

การนำกลับแปลเล่มเดิมจากกรดักด์ทองใช้แล้ว โดยเยื่อแผ่นเหล็กที่พยุ่งด้วยเส้นใยกลวง



นายณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

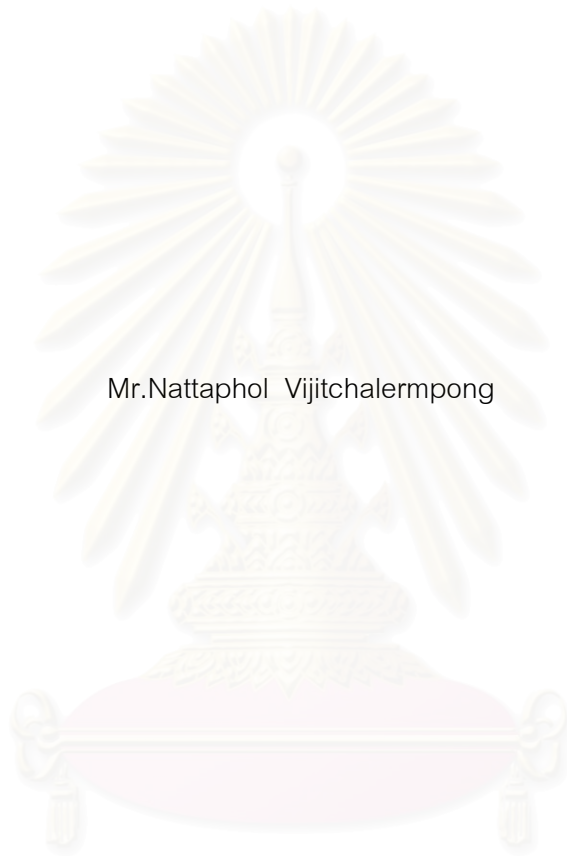
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2026-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF PALLADIUM FROM USED AQUA REGIA
BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr.Nattaphol Vijitchalermpong



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2026-2

ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์ : การนำกลับแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้วโดยเยื่อแผ่น
 เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. (RECOVERY OF PALLADIUM FROM USED AQUA REGIA BY
 HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ,
 111 หน้า. ISBN 974-17-2026-2.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำกลับไอออนแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้วผ่านเยื่อแผ่นเหลว
 ที่พองด้วยเส้นใยกลวง เยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยสารสกัดสองชนิดได้แก่ สารสกัดไฮโอไรดาซีน
 (Thioridazine.HCl) และสารสกัดกรดโอเลอิก (Oleic acid) ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม
 เคลือบฝังภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง โซเดียมไนไตรต์ที่ใช้เป็นสารละลายสตริปจะถูก
 ป้อนภายนอกเส้นใยกลวง (Shell side) สวนทางกับสารละลายป้อนที่ถูกป้อนภายในเส้นใยกลวง
 (Tube side) ตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิด ความเป็นกรด-
 ด่างในกรดกัดทองใช้แล้ว ความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไนไตรต์ อัตราการไหลของ
 สารละลายป้อน และสารละลายสตริป และจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง จากผลการ
 ทดลองพบว่า ไอออนแพลเลเดียมถูกนำกลับได้ร้อยละ 29.10 ที่ความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไร-
 ดาซีน และกรดโอเลอิกเท่ากับ 0.0005 และ 0.05 โมลาร์ตามลำดับ ภายหลังจากเวลา 30 นาที ในการ
 ผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 1 รอบ ซึ่งที่ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิดนี้จะก่อให้เกิดการสกัด
 แบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) เกิดขึ้น ลำดับการนำกลับของไอออนโลหะภายในกรด
 กัดทองเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ $Pd(II) > Pt(IV) > Cu(II) > Au(III)$ นอกจากนี้พบว่าเมื่อดำเนินการ
 ผ่านโมดูล 3 รอบ สามารถนำกลับแพลเลเดียมได้สูงถึงร้อยละ 65.63 ภายใต้อันที่ที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา..2545...

4370284821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: PALLADIUM / RECOVERY / HOLLOW FIBER / LIQUID MEMBRANE /
SYNERGISTIC EXTRACTION

NATTAPHOL VIJITCHALERMPONG : RECOVERY OF PALLADIUM FROM USED
AQUA REGIA BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., 111 pp. ISBN 974-
17-2026-2.

This research aimed at studying the recovery of palladium ion from used aqua regia by hollow fiber supported liquid membrane. The liquid membrane, composed of two extractants; thioridazine.HCl and oleic acid that were solubilized in chloroform, was coated on the microporous hollow fiber. Sodium nitrite, a stripping agent which was fed through the shell side, flowed countercurrently with the feed solution which was fed through the tube side. The following factors were investigated; the concentrations of both extractants, the pH of used aqua regia, the concentration of sodium nitrite, the flow rates of the feed and stripping solution, and the number of runs in the hollow fiber module. It was found that after 30 min and one through mode operation, 29.10% of palladium ion could be recovered at 0.0005-M thioridazine and 0.05-M oleic acid. Synergistic extraction could be achieved with the stated concentrations of both extractants. Concerning the percentage recovery, the following order of recovered noble metals could be observed; Pd(II)>Pt(IV)>Cu(II)>Au(III). In addition, when operating with 3 modules, palladium ion could be recovered up to 65.63% under optimum operating conditions.

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

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

Academic year...2002...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำในขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ เป็นอย่างดี ศ.ดร.ปิยสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ผศ.ดร.ณัฐชนัญ ลิพิพัฒน์ไพบูลย์ ซึ่งเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณหน่วยงาน และบุคลากรอีกหลายท่านที่กรุณาใช้เวลาให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำ ดังรายนามต่อไปนี้

บริษัทเกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองไปติดตั้ง และใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ

คุณสุรัชย์ รักสมบัติ ผู้จัดการโรงงาน บริษัทเกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรี จำกัด ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับข้อมูลต่าง ๆ และคอยดูแลขณะทำการทดลองที่โรงงานเป็นอย่างดี

เจ้าหน้าที่ห้องทดลอง และพนักงานทุกท่านของบริษัทเกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรี จำกัด ที่ให้การต้อนรับอย่างอบอุ่น และให้ความร่วมมือทุกอย่าง

ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อิเล็กโทรด เพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

คุณขวัญตา นคราเรือง ที่ช่วยดำเนินการให้การทดลองสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง รวมทั้งขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจ และคอยให้การสนับสนุนโดยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1.3 วัตถุประสงค์.....	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	11
2.1 กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	11
2.1.1 นิยามของเยื่อแผ่นเหลว.....	12
2.1.2 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นจากพอลิเมอร์.....	13
2.1.2.1 วิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion method)	13
2.1.2.2 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นเชิงประกอบ (Composite membrane). 16	
2.1.2.3 วิธีการอบเชื่อม (Sintering)	16
2.1.2.4 วิธีการดึงยืด (Stretching)	17
2.1.2.5 วิธีการกัดรอย (Track etching)	17
2.1.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลว.....	18
2.1.3.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane). 18	
2.1.3.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane).....	22
2.1.3.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane).....	27

2.1.4 กลไกการถ่ายเทมวล.....	30
2.1.4.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 1 Unfacilitated transport	30
2.1.4.2 กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 2 Facilitated transport.....	31
2.2 ชนิดของสารสกัด.....	35
2.2.1 สารสกัดที่เป็นกรด (Acidic extractants)	36
2.2.2 สารสกัดที่เป็นด่าง (Basic extractants).....	37
2.2.3 สารสกัดที่เป็นโซลเวท (Solvating extractants).....	38
2.3 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction).....	39
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	41
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 วิธีการทดลอง.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
4.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีน (TRHCI) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว.....	52
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิก (OA) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว... 57	
4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายป้อน.....	64
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสเตรปโทเดียมไนไตรต์ (NaNO ₂).....	67
4.5 ผลของอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสเตรป.....	70
4.6 ผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบ และผลการคำนวณ).....	84
ภาคผนวก ข (คำนิยาม).....	98
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ).....	99

ภาคผนวก ง

(การหาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมทรี). 101	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ปริมาณของแพลเลเดียมในธรรมชาติ.....	1
1.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของแพลเลเดียม.....	2
2.1 การเปรียบเทียบโมดูลเยื่อแผ่นแบบต่าง ๆ	26
2.2 ข้อดีและข้อด้อยของเยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับเทียบกับชนิดอิมัลชัน.....	27
2.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ	29
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 รายละเอียดของตัวรองรับเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....	43
ก.1 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซินในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ.....	85
ก.2 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซินในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ.....	86
ก.3 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ.....	87
ก.4 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ.....	88
ก.5 ข้อมูลการหาจำนวนโมลของสารสกัด OA ที่เข้าร่วมในปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กับสารสกัด TRHCI.....	89
ก.6 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ.....	90
ก.7 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และการนำกลับ.....	91
ก.8 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสตริบโซเดียมไนไตรต์ต่อการสกัด และการนำกลับ.....	92
ก.9 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และการนำกลับ.....	93
ก.10 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริบต่อการสกัด และการนำกลับ.....	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

บทที่	หน้า
ก.11 ข้อมูลร้อยละการสั กัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย สตรีปไซเดียมไนไตรต์ต่อการสั กัด และการนำกลับ.....	95
ก.12 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงต่อการสั กัด และการนำกลับ.....	96
ก.13 ข้อมูลร้อยละการสั กัด และการนำกลับของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง ต่อการสั กัด และการนำกลับ.....	97



