanide media using hollow fiber supported liquid membranes: feasibility studies and mass transfer modeling. Journal of Membrane Science 174: 17–30.
- 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.
- Marr, R. and Kopp, A. 1989. Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanisms and Models, Inter. Chem. Eng. 22(1): 44–60.
- Mojtaba Shamsipur, Mohammad Hossein Mashhadizadch, Gholamhasan Azimi. 2002. Highly selective and efficient transport of mercury (II) ions across a bulk liquid membrane containing Tetrathia-12-crown-4 as a specific ion carrier, Journal of 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., Ramakul, P. and Pattaveekongka, W. 2005. Purely extraction and separation of mixture of Cerium (IV) and Lanthanum (III) via hollow fiber supported liquid membrane, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 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.
- Porter C. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology New Jersey: Noyes Publications.
- Quanmin Li, Qi Liu, Xianjun Wei. 1996. Separation study of mercury through an emulsion liquid membrane, Journal of Talanta 43: 1837–1842.
- Ramakul, P. and Pancharoen, U. 2003. Synergistic extraction and separation of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane, Korean Journal of Chemical Engineering 20: 724–730.
- Ramakul, P., Nakararueng, K. and Pancharoen, U. 2004. One-through selective separation of copper, chromium and zinc ions by hollow fiber supported liquid membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 21(6): 1212–1217.

- Ramakul, P., Pancharoen, U. and Hronec M. 2005. Selective separation of trivalent and tetravalent lanthanide from mixture by hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Chinese Institute of chemical Engineers 36(5): 1–7.
- Ramakul, P., Pattaweekongka, W. and Pancharoen, U. 2006. Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of Ce (IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 23(1): 85–92.
- Ramakul, P., Songkun, E., Pattaweekongka, W., Hronec M. and Pancharoen, U. 2006. Permeation study on the hollow-fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt (II). Korean Journal of Chemical Engineering 23(1): 117–123.
- Rathore, N. S., Sonawane, J.V., Kumar, A., Venugopalan, A. K., Singh, R. K., Bajpai, D. D., and Shukla, J. P. 2001. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes. Journal of Membrane Science 189: 119.
- 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.
- Schultz, G. 1988. Separation Techniques with Supported Liquid Membrane. Desalination 68: 191–202.
- Seader, J. D., and Ernest, J. H. 1984. Separation Process Principles. 231–248: John Wiley and Sons Inc.
- Shiau, Ching-Yeh and Chen, Pai-Zoh 1993. Theoretical analysis of copper-ion extraction through hollow fiber supported liquid membranes. Separation Science and Technology 28(13, 14): 2149–2165.
- 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, Membrane and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology 22(2–3): 581–617.
- Teramoto Masaaki, Masayuma, Hiedo, Takaya, Hitoshi, and Asano, Shigehiro. 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

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

ก-1 ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant,  $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทในสมการที่ 2.11 เขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[(R_3NH)_2 HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}][H^+]^2 [R_3N]^2} \quad (ก-1)$$

ก-2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient,  $D$ ) (Seader and Ernest, 1984; Rathore et al., 2001)

$$D = \frac{[(R_3NH)_2 HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}]} = K_{ex} [H^+]^2 [R_3N]^2 \quad (ก-2)$$

ก-3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient,  $P$ ) (Danesi, 1984)

$$V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{\phi}{\phi + 1} t \quad (ก-3)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \quad (ก-4)$$

เมื่อ

$P$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)

$C_{f,0}$  = ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)

$C_f$  = ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา  $t$  (โมลต่อลิตร)

$A$	=	พื้นที่การถ่ายโอนมวล	(ตารางเซนติเมตร)
$V_f$	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$Q_f$	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
$L$	=	ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$N$	=	จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล	(เส้น)
$r_i$	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$\varepsilon$	=	ความพรุนของเส้นใยกลวง	
$\pi$	=	3.1416	

#### ก-4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient)

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของการถ่ายโอนมวลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Rathore et al., 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ

$r_{lm}$	=	รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง
$r_o$	=	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
$k_i$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน
$k_s$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายนำกลับ
$P_m$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว

ก-5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient,  $D$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (Permeability Coefficient,  $P_m$ ) และค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant,  $K_m$ ) (Rathore et al., 2001)

$$P_m = D k_m \quad (\text{ก-6})$$

$$P_m = K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2 \quad (\text{ก-7})$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2} \quad (\text{ก-8})$$

เมื่อ

$k_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

**ตารางที่ ข-1** ผลการทดลองการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของสารละลายยกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายยกรดไฮโดรคลอริกที่ไอออนการสกัดไอออนปรอท (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ค-1 และ ค-2)