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ.....	12
2.2 การทำเยื่อแผ่นให้เป็นฟิล์ม (Casting).....	14
2.3 ลักษณะของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ.....	16
2.4 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีนโดยการดึงยึด.....	17
2.5 การผลิตเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ชนิดพอลิคาร์บอนเนตด้วยวิธีกัศรอย.....	18
2.6 กระบวนการดำเนินการด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน.....	19
2.7 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน.....	19
2.8 ตัวรองรับแบบแผ่นบาง.....	23
2.9 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	23
2.10 ตัวรองรับแบบเกลียววน.....	24
2.11 รูปทรงจุลภาคของตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง.....	25
2.12 ภาคตัดขวางของเส้นใยกลวงโดยป้อนสารในลักษณะไหลสวนทางกัน.....	25
2.13 โมดูลเส้นใยกลวง.....	26
2.14 การดำเนินการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์.....	28
2.15 การดำเนินงานของอุปกรณ์เส้นใยกลวงที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
2.16 การแยกฟีนอลจากน้ำทิ้ง (กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 1).....	31
2.17 กลไกการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทาง เมื่อใช้สารสกัดที่เป็นกรด.....	32
2.18 กลไกการถ่ายเทไอออนแพลเลเดียมในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่ศึกษา.....	34
2.19 กลไกการถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน.....	35
3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัดไฮโอไรดาซิน.....	41
3.2 สูตรโครงสร้างของสารสกัดกรดโอเลอิก.....	42
3.3 ชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	42
3.4 ลักษณะของโมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.5 ลักษณะการปฏิบัติการ.....	45
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI กับร้อยละการสกัด ของไอออนโลหะ.....	54
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI กับร้อยละการนำกลับ ของไอออนโลหะ.....	55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

๗

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด OA กับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ...58	
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด OA กับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ..... 59	
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง log D กับ log[OA].....63	
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ..... 65	
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ..... 66	
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริป NaNO_2 กับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ..... 68	
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริป NaNO_2 กับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ..... 69	
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ... 71	
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ..... 72	
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ..... 74	
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ..... 75	
ง.1 ส่วนประกอบของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์..... 103	
ง.2 ลักษณะของหลอดแคโทด..... 104	
ง.3 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Varian model SpectraAA-20 ชนิด double beam.....107	

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

D	อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio)
HLB	Hydrophilic Lipophobic Balance
HR	สารสกัดที่เป็นกรด
K_{ex}	ค่าคงที่สมดุลการสกัด (Extraction equilibrium constant)
K_{strip}	ค่าคงที่สมดุลการนำกลับ (Stripping equilibrium constant)
M	ไอออนโลหะ
OA	สารสกัดกรดโอเลอิก
r	ขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
R	ระยะทางในการแพร่
R_3N	สารสกัดที่เป็นเบส
S.C.	ค่าสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic coefficient)
T	อุณหภูมิของสารละลาย
TRHCI	สารสกัดไตรโอโรดาซีน.ไฮโดรคลอไรด์

อักษรกรีก

η	ความหนืดของสารละลาย
--------	---------------------

ตัวห้อย

aq	วัฏภาคสารละลายเอควีเอส
FP	วัฏภาคสารละลายป้อน
MP	วัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
org	วัฏภาคสารละลายอินทรีย์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวห้อย (ต่อ)

- (1) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ 1
- (2) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ 2
- (1,2) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ 1 ผสมกับสารสกัดชนิดที่ 2

ตัวยก

—

วิภูภาคสารละลายอินทรีย์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทรัพยากรธรรมชาติต่าง ๆ นำมาใช้ผลิตอุปกรณ์อำนวยความสะดวกมากมาย อาทิเช่น รถยนต์ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ สิ่งก่อสร้าง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เองทำให้วัสดุจำพวกโลหะที่มีอยู่ในธรรมชาติเริ่มจะลดน้อยลงทุกที ก่อให้เกิดปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญที่จะต้องตระหนักถึง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแสวงหา หรือพัฒนากระบวนการนำกลับโลหะในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพ นอกจากเพื่อความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการทำให้เกิดผลที่คุ้มค่าและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของอุตสาหกรรมนั้นๆ ด้วย (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 1996)

โลหะมีตระกูล (Nobel metals) หรือโลหะมีค่า (Precious metals) ได้นำมาใช้ในปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงแพลเลเดียมที่อยู่ในกลุ่มโลหะเหล่านี้ซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ด้านทันตกรรม เครื่องประดับ โลหะผสมเพื่อต้านทานการสึกกร่อน ด้านปิโตรเคมีและด้านคะตะลิสต์ เป็นต้น ในศตวรรษหน้าคาดว่าทั่วโลกจะมีความต้องการใช้แพลเลเดียมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 10 เท่าจากปริมาณการผลิตในแหล่งธรรมชาติ (Rizvi et al., 1996) ปริมาณของแพลเลเดียมในธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณของแพลเลเดียมในธรรมชาติ (<http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Pd/geol.html>)

แหล่งที่พบ	ส่วนในพันล้านส่วนโดยน้ำหนัก	ส่วนในพันล้านส่วนโดยอะตอม
จักรวาล	2	0.02
ดวงอาทิตย์	3	0.04
แร่ที่มาจากดาวตก	670	130
เปลือกโลก	6.3	1
น้ำทะเล	-	-
กระแสน้ำ	-	-
มนุษย์	-	-

ในส่วนแรกนี้จะขอกล่าวถึงธาตุแพลเลเดียมซึ่งเป็นธาตุที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

แพลเลเดียม

แพลเลเดียมมีสัญลักษณ์ คือ Pd ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1803 โดย William Hyde Wollaston แพลเลเดียมมาจากคำว่า "Pallas" ในภาษากรีก ซึ่งหมายถึงเทพธิดาแห่งความเฉลียวฉลาด (<http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Pd/hist.html>) แพลเลเดียมจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะพลาทินัม (Platinum group metals ได้แก่ Pt, Pd, Rh, Ir, Ru และ Os) มีเลขอะตอม 46 น้ำหนักอะตอม 106.4 ผลึกมีสีขาวเงิน ความถ่วงจำเพาะที่ 20 องศาเซลเซียสเท่ากับ 12.02 จุดหลอมเหลว 1,555 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 3,167 องศาเซลเซียส สมบัติทางฟิสิกส์ของแพลเลเดียมแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของแพลเลเดียม (Livingstone, 1973)

สมบัติ	Pd
เลขอะตอม	46
สถานะพันธะไฟฟ้า	d^{10}
น้ำหนักอะตอม	106.4
โครงร่างผลึก	f.c. cube
รัศมีโลหะ: 12-โคออดิเนชัน ($^{\circ}A$)	1.37
ความถ่วงจำเพาะ, $20^{\circ}C$	12.02
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	1,555
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	3,167
ความร้อนจำเพาะ ($cal\ g^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$ at $0^{\circ}C$)	0.058
ความร้อนของการหลอมเหลว ($kcal\ g\text{-atom}^{-1}$)	4.12
ความร้อนของการกลายเป็นไอ ($kcal\ g\text{-atom}^{-1}$)	89
ค่าความต้านทาน ($microhm\text{-cm}$ at $20^{\circ}C$)	9.93

แพลเลเดียมมีสมบัติพิเศษอย่างหนึ่ง คือ ที่อุณหภูมิห้องสามารถดูดซึมแก๊สไฮโดรเจนได้ ปริมาตรมากกว่า 900 เท่า เมื่อเทียบกับปริมาตรของแพลเลเดียมเอง ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำแพลเลเดียมมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ทำแก๊สไฮโดรเจนให้มีความบริสุทธิ์

(<http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Pd/uses.html>) นอกจากนี้โลหะผสมแพลเลเดียม (Palladium alloys) สามารถนำมาใช้ในด้านต่าง ๆ ได้แก่การทำอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ด้านทันตกรรม เครื่องมือผ่าตัด เครื่องประดับ การผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน และดีไฮโดรจีเนชัน และวัสดุป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมการทำทองคำให้บริสุทธิ์ (Gold refinery) จะเกิดโลหะมีค่าต่าง ๆ ได้แก่แพลเลเดียม พลาตินัม และเงิน เป็นสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นละลายอยู่ในกรดกัดทอง (Aqua regia) โดยแพลเลเดียมจะมีปริมาณมากกว่าพลาตินัมประมาณ 2 เท่า ส่วนเงินจะมีปริมาณน้อยมากเมื่อนำกรดกัดทองไปใช้ในกระบวนการผลิตครั้งต่อไป ปริมาณโลหะเจือปนจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากโลหะเหล่านี้เป็นโลหะที่มีค่าทางเศรษฐศาสตร์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบวนการนำกลับ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และเป็นการบำบัดกรดกัดทองที่ใช้แล้ว ซึ่งการที่จะแยกธาตุในกลุ่มของโลหะพลาตินัมแต่ละธาตุออกจากกันไม่สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพด้วยกระบวนการธรรมดาได้ เช่น การตกตะกอน หรือการกรอง เนื่องจากสมบัติของธาตุในกลุ่มนี้ใกล้เคียงกันอย่างมาก (Tavlarides, Bae, and Lee, 1987) กระบวนการหนึ่งที่ถูกค้นพบและปัจจุบันใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อการนำกลับโลหะในกลุ่มนี้ คือ กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) (Kakoi, Goto, and Nakashio, 1997; Venkafachalam, 1998) แต่กระบวนการนี้ก็มีข้อเสีย คือ ค่าการเลือกสกัด (Selectivity) ที่จำกัดและอัตราเร็วในการสกัดช้ามาก เป็นผลให้ต้องใช้สารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลมาก เพื่อที่จะปฏิบัติการให้มีประสิทธิภาพได้ (Kakoi, Goto, et al., 1997) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาวิธีการอื่นขึ้น ซึ่งกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพราะสามารถรวมขั้นตอนการสกัดและการสตริปไว้ขั้นตอนเดียว มีค่าการคัดเลือกผ่านสูง ประหยัดพลังงาน และลดปริมาณการใช้ตัวทำละลาย และสารสกัดได้ด้วย

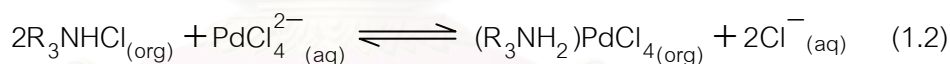
วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการนำกลับโลหะแพลเลเดียมจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้คือ กรดกัดทองใช้แล้วจากโรงงานผลิตทองคำ โดยใช้กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และใช้สารสกัด 2 ชนิดผสมกัน ได้แก่ สารสกัดไฮโอไรดาซีน และสารสกัดกรดโอเลอิก ซึ่งจะศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการนำกลับแพลเลเดียม อาทิเช่น ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิด ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไนไตรต์ที่ใช้เป็นสารสตริป เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

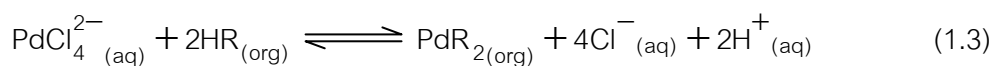
งานวิจัยที่ผ่านมาแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด แพลเลเดียม และส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดแพลเลเดียม

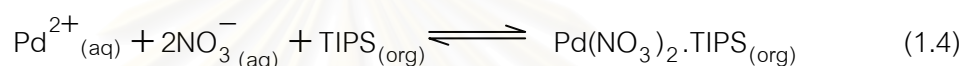
Fu, Nakamura, and Akiba (1995) ศึกษาการซึมผ่านของแพลเลเดียม (II) ไอออน ที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริกผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับซึ่งมีสารสกัดไตรออกทิลเอมีน (Trioctylamine, TOA) ละลายในเคโรซีนเคลือบฝังอยู่ โดยสารสตริป คือ กรดเปอร์คลอริกและ กรดไนตริก นอกจากนี้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของ TOA ความเข้มข้นของกรดในสารละลาย สตริป และความเข้มข้นเริ่มต้นของแพลเลเดียม (II) จากการศึกษาพบว่า เมื่อเยื่อแผ่นเหลวที่มี ตัวรองรับเคลือบฝังด้วย 0.5 M TOA และ 20% 1-octanol จะไม่เหลือแพลเลเดียมอยู่ในเฟส สารละลายป้อนอยู่เลย และการนำกลับด้วยกรดไนตริกเร็วกว่าการนำกลับด้วยกรดเปอร์คลอริก ซึ่งปฏิกิริยาการสกัดแพลเลเดียม (II) ด้วยสารสกัด TOA (R_3N) เป็นดัง ปฏิกิริยาที่ (1.1) และ (1.2)



Kakoi, Horinouchi et al. (1996) ศึกษาการนำกลับไอออนแพลเลเดียมแบบคัดเลือกใน น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีไอออนเหล็กละลายอยู่ในปริมาณมาก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิด อิมัลชันที่มีสารสกัดที่มีหมู่ซัลเฟอร์ในถังกวน เริ่มแรกได้ศึกษาการสกัดของไอออนแพลเล- เดียมและเหล็กด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) เพื่อสามารถ เลือกสารสกัดที่เหมาะสมต่อการดำเนินการแบบเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน นอกจากนี้ได้ศึกษาผล ของสปีชีส์ทางเคมี และปัจจัยต่าง ๆ ต่อการนำกลับแพลเลเดียมได้แก่ ชนิด และความเข้มข้นของ สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของไฮโอxyเรียที่ใช้เป็นสารละลายสตริป จากการศึกษาพบว่า สาร สกัด Di-2-ethylhexyl monothio phosphoric acid (ชื่อทางการค้า MSP-8) เป็นสารสกัดที่ดีที่สุด สามารถนำกลับแพลเลเดียมได้มากกว่า 95% จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเทียม (Pseudoindustrial wastewater) ภายในเวลาไม่กี่นาที เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสม โดยมีปฏิกิริยาการสกัดดังนี้

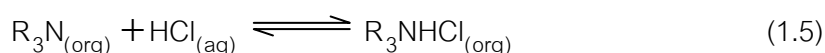


Rizvi et al. (1996) ศึกษาการนำกลับไอออนแพลเลเดียมจากสารละลาย Pressurized heavy water reactor high level waste (PHWR-HLW) ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้สารสกัด Cyanex-471x (triisobutylphosphine sulfide, TIPS) ซึ่งเป็นสารสกัดที่ดีที่สุดที่ใช้ในการสกัดแพลเลเดียมจากสารละลาย HLW จริง นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของกรดไนตริกในสารละลายป้อน และชนิดของสารสกัดต่าง ๆ จากผลการวิจัยพบว่า สามารถสกัดไอออนแพลเลเดียมที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกระหว่าง 2.0-6.0 โมลาร์ โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกระหว่าง 2.0-5.0 โมลาร์ จะไม่ส่งผลกระทบต่อสกัดแพลเลเดียมด้วยสารสกัด TIPS เป็นเวลาอย่างน้อย 71 ชั่วโมง ซึ่งปฏิกิริยาการสกัดที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



Kakoi, Goto et al. (1997) ศึกษาการนำกลับไอออนแพลเลเดียมจากกรดไนตริกที่มีไอออนเงินละลายอยู่ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันที่มีสารสกัด LIX860 หรือ β -hydroxyoxime เพื่อศึกษาสมมูลการสกัดของแพลเลเดียม และเงิน เริ่มแรกทำการทดลองสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้สารสกัดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ LIX860, SFI-6, MSP-8, D2EHPA, TBP และ Kelex 100 พารามิเตอร์ทางเคมีที่มีผลต่อการนำกลับที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารละลายสตริป และสารลดแรงตึงผิว จากการศึกษาพบว่า แพลเลเดียมสามารถสกัดออกจากสารละลายที่มีเงินอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้สารสกัด LIX860 สารละลายสตริป คือ กรดเปอร์คลอริก หรือ ไฮโอยูเรีย ส่วนสารลดแรงตึงผิว คือ Span80 ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม

Fu et al. (1997) ศึกษาการสกัดโลหะมีค่าที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัด trioctylamine (TOA) ละลายในเคโรซีน เพื่อศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด TOA พบว่าลำดับการสกัดของไอออนโลหะมีค่า คือ $\text{Au(III)} > \text{Pd(II)}, \text{Pt(IV)}, \text{Ir(IV)} > \text{Ir(III)}, \text{Ru}$ ซึ่งปฏิกิริยาการสกัด คือ



เมื่อ MCl_z^{n-} แทน $AuCl_4^-$, $PtCl_6^{2-}$, $PdCl_4^{2-}$, $IrCl_6^{2-}$, $IrCl_6^{3-}$ และ Ru chlorocomplexes

จากงานวิจัยมีความเป็นไปได้ในการแยกและนำกลับโลหะมีค่าจากสารผสมได้ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับที่มีสารสกัด TOA ได้ เนื่องจากความแตกต่างในสมมูลการสกัด และ จลนศาสตร์ของโลหะมีค่าแต่ละตัว

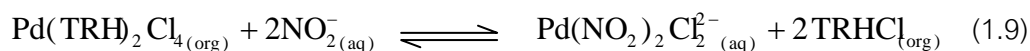
Rovira and Sastre (1998) ศึกษาการซึมผ่านของ Pd(II) ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับซึ่งเคลือบฝังด้วยสารสกัด di-(2-ethylhexyl) monothiophosphoric acid (DEHTPA) ในเคโรซีน โดยเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายกลไกการเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นของสารละลายป้อนเอควิวส ปฏิริยาเคมีที่ผิวหน้า และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาช่วงชีวิต (Lifetime) ของเยื่อแผ่นด้วย จากการศึกษาพบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถทำนายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เสนอ โดยปฏิริยาการสกัดและค่าคงที่การสกัดดังสมการที่ (1.3) และ (1.7) ตามลำดับ

$$K_{ex} = \frac{[PdR_2]_{(org)} [Cl^-]_{(aq)}^4 [H^+]_{(aq)}^2}{[HR]_{(org)}^2 [PdCl_4^{2-}]_{(aq)}} \quad (1.7)$$

โดยเริ่มแรกนั้นพลักซ์ของไอออนแพลเลเดียมจะคงที่ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่น (Membrane permeability coefficient) จะแปรผันกับเวลา แสดงว่าอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ในเยื่อแผ่น ต่อมาเมื่อความเข้มข้นของไอออนแพลเลเดียมในสารละลายป้อนลดลงพลักซ์จะลดลง และค่าการซึมผ่านของไอออนโลหะจะไม่ขึ้นกับเวลา แสดงว่าการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน นอกจากนี้ DEHTPA สามารถสกัด Pd(II) ได้มากกว่า Fe(III), Pt(IV), Rh(III) และ Zn(II) โดยเยื่อแผ่นเหลวมีช่วงชีวิตที่ดีอยู่ภายหลังจากที่ผ่านการดำเนินงานแล้ว 5 ครั้ง