ความเข้มข้นของสารละลายยกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>f</sub> (ppm)		[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>s</sub> (ppm) ขาออก	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.01	86.00	10.32	72.24	88.0	84.0
0.025	84.00	7.64	73.08	90.9	87.0
0.05	83.00	5.81	74.11	93.0	89.3
0.075	82.00	4.76	74.95	94.2	91.4
0.1	82.10	4.11	75.53	95.0	92.0
0.3	81.20	4.47	70.50	94.5	86.8
0.5	86.40	10.26	64.66	88.1	74.8
1	87.80	26.13	48.95	70.2	55.8
1.5	88.60	38.09	44.90	57.0	50.7
2	84.30	40.46	42.15	52.0	50.0

ภาวะที่ทดลอง: [Hg<sup>2+</sup>]<sub>f</sub> = 100 ppm, [TOA]<sub>m</sub> = 1 % โดยปริมาตร, [NaOH]<sub>s</sub> = 0.05 โมลต่อลิตร และ Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที



ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองการศึกษาคผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด ไอออนปรอท

ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (% โดยปริมาตร)	[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>f</sub> (ppm)		[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>s</sub> (ppm) ขาออก	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.1	60.00	8.59	46.92	85.7	78.2
0.3	86.70	9.69	71.96	88.8	83.0
0.5	88.43	7.07	76.05	92.0	86.0
0.7	91.00	5.46	80.99	94.0	89.0
1	95.78	4.79	88.12	95.0	92.0
3	96.65	1.93	92.00	98.0	95.2
5	96.55	1.82	91.92	98.1	95.2
10	96.50	1.83	91.87	98.1	95.2

ภาวะที่ทดลอง: [Hg<sup>2+</sup>]<sub>f</sub> = 100 ppm, [HCl]<sub>f</sub> = 0.1 โมลต่อลิตร, [NaOH]<sub>s</sub> = 0.05 โมลต่อลิตร และ Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอท

ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>f</sub> (ppm)		[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>s</sub> (ppm) ขาออก	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.01	86.00	4.30	81.27	95.0	94.5
0.03	88.58	2.83	83.89	96.8	94.7
0.05	96.65	1.93	91.82	98.0	95.0
0.07	96.70	1.06	92.06	98.9	95.2
0.09	96.80	0.58	92.35	99.4	95.4
0.1	97.00	0.49	92.64	99.5	95.5
0.3	97.00	0.19	93.61	99.8	96.5
0.5	97.00	0.10	94.09	99.9	97.0
0.7	97.00	0.10	94.09	99.9	97.0

ภาวะที่ทดลอง: [Hg<sup>2+</sup>]<sub>f</sub> = 100 ppm, [HCl]<sub>f</sub> = 0.1 โมลต่อลิตร, [TOA]<sub>m</sub> = 3 % โดยปริมาตร และ Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท

ความเข้มข้นของไอออนปรอท (ppm)	[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>f</sub> (ppm)		[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>s</sub> (ppm) ขาออก	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
1	1.39	0.03	1.35	98.0	97.4
10	10.50	0.04	10.21	99.6	97.2
20	20.60	0.08	19.44	99.6	97.2
40	40.84	0.16	39.74	99.6	97.3
60	60.20	0.24	58.63	99.6	97.4
80	80.00	0.08	77.76	99.9	97.2
100	97.00	0.10	94.28	99.9	97.2

ภาวะที่ทดลอง: [HC]<sub>f</sub> = 0.1 โมลต่อลิตร, [TOA]<sub>m</sub> = 3 % โดยปริมาตร, [NaOH]<sub>s</sub> = 0.5 โมลต่อลิตร และ Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองการศึกษาค่าผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยถลุง

ต่อการสกัดไอออนปรอท

อัตราการใช้ (มิลลิตรต่อนาที)	[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>f</sub> (ppm)		[Hg <sup>2+</sup> ] <sub>s</sub> (ppm) ขาออก	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
20	97.00	0.09	94.28	99.9	97.2
40	97.00	0.10	94.31	99.9	97.2
60	97.00	0.08	94.32	99.9	97.2
80	97.00	0.06	94.28	99.9	97.2
100	97.00	0.10	94.27	99.9	97.2
300	97.00	5.82	81.48	94.0	84.0
500	97.06	16.50	53.38	83.0	55.0
700	98.80	35.57	33.59	64.0	34.0
900	97.00	58.05	19.40	40.15	20.0

ภาวะที่ทดลอง: [Hg<sup>2+</sup>]<sub>f</sub> = 100 ppm, [HC]<sub>f</sub> = 0.1 โมลต่อลิตร, [TOA]<sub>m</sub> = 3 % โดยปริมาตร และ [NaOH]<sub>s</sub> = 0.5 โมลต่อลิตร