Farhadi and Shamsipur (2000) ศึกษาการสกัดไอออนแพลเลเดียม (II) ละลายในกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัด thioridazine•HCl (TRHCl) และ oleic acid (OA) ละลายในคลอโรฟอร์ม ซึ่งได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดได้แก่ ผลของความเข้มข้นของ TRHCl และ OA ความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์ซึ่งเป็นสารละลายสตริป และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน จากการศึกษาพบว่า ที่ pH2 ลิแกนด์ (Ligand) สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียรกับ Pd(II) ได้ โดยที่เวลา 120 นาที แพลเลเดียมจะถ่ายเทไปยังเฟสสารละลายสตริปได้ $96.3 \pm 2.5\%$ นอกจากนี้ Pd(II) สามารถสกัดออกจากสารละลายที่มีแคทไอออนอื่น ๆ ได้ เช่น K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}

และ Al^{3+} ปฏิกิริยาการสกัด และการสตริปไอออนแพลเลเดียมที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ (1.8) และ (1.9) ตามลำดับ



งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

Miyata, Goto, and Nakashio (1995) ได้พัฒนาสารเสริมฤทธิ์การสกัดชนิดละลายในน้ำมัน เพื่อการแยกยทเทรียม (Yttrium) แบบคัดเลือกจากโลหะหายาก (เออร์เมียม และฮอลเมียม) โดยสารเสริมฤทธิ์การสกัดที่ใช้คือ อนุพันธ์อัลคิลของกรดพอลิอะมิโนคาร์บอกซิลิกที่มีกัมมันตภาพระหว่างผิวหน้า (Interfacial activity) เหมือนสารลดแรงตึงผิว และใช้สารสกัดคือ 2-ethylhexyl phosphonic acid mono-2-ethylhexyl ester (ชื่อทางการค้า PC-88A) ทดลองภายในเครื่องสกัดเยื่อแผ่นชนิดเส้นใยกลวง จากการศึกษพบว่าสารชนิดใหม่นี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่ออัตราเร็วการซึมผ่านของโลหะหายากที่บริเวณผิวหน้าระหว่างน้ำมันกับน้ำ นอกจากนี้เมื่อเติมสารชนิดใหม่เพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าการคัดเลือกยทเทรียมจากเออร์เมียม และฮอลเมียมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วการซึมผ่านของยทเทรียมลดลงเมื่อเทียบกับโลหะหายากทั้งสอง ซึ่งความแตกต่างในอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสารเสริมฤทธิ์การสกัดและไอออนของโลหะหายากที่ผิวหน้าระหว่างน้ำมันกับน้ำเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการแยกมีค่าเพิ่มขึ้น

Sayed , Sami , and ELTawab (1996) ศึกษาการสกัดด้วยตัวทำละลายสกัดแยกไอออนของธาตุหายาก La, Nd, Tm, Lu และ Y ที่ละลายในสารละลายไนเตรต (0.6 M HNO_3 + 11.6 g/L CaO) ด้วยวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยใช้สารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) ร่วมกับ Trioctylamine (TOA) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิด ชนิดของตัวทำละลาย ชนิดของสารเชิงซ้อน และผลของไอออนแคลเซียมที่เติมต่อประสิทธิภาพในการสกัด จากการทดลองพบว่าสารสกัด TOA จะเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดเมื่อใช้สารสกัด HTTA เพียงสารเดียว โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.01 M HTTA และ 1% TOA ละลายในเบนซีน จะทำให้สามารถเลือกสกัดธาตุหายากออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อเติมไอออนแคลเซียมลงในสารละลายให้มีความเข้มข้น 8.3 g/L สามารถสกัดธาตุหายากที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้มากกว่าธาตุหายากที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Ma, Chen, and Hossain (2000) ศึกษากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุง
 แนวนใหม่ เพื่อนำกลับไอออนลิเทียมจากสารผสมหลายองค์ประกอบ (Multicomponent mixture)
 โดยสารสกัดที่ใช้เป็นสารสกัดผสมระหว่าง LIX 54 และ TOPO ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเป็น
 กรด-ด่าง ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของไอออนลิเทียมเริ่มต้น ชนิดของตัวทำ
 ละลายอินทรีย์ และชนิดของสารละลายสตริป จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการสกัดไอออน
 ลิเทียมจากสารละลายผสมที่มีไอออนโซเดียมและโพแทสเซียมมีค่าสูงกว่าร้อยละ 95 ในสภาวะ
 ดังนี้ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่า 12.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนลิเทียม
 20 ppm ความเข้มข้นของสารสกัด LIX 54 0.146 M ความเข้มข้นของสารสกัด TOPO 0.05 M
 สารละลายสตริปคือ 1 M H₂SO₄ อัตราการไหลของสารละลายสตริป 1-3.5 ml/min และระบบที่
 ศึกษาที่มีความเสถียรแม้จะปฏิบัติการเป็นเวลา 2 วันก็ตาม

ประกร รามกุล (2002) ศึกษาการแยกไอออนแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกัน โดย
 ใช้สารสกัด HTTA ผสมกับสารสกัด TOA ละลายในเบนซีนเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพุง
 ไว้ในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวง และได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-
 ด่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA และ TOA ความเข้มข้นของไอออน
 แลนทานัมและนีโอดีเมียมเริ่มต้น และผลของการเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวง ผลการศึกษา
 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมมีค่า 2.5 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA
 ในขณะที่ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA คงที่ พบว่าความแตกต่างระหว่างการสกัดไอออนแลน
 ทานัมและนีโอดีเมียมจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงจะทำให้สามารถสกัด
 ไอออนทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นด้วย

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสกัดและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนแพลเลเดียมจากกรดกัด
 ทองใช้แล้ว โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่มีสารสกัดไฮโอไรดาซีนผสม
 กับสารสกัดกรดโอเลอิก
2. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนแพลเลเดียมผ่าน
 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่
 - 2.1 ความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีนในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม
 - 2.2 ความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม
 - 2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน
 - 2.4 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์ที่ใช้เป็นสารละลายสตริป
 - 2.5 อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริป

- 2.6 จำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง
3. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัด และนำกลับแพลงก์ตอนจากกรดกัดทองใช้แล้ว โดยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ศึกษา
4. เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาระบบการนำกลับแพลงก์ตอนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไป

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสกัด และนำกลับไอออนแพลงก์ตอนจากกรดกัดทองใช้แล้วผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัดผสมระหว่างไฮโดรดาซีน และกรดโอเลอิกละลายในคลอโรฟอร์มเคลือบฝักรูพรุนจุลภาค การปฏิบัติการเป็นแบบไหลสวนทางกัน (Counter current flow)
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด และนำกลับไอออนแพลงก์ตอนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่
 - 2.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดไฮโดรดาซีนในช่วง 0.000125-0.00100 โมลาร์
 - 2.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในช่วง 0.000-0.500 โมลาร์
 - 2.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนในช่วง pH 0.5-2.2
 - 2.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์ที่ใช้เป็นสารละลายสตรีปในช่วง 0.00-0.05 โมลาร์
 - 2.5 ผลของอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสตรีปในช่วง 100-300 มิลลิลิตรต่อนาที
 - 2.6 ผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการ และกลไกการสกัดไอออนแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัด และนำกลับไอออนแพลเลเดียม ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
3. สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำกลับไอออนแพลเลเดียมในระบบที่ศึกษานี้ได้
4. สามารถนำข้อมูล และผลการวิจัยที่ได้ นำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

ก่อนที่จะรู้จักเยื่อแผ่นเหลวจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงคำว่า “เยื่อแผ่น” เสียก่อน เยื่อแผ่นทำหน้าที่เป็นตัวกั้น (Barrier) ซึ่งอาจเป็นฟิล์มบาง ๆ หรือหยดขนาดเล็กมาก ๆ กั้นระหว่างสารละลายสองเฟสออกจากกัน และจำกัดการถ่ายเทสารเคมีต่าง ๆ ให้มีความจำเพาะมาก ๆ โดยการเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพของเยื่อแผ่น (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543) เยื่อแผ่นอาจเป็นแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) หรือวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) มีโครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric) หรืออสมมาตร (Asymmetric) มีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลว อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุเป็นบวกหรือลบ หรืออาจมี 2 ขั้ว ความหนาอาจจะแปรผันตั้งแต่ต่ำกว่า 100 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 1 เซนติเมตรก็ได้

เยื่อแผ่นและเทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่นได้รับความสนใจและมีการพัฒนามากขึ้นทั้งในด้านอุตสาหกรรมและงานวิจัย ตัวอย่างของกระบวนการที่ใช้เทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่น ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำจืดจากน้ำทะเล การแยกสารด้วยอิเล็กโตรไดอะไลซิสเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การฟอกเลือดด้วยไตเทียม และการผลิตอาหารและยาด้วยอัลตราฟิลเตรชัน เป็นต้น

ด้วยเหตุผลที่ว่า การแยกด้วยเยื่อแผ่นมีข้อดีเหนือการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานานแล้ว คือ มีค่าการเลือกสกัดสูง ใช้สารสกัดและตัวทำละลายในปริมาณน้อย สามารถแยกสารที่มีความเจือจางมาก ๆ ได้ อัตราการสกัดเร็วกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลาย และสามารถเกิดขึ้นตอนการสกัดและการสทริบได้พร้อม ๆ กัน (นิสิต สุไลมาน, 2543) นอกจากนี้การแยกด้วยเยื่อแผ่นสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิปกติ จึงใช้สารละลายที่ไวต่ออุณหภูมิได้ โดยไม่ทำให้องค์ประกอบหรือโครงสร้างทางเคมีเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตอาหารและยา