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองการศึกษาคผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นหลายต่อการสกัด ไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ (ความเข้มข้นปรอทหน่วย ppm)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นหลาย (% โดยปริมาตร)							
	0.1	0.3	0.5	0.7	1	3		
0	100	100	100	100	100	100		100
5	82	78	77	67	61	49		
10	67	63	59	45	34	24		
15	55	51	45	30	20	12.6		
20	45	40	35	20	12	6		
25	36	32	27	14	7	3		
30	30	25	20	9	4	1.5		
35	24	20	16	6.5	2.5	0.8		
40	20	16	12	4.2	1.4	0.4		
45	16	13	9	3	0.8	0.2		
50	13	10	7	2	0.5	0.1		

ภาวะที่ทดลอง:  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างการคำนวณ

## ก-1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA = 3 % โดยปริมาตร  
 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = 96.65 ppm (mg/l)  
 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก = 1.93 ppm (mg/l)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด} &= \frac{96.65 - 1.93}{96.65} \times 100 \\ &= 98.0 \quad (\text{ดังตารางที่ ข-2}) \end{aligned}$$

## ก-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA = 3 % โดยปริมาตร  
 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก = 92.00 ppm (mg/l)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{92.00}{96.65} \times 100 \\ &= 95.2 \quad (\text{ดังตารางที่ ข-2}) \end{aligned}$$

## ก-3 ตัวอย่างการคำนวณค่าฟลักซ์ของการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA = 3 % โดยปริมาตร  
 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = 96.65 ppm (mg/l)  
 ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก = 1.93 ppm (mg/l)

น้ำหนักโมเลกุลของปรอท	= 200.59 g/mol
พื้นที่ผิวของเส้นใยกลาง	= 1.4 m <sup>2</sup>
เวลาในการดำเนินการ	= 50 min
ปริมาตรของสารละลายป้อนขาออก	= 5 l

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ของการสกัด} &= \frac{(96.65 - 1.93) \times 10^{-3} \times 5}{200.59 \times 1.4 \times 50} \\ &= 3.37 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2 \text{ min} \quad (\text{ดังตารางที่ 4.2}) \end{aligned}$$

#### ค-4 ตัวอย่างการคำนวณค่าฟลักซ์ของการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA	= 3 % โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก	= 92.00 ppm (mg/l)
น้ำหนักโมเลกุลของปรอท	= 200.59 g/mol
พื้นที่ผิวของเส้นใยกลาง	= 1.4 m <sup>2</sup>
เวลาในการดำเนินการ	= 50 min
ปริมาตรของสารละลายนำกลับขาออก	= 5 l

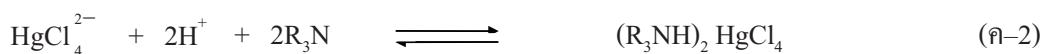
$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ของการนำกลับ} &= \frac{92.00 \times 10^{-3} \times 5}{200.59 \times 1.4 \times 50} \\ &= 3.27 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2 \text{ min} \quad (\text{ดังตารางที่ 4.2}) \end{aligned}$$

#### ค-5 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ )

##### 1. การคำนวณค่าคงที่สมดุล

$$K_{ex} = \frac{[(R_3NH)_2 HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}] [H^+]^2 [R_3N]^2} \quad (\text{ค-1})$$

วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัว  
จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทและข้อมูลที่ภาวะความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 %  
โดยปริมาตร หรือเท่ากับ  $6.896 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร ซึ่งมีข้อมูลดังนี้



$$\begin{aligned} \text{สารละลายป้อนขาเข้า} &= 3.68 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร (100 ppm)} \\ \text{สารละลายป้อนขาออก} &= 7.37 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร (2 ppm)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยา} &= 3.68 \times 10^{-4} - 7.37 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 3.61 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นของสารประกอบ  
เชิงซ้อน  $(\text{R}_3\text{NH})_2 \text{HgCl}_4$  ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท มีค่าเท่ากับ  $3.61 \times 10^{-4}$  โมลต่อ  
ลิตร

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{HgCl}_4^{2-} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า 100 ppm} \\ &= 3.68 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}^+ &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน} \\ &= 0.1 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{R}_3\text{N} &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 \% โดยปริมาตร} \\ &= 6.90 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$



ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมมูลมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{HgCl}_4^{2-} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก 2 ppm} \\ &= 7.37 \times 10^{-6} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}^+ &= 0.1 - 2 \times (3.61 \times 10^{-4}) \quad \text{โมลต่อลิตร} \\ &= 9.93 \times 10^{-2} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

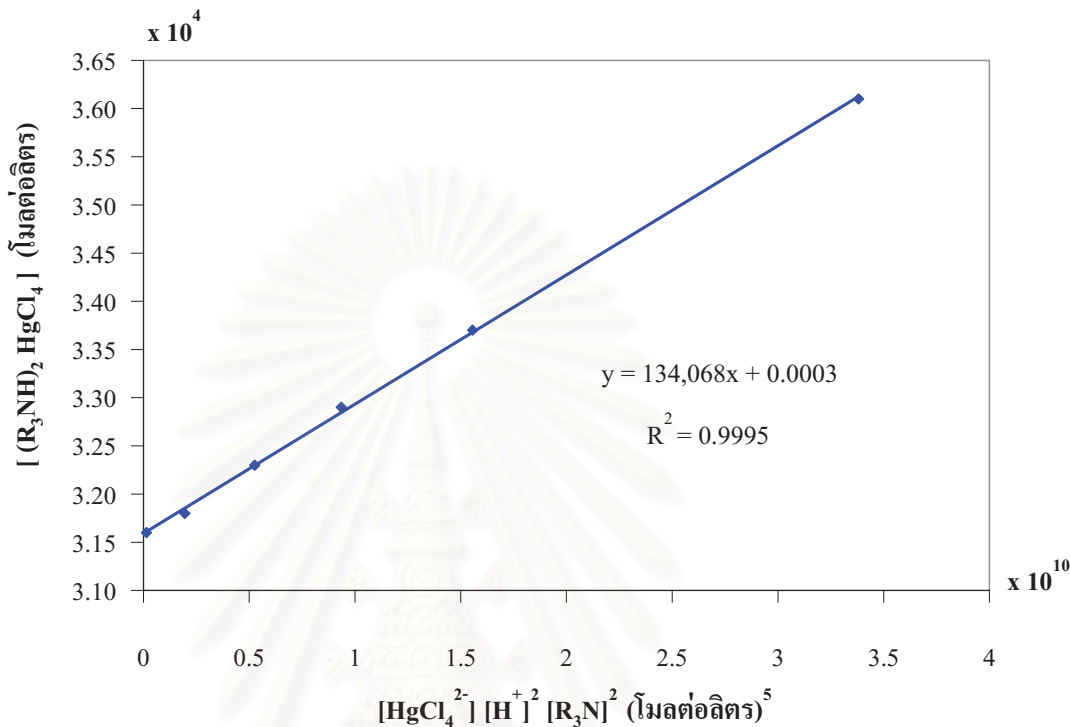
$$\begin{aligned} \text{R}_3\text{N} &= 6.90 \times 10^{-2} - 2 \times (3.61 \times 10^{-4}) \quad \text{โมลต่อลิตร} \\ &= 6.82 \times 10^{-2} \quad \text{โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } [\text{HgCl}_4^{2-}] [\text{H}^+]^2 [\text{R}_3\text{N}]^2 &= (7.37 \times 10^{-6}) \times (9.93 \times 10^{-2})^2 \times (6.82 \times 10^{-2})^2 \\ &= 3.38 \times 10^{-10} \quad (\text{โมลต่อลิตร})^5 \end{aligned}$$

$$\text{และ } [(\text{R}_3\text{NH})_2 \text{HgCl}_4] = 3.61 \times 10^{-4} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ระหว่างเริ่มต้นปฏิกิริยากับที่สุดท้ายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร

โดยหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท ( $K_{ex}$ ) ได้จากความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.34 \times 10^5$  (ลิตรต่อโมล)<sup>4</sup>

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

จากสมการสัมประสิทธิ์การกระจาย

$$D = \frac{[(R_3NH)_2HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}]} = K_{ex} [H^+]^2 [R_3N]^2 \quad (\text{ค-3})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{ex} &= \text{ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท} \\ &= 1.34 \times 10^5 \text{ (ลิตรต่อ โมล)}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H^+ &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน} \\ &= 0.1 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3N &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร} \\ &= 6.90 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

แทนในสมการที่ ค-3

$$\begin{aligned} D &= 1.34 \times 10^5 \text{ (ลิตรต่อ โมล)}^4 \times (0.1 \text{ โมลต่อลิตร})^2 \times (6.90 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร})^2 \\ &= 92.40 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ( $D$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทมีค่าเท่ากับ 92.40

ค-6 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient,  $P$ )

จากสมการ

$$V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{\phi}{\phi + 1} t \quad (\text{ค-4})$$