2.1.1 นิยามของเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane process) ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดย N. N. Li (นภกร ธีรมพิพิธ, 2542) เป็นกระบวนการที่ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการสไตริปเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยเยื่อแผ่นจะเป็นของเหลวทำหน้าที่เป็นชั้นเลือกผ่าน (Selective separation layer) แยกเฟสสารละลายป้อนและสารละลายสไตริปออกจากกัน และเลือกผ่านตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดเท่านั้น

จากนิยามข้างต้นสามารถอธิบายเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายดังนี้ กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะประกอบด้วย 3 ภูมิภาค ได้แก่ ภูมิภาคแรกคือ ภูมิภาคของสารละลายป้อนจะมีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ ภูมิภาคต่อมาคือ ภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะมีสารสกัดละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และภูมิภาคสุดท้ายคือ ภูมิภาคของสารละลายสไตริป ซึ่งทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกถ่ายเทมาจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวนั้นจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อน และสารละลายสไตริป ด้วยเหตุนี้เองทำให้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาชั้นของฟิล์มที่บาง และมีความเสถียร เพื่อทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบชั้นฟิล์มของเหลวที่เป็นไปได้ โดยรูปแบบอิมัลชัน และแบบเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพยุ่งมีความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่ารูปแบบอื่น (Schulz, 1988) ซึ่งจะกล่าวถึงรูปแบบเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน และแบบที่มีตัวพยุ่งอย่างละเอียดในส่วนต่อไป



รูปที่ 2.1 รูปแบบเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Schulz, 1988)

2.1.2 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นจากพอลิเมอร์ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

เยื่อแผ่นที่มีความพรุนในระดับต่าง ๆ ได้มีการนำมาใช้เป็นเวลามากกว่า 100 ปี โดยเริ่มแรกนั้นในปี ค.ศ.1855 Fick ได้ใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดเซมิเพอร์มิเอเบิล (Semipermeable) เพื่อศึกษากระบวนการแพร่ (Diffusion process) ซึ่งเยื่อแผ่นในยุคนั้นได้มาจากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ผิวน้ำของสัตว์ ถูกลมของปลา หรือลำไส้ของสัตว์ เป็นต้น ต่อมาวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น คือ เครื่องกระเบื้อง แต่ความก้าวหน้าที่สำคัญในการผลิตเยื่อแผ่นเหลวคือ การใช้เซลลูโลสไนเตรต (หรือไนโตรเซลลูโลส) ในปีค.ศ.1860 และได้พัฒนาต่อมาโดยนักวิจัยหลายท่าน เพื่อควบคุมขนาดของรูพรุนให้สม่ำเสมอ (Bechhold, 1907; Pierce, 1927; Elford, 1937; Daubner and Peter, 1974; Jacobs, 1974; Brock, 1983 อ้างถึงใน รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) เยื่อแผ่นที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมากกว่าร้อยละ 90 ผลิตจากพอลิเมอร์อินทรีย์ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ดีสำหรับผลิตเยื่อแผ่นที่มีความหลากหลาย ให้ค่าการเลือกผ่านที่ดี และสามารถผลิตเยื่อแผ่นได้ทุกโครงสร้าง ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงวิธีการผลิตเยื่อแผ่นจากพอลิเมอร์เฉพาะที่สำคัญ ๆ ดังนี้

2.1.2.1 วิธีการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion method)

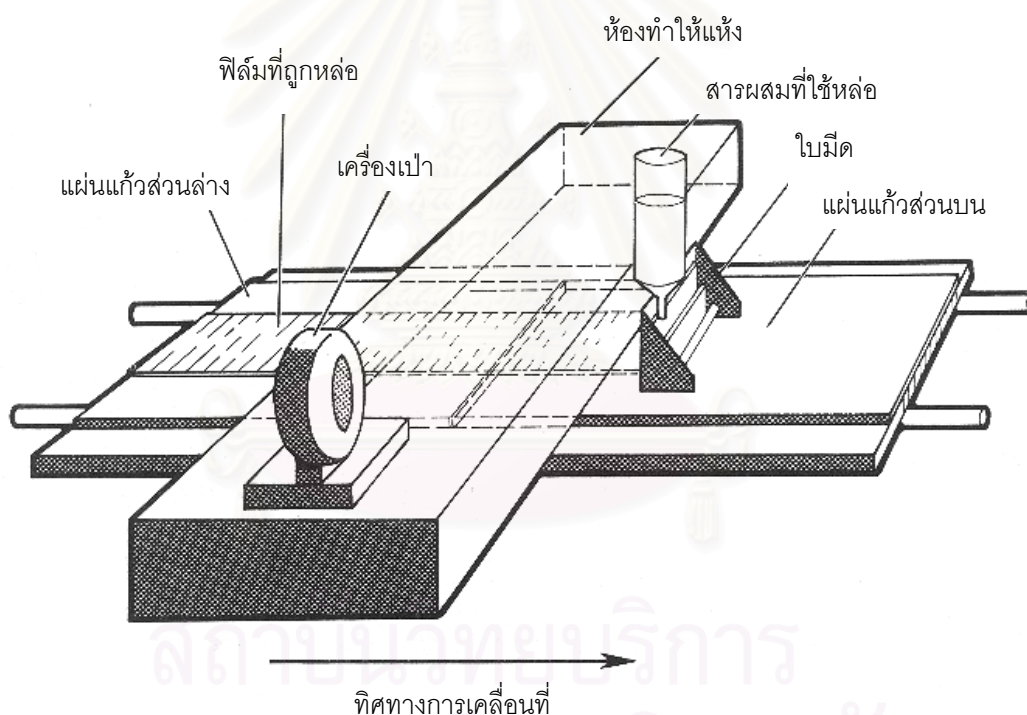
วิธีการผลิตนี้ใช้กันมากที่สุดในการผลิตเยื่อแผ่นที่จำหน่ายทั่วไป การเปลี่ยนเฟส หมายถึงการทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบหนึ่ง ๆ เปลี่ยนจากสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous) ที่เรียกว่าโซล 1 (Sol) ไปเป็นสารละลายเนื้อผสมหรือโซล 2 จากนั้นจะเปลี่ยนไปเป็นเจล โดยระหว่างการเปลี่ยนแปลงจะเกิดชั้นผิว และรูพรุนภายในฟิล์มหรือเจลได้

สารละลายสำหรับผลิตเยื่อแผ่นโดยทั่วไปประกอบด้วยพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย ตัวไม่ละลาย และสารพองตัว (Swelling agent) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ โดยจะส่งผลต่อสมบัติของเยื่อแผ่นที่ได้ การเปลี่ยนเฟสสามารถทำได้โดยการระเหยตัวทำละลายออกจากสารละลายพอลิเมอร์ หรือการลดอุณหภูมิของสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นการลดความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ และกลไกการเกิดเยื่อแผ่นก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อผสมสารละลายพอลิเมอร์ในสัดส่วน ที่ต้องการจะต้องปล่อยให้สารละลายนี้ไว้ที่อุณหภูมิคงที่พร้อมต้องกวนตลอดเวลา (การกวนจะช่วยให้สารละลายเป็นเนื้อเดียว และช่วยให้พอลิเมอร์ละลายได้ง่ายขึ้น) ช่วงเวลานี้ คือ การปรับตัว (Maturation time) ซึ่งตัว

ทำละลายจะแทรกซึมไปละลายพอลิเมอร์ และในบางกรณีอาจทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง จากนั้นนำสารละลายพอลิเมอร์มาทำให้เป็นฟิล์มบาง (Casting) บนแผ่นแก้ว หรือชั้นรองรับ โดยใช้ใบมีดที่สามารถปรับค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ในกรณีที่ทำเยื่อแผ่นบาง ซึ่งอาจจะผลิตเป็นเยื่อแผ่นแบบท่อ หรือเส้นใยกลวงก็ได้) โดยขั้นตอนนี้ควรทำในบรรยากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำให้เป็นฟิล์มบางมีดังนี้

1. การระเหยตัวทำละลาย (บางส่วน หรือทั้งหมด)
2. การเกิดเจล
3. การหดตัวของเจล
4. การลดช่องว่างแคปิลารี



รูปที่ 2.2 การทำเยื่อแผ่นให้เป็นฟิล์ม (Casting) (Brock, 1983)

ผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับชนิด และสมบัติของเยื่อแผ่น สามารถแบ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบของสารละลายพอลิเมอร์ และตัวแปรในการผลิต โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับส่วนประกอบของสารละลายพอลิเมอร์มีดังนี้