โดยที่

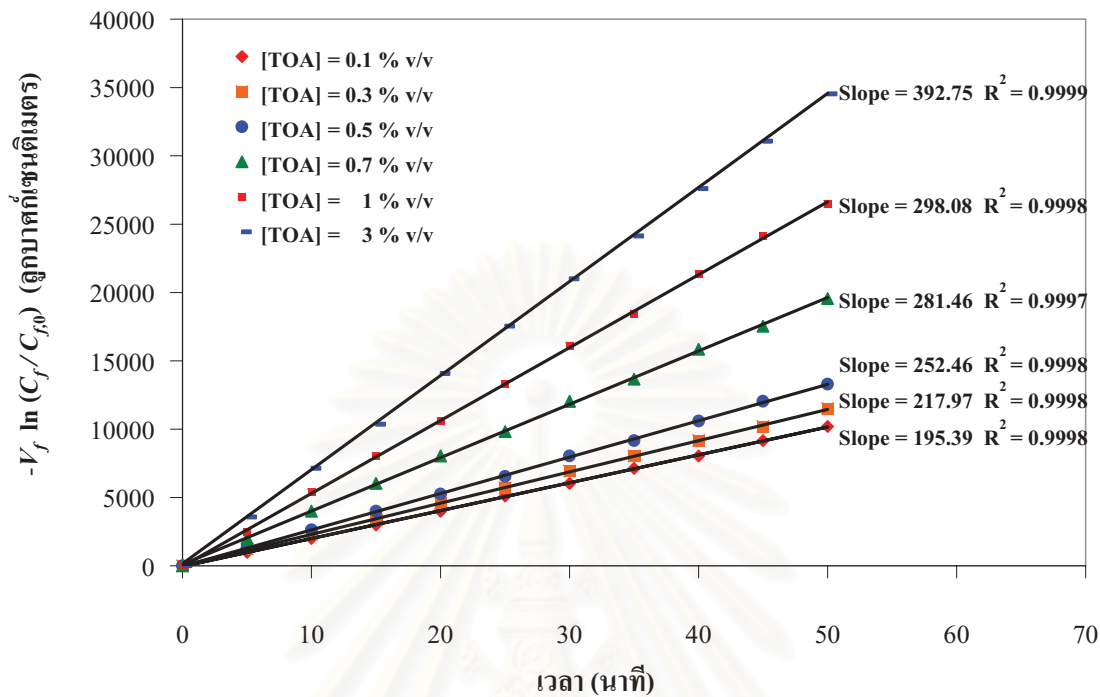
$$\phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \quad (\text{ค-5})$$

เมื่อ

$P$	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	(เซนติเมตรต่อวินาที)
$C_{f,0}$	= ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น	(โมลต่อลิตร)
$C_f$	= ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา $t$	(โมลต่อลิตร)
$A$	= พื้นที่การถ่ายโอนมวล	(ตารางเซนติเมตร)
$V_f$	= ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$Q_f$	= อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
$L$	= ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$N$	= จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล	(เส้น)
$r_i$	= รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
$\varepsilon$	= ความพรุนของเส้นใยกลวง	
$\pi$	= 3.1416	

และรูปที่ ค-2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$  ของไอออนปรอทในสารละลายเทียบกับเวลา ( $t$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[\text{Hg}^{2+}]_f = 100 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HCl}]_f = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$ ,  $[\text{NaOH}]_s = 0.5 \text{ โมลต่อลิตร}$  และ  $Q_f = Q_s = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทำโดยสร้างกราฟระหว่าง  $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$  กับเวลา ( $t$ ) จะได้ว่าความชันของกราฟ คือ  $AP \frac{\phi}{\phi+1}$  ซึ่งทำให้หาค่า  $P$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

พิจารณาข้อมูลของไอออนปรอทที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร โดยที่

$$C_{f,0} = 3.68 \times 10^{-4} \quad \text{โมลต่อลิตร (100 ppm)}$$

$$C_f = 3.68 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร (0.1 ppm)}$$

$$t = 3,000 \quad \text{วินาที}$$

$$\begin{aligned}
 A &= 1.4 \times 10^4 && \text{ตารางเซนติเมตร} \\
 V_f &= 5,000 && \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 Q_f &= 1.67 && \text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (100 มิลลิลิตรต่อนาที)} \\
 L &= 20.3 && \text{เซนติเมตร} \\
 N &= 240 && \text{เส้น} \\
 r_i &= 120 \times 10^{-4} && \text{เซนติเมตร} \\
 \varepsilon &= 0.3 \\
 \pi &= 3.1416
 \end{aligned}$$