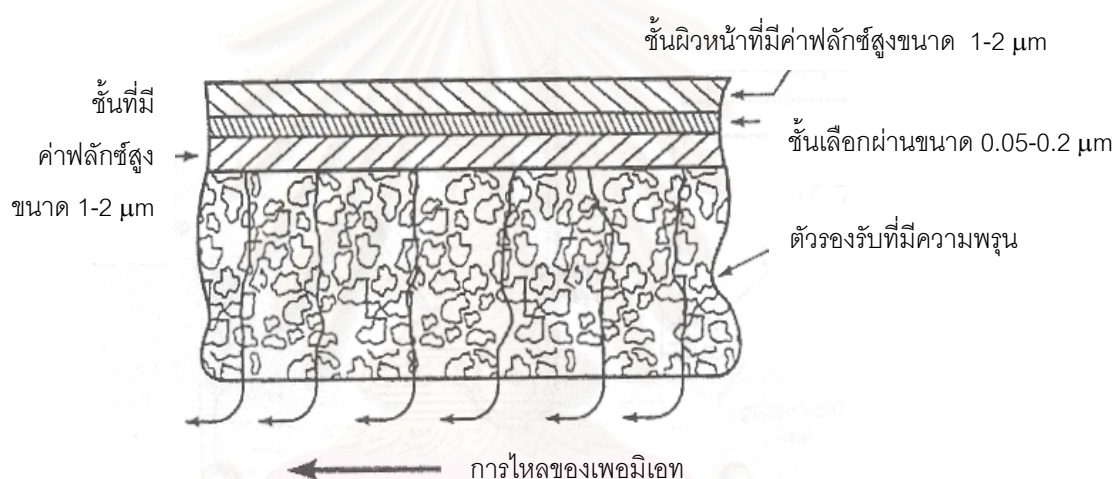
1. พอลิเมอร์ ควรจะละลายในตัวทำละลายได้ดี เพื่อให้ได้สารละลายเนื้อเดียว และควรเป็นชนิดชอบน้ำจะทำให้มีค่าฟลักซ์สูง เช่น เซลลูโลสอะซิเตต พอลิเอไมด์ เป็นต้น
2. ตัวทำละลาย ควรมีความเป็นขี้ดต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการแยกเฟสก่อนขั้นตอนการระเหยตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เป็นต้น
3. ตัวไม่ละลาย ต้องใส่ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะจะก่อให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างของเจลเพิ่มขึ้น เช่น น้ำ เมทานอล เป็นต้น
4. สารพองตัว คือ สารที่เติมลงไปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส (มีสมบัติอยู่ระหว่างตัวทำละลาย และตัวไม่ละลาย) และทำให้เยื่อแผ่นมีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด เช่น เบนซีน ลิเทียมคลอไรด์ เป็นต้น
5. ความเข้มข้นของสารละลาย ขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิเมอร์ และตัวทำละลาย โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนและฟลักซ์ต่ำ

ในส่วนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีดังนี้

1. วิธีเตรียมสารละลาย การเตรียมสารละลายโดยวิธีผสม (การนำส่วนประกอบมาผสมกันแล้วกวน) จะได้ผลดีกว่าการเตรียมโดยวิธีละลาย (ปล่อยสารละลายให้ละลายอย่างช้า ๆ) เพราะพอลิเมอร์จะละลายได้ดีกว่า เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า และมีค่าฟลักซ์สูงกว่าด้วย
2. ช่วงเวลาการปรับตัวของสารละลาย คือ ช่วงเวลาที่ปล่อยสารละลายไว้หลังจากการเตรียมสารละลายแล้ว โดยถ้ามีการปรับตัวนานจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีขนาดสั้นลง และรูพรุนมีขนาดใหญ่
3. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะทำให้ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลายลดลง ชื้นผิวจะบาง รูพรุนจะมีขนาดใหญ่
4. เวลาในการระเหย ถ้าปล่อยให้เวลาในการระเหยนานจะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็ก ฟลักซ์มีค่าต่ำ

2.1.2.2 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นเชิงประกอบ (Composite membrane)

วิธีนี้พัฒนามาจากวิธีการเปลี่ยนเฟสโดยสามารถเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวรองรับ และชั้นผิว (Active skin layer) ได้ เพื่อให้ได้เยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (เพิ่มค่าการซึมผ่าน และความแข็งแรงของเยื่อแผ่น) เยื่อแผ่นที่ผลิตโดยวิธีนี้เหมาะกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ แก๊สเพอมีเอชัน และเพอแวนพอเรชัน การผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมตัวรองรับ และการเตรียมชั้นผิว โดยการเตรียมชั้นผิวยังแบ่งออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ การเคลือบเป็นฟิล์มบาง การจุ่ม การพ่น และการทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันบนตัวรองรับ ลักษณะของเยื่อแผ่นเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 2.3



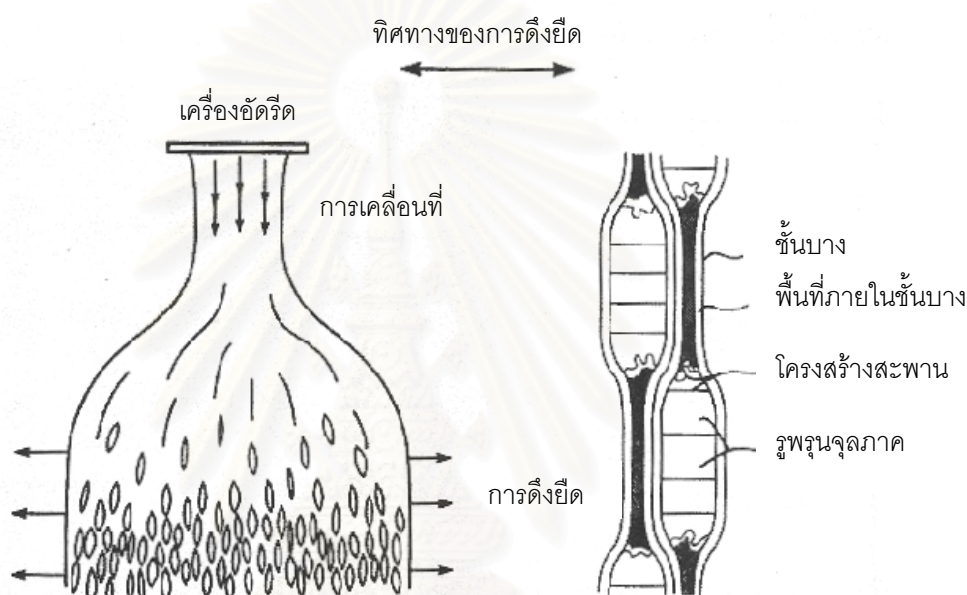
รูปที่ 2.3 ลักษณะของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ (Baker, 2000)

2.1.2.3 วิธีการอบเชื่อม (Sintering)

วิธีนี้สามารถเตรียมได้ง่ายที่สุด แต่จะได้เยื่อแผ่นที่มีการกระจายของขนาดรูพรุนที่กว้าง มีโครงสร้างรูพรุนไม่สม่ำเสมอ และมีค่าความพรุนต่ำ วิธีการผลิตเริ่มจากการอัดผงอนุภาคของพอลิเมอร์ให้เป็นฟิล์มบาง ซึ่งมีความหนาตั้งแต่ 100-500 ไมครอน จากนั้นให้ความร้อนจนถึงจนถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์นั้นเล็กน้อย แล้วปล่อยให้เย็นตัว อนุภาคของพอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดรูพรุนขึ้น พอลิเมอร์ที่นำมาผลิตเยื่อแผ่นวิธีนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เป็นต้น ขนาดของรูพรุนที่ได้จะอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 ไมครอน

2.1.2.4 วิธีการดึงยืด (Stretching)

วิธีนี้ใช้กับพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เท่านั้น โดยเยื่อแผ่นที่ได้จะมีความพรุนสูง (อาจมากกว่าร้อยละ 90) การผลิตเริ่มจากการอัดรีด (Extrusion) ผงพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกบางส่วนให้เป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นดึงพอลิเมอร์ขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการอัดรีด เพื่อให้เกิดการฉีกขาดบางส่วนของฟิล์ม ดังรูป



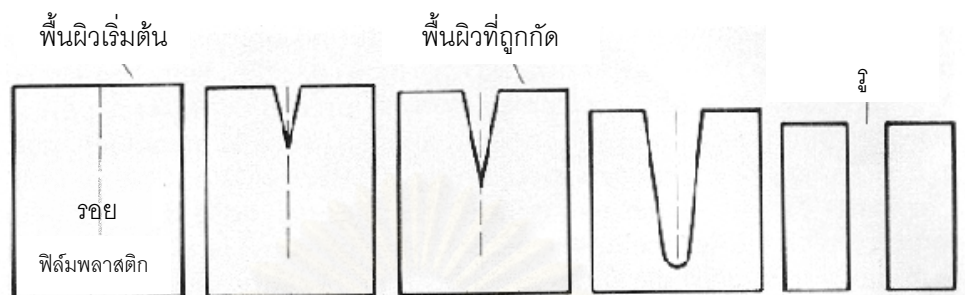
ที่ 2.4

รูปที่ 2.4 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีนโดยการดึงยืด (Baker, 2000)

2.1.2.5 วิธีการกัดรอย (Track etching)

วิธีนี้จะได้เยื่อแผ่นที่มีรูพรุนทรงกระบอกที่มีขนาดเท่า ๆ กัน โดยการผลิตประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเรียก Track คือ การปล่อยอนุภาคกัมมันตรังสีที่มีพลังงานสูงด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ไปกระทบแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ เพื่อให้พันธะของพอลิเมอร์แตกออกตรงตำแหน่งที่ถูกยิง ขั้นตอนต่อมาเรียก Etching คือ การนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปแช่ในกรด หรือด่าง ซึ่งสารละลายจะกัดเซาะตำแหน่งที่ถูกยิงเกิดเป็นรูพรุนทรงกระบอกขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยในขั้นตอนแรกนั้นเวลาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ และพลังงานของอนุภาคจะมีผลต่อความพรุนของเยื่อแผ่นที่ได้ ขณะที่ขั้นตอนที่สองเวลาที่ใช้ในการแช่จะมีผลต่อขนาดของรูพรุน และความหนาของ

เยื่อแผ่น พอลิเมอร์ที่นำมาผลิต คือ พอลิคาร์บอเนต และ พอลิเอสเตอร์ ข้อเสียของวิธีนี้ คือ เยื่อแผ่นที่ได้จะมีความพรุนต่ำ



รูปที่ 2.5 การผลิตเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ชนิดพอลิคาร์บอเนตด้วยวิธีกัดรอย (Brock, 1983)