จากรูปที่ ค-2 พิจารณาความชันที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 392.75 ซึ่งก็คือเทอม  $AP \frac{\phi}{\phi+1}$  และแทนค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ ค-4 และ ค-5 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \phi &= \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \\
 &= \frac{1.67 \text{ cm}^3/\text{s}}{P \times (20.3 \text{ cm}) \times (0.3) \times (3.1416) \times (240) \times (120 \times 10^{-4} \text{ cm})} \\
 \phi &= \frac{0.0303 \text{ cm/s}}{P} \tag{ค-6}
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $\phi$  จากสมการที่ ค-6 ลงในเทอม  $AP \frac{\phi}{\phi+1} = 392.75$  จะได้

$$392.75 = (1.4 \times 10^4) \times P \times \frac{0.0303}{P} \div \left( \frac{0.0303}{P} + 1 \right)$$

$$P = 3.78 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$$

นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนปรอท ( $P$ ) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 3 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ  $3.78 \times 10^{-1}$  เซนติเมตรต่อวินาที

ค-7 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

จากสมการ

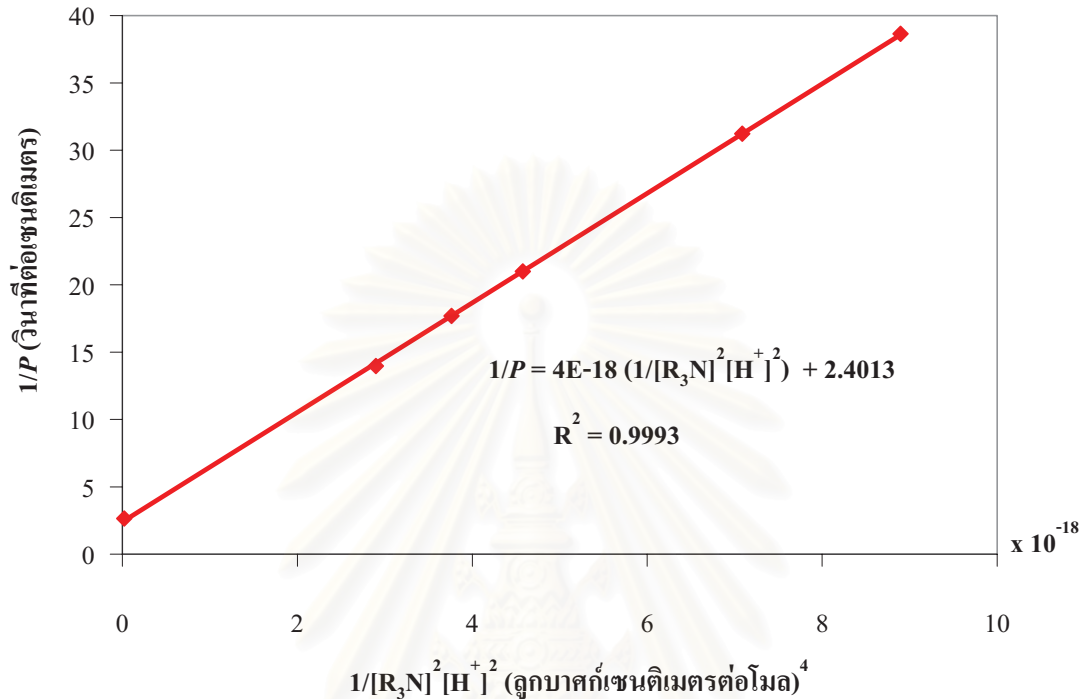
$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2} \quad (\text{ค-7})$$

โดยที่

- $P$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
- $k_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)
- $k_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
- $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
- $r_{lm}$  = รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
- $K_{ex}$  =  $1.34 \times 10^5$  (ลิตรต่อโมล)<sup>4</sup>
- $[R_3N]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (โมลต่อลิตร)
- $[H^+]$  = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนปรอท ( $P$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวงในหัวข้อ ค-6 สร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P}$  กับ  $\frac{1}{[R_3N]^2 [H^+]^2}$  แสดงดังรูปที่ ค-3 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้จากความชันของกราฟซึ่งคือเทอม  $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$  และ

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) ได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$



รูปที่ ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $1/[R_3N]^2[H^+]^2$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในโมดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ  $[Hg^{2+}]_f = 100$  ppm,  $[HCl]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

### 1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

จากเทอม  $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$  ซึ่งคือความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ  $4 \times 10^{-18} \frac{s/cm}{(cm^3/mol)^4}$

จากสมการ

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (\text{ค-8})$$



เมื่อ

$$r_o = \text{รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง} = 150 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

$$r_i = \text{รัศมีภายในของเส้นใยกลวง} = 120 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} r_{lm} &= \frac{150 \times 10^{-4} - 120 \times 10^{-4}}{\ln\left(\frac{150 \times 10^{-4}}{120 \times 10^{-4}}\right)} \\ &= 1.34 \times 10^{-2} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ในเทอม  $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m} = 4 \times 10^{-18} \frac{\text{s/cm}}{(\text{cm}^3/\text{mol})^4}$  จะได้

$$\frac{120 \times 10^{-4} \text{ cm}}{1.34 \times 10^{-2} \text{ cm}} \frac{1}{1.34 \times 10^5 (\text{liters/mol})^4} \frac{1}{k_m} = 4 \times 10^{-18} \frac{\text{s/cm}}{(\text{cm}^3/\text{mol})^4}$$

$$k_m = 1.67 \text{ cm/s}$$

นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) มีค่าเท่ากับ 1.67 เซนติเมตรต่อวินาที