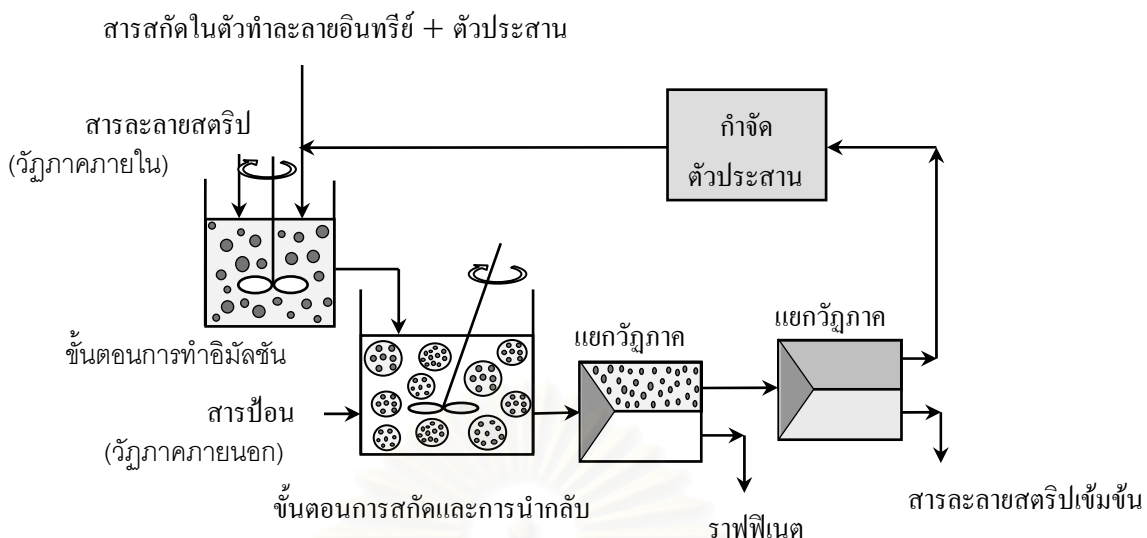
2.1.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลว

รูปแบบของเยื่อแผ่นสำหรับกระบวนการการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

2.1.3.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane)

เทคนิคนี้ประดิษฐ์ขึ้นโดย Li และคณะที่ Exxon ในปลายทศวรรษที่ 1960 และดำเนินการมากกว่า 20 ปี ในปีค.ศ. 1971-1973 Cussler ใช้เทคนิคนี้เพื่อเลือกสกัดไอออนโลหะ จากนั้นกลุ่ม Exxon ได้ติดตั้งเป็นระดับโรงงานนำร่อง (pilot plant) ในปี 1976 (Baker, 2000)

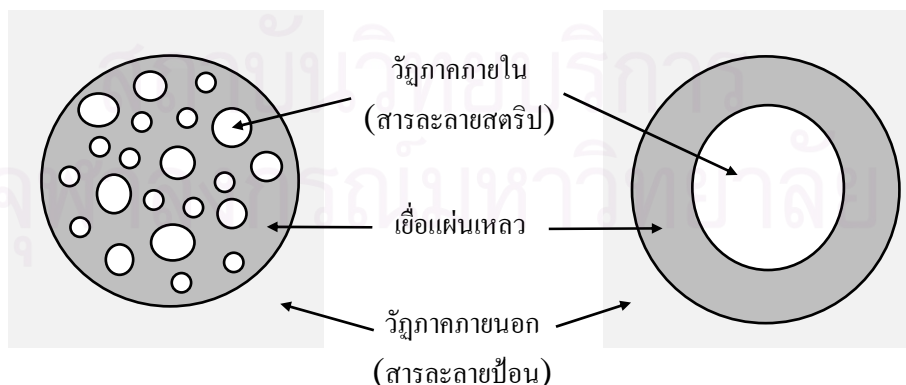
เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้จะต้องใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ในการดำเนินการ ซึ่งวัฏภาคสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์จะก่อตัวเป็นหยดกั่นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนเอเคเวียสหรือเรียกว่าวัฏภาคภายนอก (External phase) และสารละลายสตริปเอเคเวียสหรือเรียกว่าวัฏภาคภายใน (Internal phase) โดยไอออนโลหะจะถูกทำให้เข้มข้นภายในหยดอิมัลชัน (ในกรณีเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันชนิดน้ำ-น้ำมัน-น้ำ) การดำเนินการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 กระบวนการดำเนินการด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน

1. การเตรียมอิมัลชัน (Emulsification)

การเตรียมอิมัลชันสามารถทำได้โดยกวนสารละลาย 2 ชนิด ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันด้วยความเร็วรอบสูง อาจสูงถึง 20,000 รอบต่อนาที (รัตน จิระรัตนานนท์, 2543) แต่อิมัลชันที่เกิดขึ้นนี้มักจะไม่เสถียร ดังนั้นจำเป็นต้องเติมสารลดแรงตึงผิว หรือตัวประสาน (Emulsifier) อิมัลชันที่เตรียมควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเท่าใดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของทรงกลมจะยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลมากขึ้น ลักษณะของหยดอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ก. หยดอิมัลชันที่เกิดขึ้นจริง ข. หยดอิมัลชันในอุดมคติ

โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดวิฏภาคภายในจะอยู่ในช่วง 1-3 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอิมัลชันจะอยู่ในช่วง 0.1-2.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขนาดดังกล่าวขึ้นอยู่กับความแรงของการกวน ความหนืดของสารละลายทั้ง 2 ชนิดที่เกิดเป็นอิมัลชัน และความเข้มข้นของตัวประสาน

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ w/o/w (Water-in-oil-in-water) เมื่อวิฏภาคภายในเป็นสารละลายเอควียส และ o/w/o (Oil-in-water-in-oil) เมื่อวิฏภาคภายในเป็นสารละลายอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงมี 2 ชนิดเช่นเดียวกัน คือ ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic surfactant) และชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surfactant) หลักเกณฑ์ในการเลือกสารลดแรงตึงผิว (Marr and Copp, 1982; Winston Ho and Li, 1992) มีดังนี้

1. มีความคงทนต่อกรด ด่าง และแบคทีเรีย
2. ไม่เป็นพิษ ราคาถูก
3. สารลดแรงตึงผิวต้องไม่ทำปฏิกิริยากับตัวสกัดในเยื่อแผ่น
4. ไม่ทำให้เกิดความต้านทานต่อการถ่ายเทมวล
5. ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลวควรอยู่ระหว่าง 0.1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
6. สารลดแรงตึงผิวที่เลือกใช้ควรมีค่า HLB (Hydrophilic Lipophobic Balance) ระหว่าง 6-8 โดยค่า HLB สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$HLB = \% \text{โดยน้ำหนักของกลุ่มชอบน้ำในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว} \div 5 \quad (2.1)$$

ในปัจจุบันสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้มากกับเยื่อแผ่นเหลวอยู่ในกลุ่ม SPAN80 และ ECA4630 (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

SPAN80 (Sorbitan monooleate) มีน้ำหนักโมเลกุล 480 จะทำให้เกิดอิมัลชันที่คงตัว มีความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลต่ำ แต่มีข้อเสียคือ สามารถจับตัวกับน้ำได้ทำให้เยื่อแผ่นเกิดการพองตัว (Osmotic swelling) และไม่คงตัวในทางเคมี เช่น เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเมื่อมีน้ำ

ECA4360 เป็นพอลิเอมีนที่ไม่มีประจุ (non-ionic polyamine) น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1800 สารลดแรงตึงผิวกลุ่มนี้จะทำให้เกิดอิมัลชันที่คงตัวกว่า SPAN80 สามารถละลายในน้ำได้น้อยมาก มีความคงตัวทางเคมีสูง แต่ข้อเสียคือ สามารถเกิดอันตรกิริยากับสารอินทรีย์ และกรดอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงกว่า SPAN80

2. การสกัดและการสไตรป์ (Extraction and stripping)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการนำอิมัลชันที่เตรียมไปสัมผัสกับสารละลายป้อนด้วยเครื่องปั่นกวน (Mixer) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการสกัด และการสไตรป์ โดยปกติแล้วการเตรียมอิมัลชันจะให้สารละลายสไตรป์เป็นวัฏภาคภายใน และสารละลายป้อนเป็นวัฏภาคภายนอก เพื่อเป็นการแยก และเพิ่มความเข้มข้นให้กับตัวถูกละลายที่ต้องการสกัด

3. การแยกวัฏภาค (Settling)

เมื่อการสกัดและการแยกเสร็จสิ้นแล้วจะยุติการกวน เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างร่าฟเฟินต์กับอิมัลชัน หลังจากนั้นจะนำอิมัลชันที่มีตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดไปบำบัดต่อไป ซึ่งโดยส่วนมากเยื่อแผ่นน้ำมัน ชั้นของอิมัลชัน และวัฏภาคภายในที่เบาว่าจะอยู่ชั้นบน ส่วนวัฏภาคภายนอก (ที่ทำการสกัดตัวถูกละลายแล้ว) ที่หนักกว่าจะอยู่ชั้นล่าง

4. การแยกตัวประสาน (Demulsification)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการแตกอิมัลชัน เพื่อนำตัวถูกละลายที่สกัดได้ในสารละลายสไตรป์ไปใช้งาน และเพื่อนำสารละลายเยื่อแผ่นไปใช้ในการเตรียมอิมัลชันขึ้นมาใหม่ การบำบัดแยกตัวประสานมี 2 วิธี คือ การบำบัดทางเคมีด้วยการเติมสารลดตัวประสาน (Demulsifier) วิธีนี้แม้จะมีประสิทธิภาพ แต่ทำให้สมบัติของของเหลวในระบบเปลี่ยนไป ทำให้ไม่สามารถนำสารละลายเยื่อแผ่นมาใช้ได้ใหม่ ส่วนวิธีที่สองคือ การบำบัดทางกายภาพ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง แม่วิธีนี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลง แต่อุปกรณ์มีความยุ่งยาก ราคาแพง และมีอันตราย เพราะขั้นตอนการแยกตัวประสานที่ยุ่งยาก และอาจเกิดปัญหาการรั่วของอิมัลชัน ทำให้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ไม่สามารถพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมได้เท่าที่ควร