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ )

จากรูปที่ ค-3 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อน ( $k_i$ ) ได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$  โดยที่จุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ 2.40 ซึ่งคือเทอม  $\frac{1}{k_i}$  จะได้ว่า

$$\frac{1}{k_i} = 2.40 \text{ s/cm}$$

$$k_i = 0.42 \text{ cm/s}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายป้อนที่มีไอออนปรอท ( $k_p$ ) มีค่าเท่ากับ  
0.42 เซนติเมตรต่อวินาที



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP อะตอมมิกอิมิสชันสเปกโทรสโกปี (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP–AES)

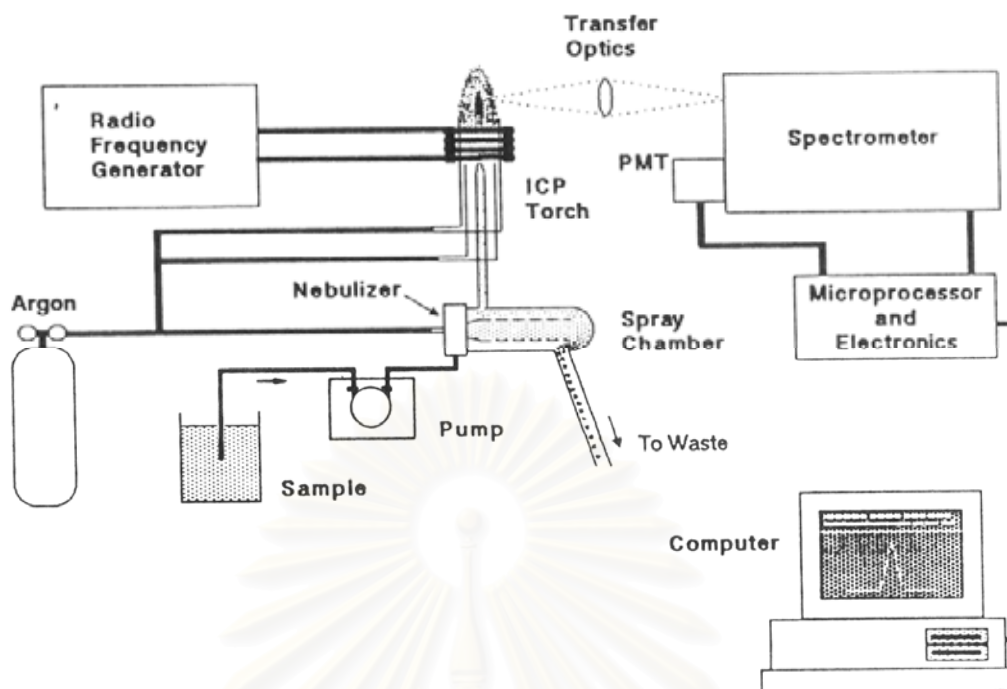
อิมิสชันสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีการวิเคราะห์ซึ่งอาศัยหลักการทำให้สารที่วิเคราะห์เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นด้วยกระบวนการที่เหมาะสม เป็นการทำให้สารที่ต้องการจะวิเคราะห์นั้นสามารถเปล่งแสง รังสี หรือสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะอยู่ในช่วงยูวี-วิสิเบิล และมีลักษณะเฉพาะตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณได้อย่างรวดเร็ว และวิเคราะห์ได้หลายๆ ธาตุในขณะเดียวกัน (Simultaneous Multielements Analysis) โดยสารตัวอย่างอาจอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้ (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2535)

#### ง-1 องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่อง ICPS

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP สเปกโตรมิเตอร์ มีดังนี้

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

หลักการทำงานของเครื่องมีดังนี้ คือ สารที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์ในรูปสารละลายจะถูกส่งเข้าเครื่อง โดยถูกเปลี่ยนให้เป็นละอองลอย (Aerosol) ด้วยกระบวนการ Nebulization แล้วตัวอย่างนี้จะถูกพาเข้าพลาสมาของ ICP Torch ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างแห้งกลายเป็นไอและเป็นอะตอมแล้วทำการกระตุ้นหรือไอออไนซ์ หลังจากนั้นอะตอมหรือไอออนที่ถูกกระตุ้นจะเปล่งแสงซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวออกมา แสงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เพื่อแยกเอาเฉพาะแสงที่ต้องการวัดที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วให้แสงดังกล่าวตกลงบนดีเทคเตอร์ เพื่อวัดออกมาเป็นสัญญาณซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นความเข้มขึ้นได้ ในการควบคุมแต่ละขั้นตอนตลอดจนข้อมูลที่ได้จะถูกพิมพ์หรือเก็บไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICP Spectrometer (แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2535)

## ง-2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer

- 1) ในการวิเคราะห์สารนั้น เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อใช้กับเครื่อง ICP Spectrometer ซึ่งขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารละลายตัวอย่างนั้นๆ แล้วทดลองวิเคราะห์ดูเพื่อหาช่วงของความเข้มข้นที่เหมาะสม
- 2) ขั้นตอนนี้เกี่ยวกับวิธีการที่จะนำสารละลายตัวอย่างของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่ในเครื่อง และการเตรียมเครื่องมือ ICP Spectrometer ให้พร้อมใช้งาน ต้องเลือกความยาวคลื่นที่จะใช้ ซึ่งความยาวคลื่นแต่ละค่าเหมาะสมต่อโลหะเฉพาะชนิดเท่านั้น ดังตาราง ง-1 (Thompson and Walsh, 1989) สำหรับการวิเคราะห์ปรอทความยาวคลื่นที่ใช้ คือ 194.227 นาโนเมตร
- 3) นำสารละลายมาตรฐานมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer เพื่อทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Standard Curve)
- 4) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP Spectrometer โดยเทียบกับค่าของกราฟความเข้มข้นมาตรฐานทำให้ทราบความเข้มข้นของโลหะในสารละลายตัวอย่างได้

### ง-3 การนำ ICP Spectrometer ไปประยุกต์ใช้งาน (Varnes, 1997)

- 1) ใช้วิเคราะห์โลหะที่ปนเปื้อนในน้ำ ดิน ของเสีย และตัวอย่างอากาศ
- 2) ใช้วิเคราะห์โลหะที่ก่อให้เกิดความสึกหรอในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว
- 3) ใช้ควบคุมคุณภาพเพื่อหาส่วนประกอบของธาตุต่างๆ อย่างแน่นอนของวัตถุดิบ อินเทอร์เน็ต และผลิตภัณฑ์
- 4) ใช้วิเคราะห์ความเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 5) ใช้วิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุในสารที่ไม่ทราบค่าความเข้มข้น (Unknown Material)

ตารางที่ ง-1 ค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โลหะด้วยเครื่อง ICP Spectrometer (Thompson and Walsh, 1989)

ธาตุ	ความยาวคลื่น (nm)	ธาตุ	ความยาวคลื่น (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 นายเอกพงศ์ อู๋ดี

เกิด วันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่

### การศึกษา

- พ.ศ. 2529–2534 ศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอิสรานุสรณ์ จังหวัดกระบี่
- พ.ศ. 2534–2535 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 ที่โรงเรียนเจริญธรรม จังหวัดสงขลา
- พ.ศ. 2535–2537 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 และ 3 ที่โรงเรียนตรีภียะตุลอุम्मะห์ จังหวัดสตูล
- พ.ศ. 2537–2538 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่โรงเรียนเหนือคลองประชาบำรุง จังหวัดกระบี่
- พ.ศ. 2538–2540 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 และ 6 ที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดปัตตานี
- พ.ศ. 2540–2544 วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- พ.ศ. 2547–2550 ศึกษาระดับมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประสบการณ์

- เม.ย. – มิ.ย. พ.ศ. 2542 นักศึกษาฝึกงาน กองตรวจมลพิษ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- พ.ศ. 2545–2546 เข้ารับราชการทหารกองประจำการ แผนกทหารบก ผลัดที่ 2 เหล่าราบ สังกัดจังหวัดทหารบกทุ่งสง อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช

### ทุนสนับสนุนงานวิจัย

- พ.ศ. 2548 ทุนวิจัยจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อมปี 2548

### ผลงานทางวิชาการ

1. Ekapong Uedee, Prakorn Ramakul, Ura Pancharoen, Weerawat Pattaveekongka and Anchaleeporn W. Lothongkum. “Simultaneous Transport of Mercury (II) from Dilute Feed Solution via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane”, RGJ Seminar Series XLVIII: Engineering Applications 2007, Chiang Mai, Thailand, 19 January, 2007
2. Ekapong Uedee, Teerapon Pirom, Ura Pancharoen, Prakorn Ramakul and Anchaleeporn W. Lothongkum. “Separation of Mercury (II) through a Hollow-fiber-supported Liquid Membrane and Mass Transfer Modeling” The Korean Journal of Chemical Engineering (Submitted)