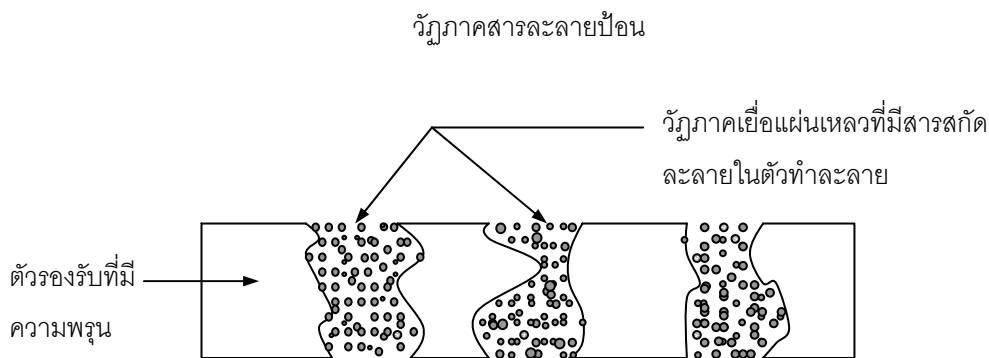
การประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันในอุตสาหกรรมส่วนมากจะเป็นการกำจัด หรือการนำกลับโลหะจากสารละลายป้อน เช่น น้ำเสียจากกระบวนการ น้ำใต้ดิน เป็นต้น การบำบัดด้วยการตกตะกอนทางเคมี การสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือการสกัดด้วยเรซินที่แลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) อาจจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่กระบวนการใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ใช้สารสกัดในปริมาณน้อยจึงสามารถใช้สารสกัดที่มีราคาแพงได้ ตัวอย่างการนำเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ไปใช้งาน เช่น การนำกลับยูเรเนียมจากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกแบบเปียก (Wet-process phosphoric acid) การนำกลับทองแดง การกำจัดซิงค์ซัลเฟตในน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า เป็นต้น (Noble, Koval, and Pellegrino, 1989)

2.1.3.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

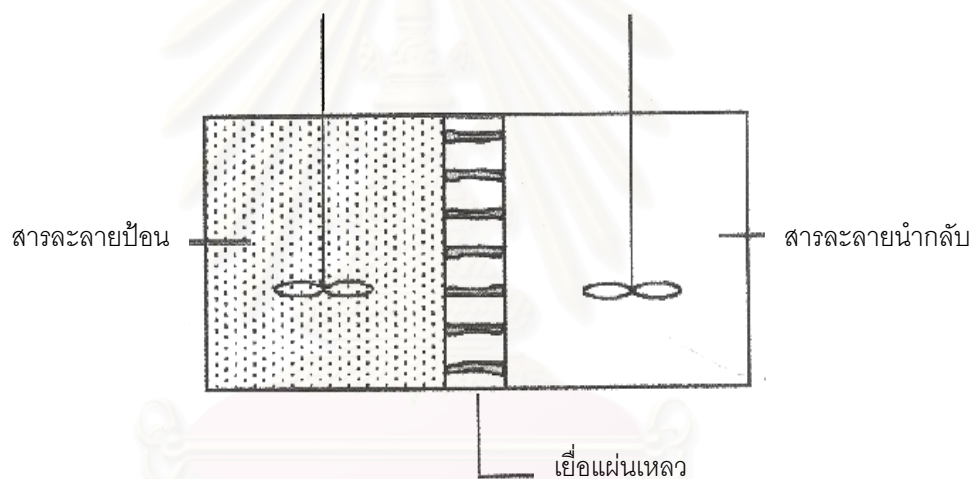
เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้วิญภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดตรึงไว้ภายในรูพรุนของตัวรองรับด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary force) (Marr and Copp, 1982; Schulz, 1988) ซึ่งการยึดตรึงนี้เพื่อไม่ให้เยื่อแผ่นเหลวมีการเคลื่อนที่ และมีความเสถียรมากขึ้น จึงสามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้ว่า “Immobilize Liquid Membrane” (Schulz, 1988) โดยรูพรุนจุลภาคภายในตัวรองรับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic microporous) ซึ่งจะยอมให้วิญภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่ผ่าน หรือถูกยึดตรึงภายในรูพรุนจุลภาคได้เท่านั้น ส่วนอีกชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำมัน (Hydrophobic microporous) จะยอมให้วิญภาคที่มีสารอินทรีย์เป็นตัวทำละลายผ่าน หรือถูกยึดตรึงได้ นอกจากนี้ตัวรองรับสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 3 แบบ คือ ตัวรองรับแบบแผ่นบาง (Flat sheet) ตัวรองรับแบบเกลียววน (Spiral-wound) และตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) ดังนี้

2.1.3.2.1 ตัวรองรับแบบแผ่นบาง

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความพรุน (Porosity) กั้นสารละลายป้อนกับสารละลายสตรีป มักทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิซัลโฟน พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เป็นต้น โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกเคลือบฝัง (Impregnate) ภายในรูพรุนด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electron affinity) และแรงแคปิลลารี ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีลักษณะการดำเนินการแสดงดังรูปที่ 2.9 ข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบางนี้คือ มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย



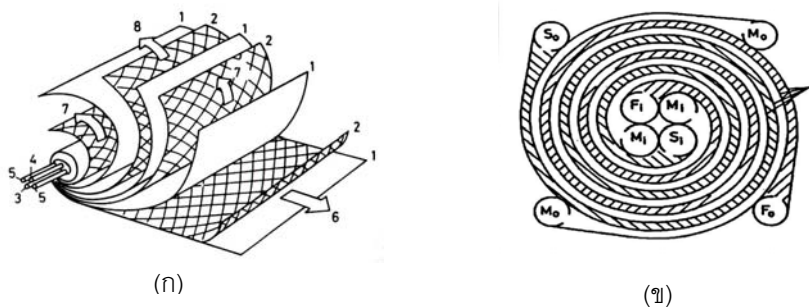
วัฏภาคสารละลายสตรีป
รูปที่ 2.8 ตัวรองรับแบบแผ่นบาง






รูปที่ 2.9 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Kamasawa, Otake, and Yamashita, 1983)

2.1.3.2.2 ตัวรองรับแบบเกลียววน

ลักษณะของตัวรองรับแบบเกลียววนจะคล้ายแบบแผ่นบาง เพียงแต่นำมา้วนให้กระตวัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล โดยสารละลายเอเควีสทั้ง 2 วัฏภาคจะไหลเป็นเกลียวขนานไปกับผิวหน้าของเยื่อแผ่น ซึ่งทำให้แรงจากการไหลของสารละลายทั้งสองไม่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ส่งผลให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานมากขึ้น (Schulz, 1988) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวรองรับแบบเกลียววนโดย (ก) แสดงลักษณะการไหล (1) ตัวรองรับที่มีรูพรุน (2) ตะแกรง (3) ท่อขาเข้าของสารละลายป้อน (4) ท่อขาเข้าของสารละลายสตริป (5) ท่อขาเข้าของสารละลายเยื่อแผ่น (6) เส้นทางกรไหลของสารละลายป้อน (7) เส้นทางกรไหลของสารละลายเยื่อแผ่น (8) เส้นทางกรไหลของสารละลายสตริป (ข) แสดงภาคตัดขวางซึ่ง

-  คือ ช่องของสารละลายป้อน
-  คือ ช่องของสารละลายสตริป
-  คือ ช่องของสารละลายเยื่อแผ่น

H: ตัวรองรับที่มีรูพรุน F_i :ท่อขาเข้าของสารละลายป้อน F_o :ท่อขาออกของสารละลายป้อน S_i :ท่อขาเข้าของสารละลายสตริป S_o :ท่อขาออกของสารละลายสตริป M_i :ท่อขาเข้าของสารละลายเยื่อแผ่น M_o :ท่อขาออกของสารละลายเยื่อแผ่น โดยจะมีตะแกรงกั้นในแต่ละช่อง

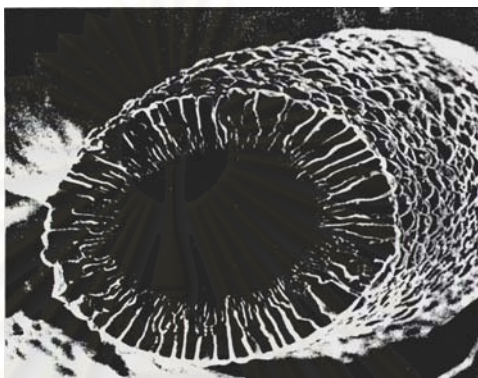
2.1.3.2.3 ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

ตัวรองรับชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นเส้นใยกลวงที่มีความพรุนสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 การนำไปใช้งานจะมัดเส้นใยกลวงหลาย ๆ เส้นรวมกัน โดยปลายของเส้นใยทั้งสองด้านฝังอยู่ในชั้นฐานซึ่งอาจเป็นเรซิน พอลิยูรีเทน หรือยางซิลิโคน ใส่ไว้ในโมดูล (Module) ที่ทำจากอะโครลิก หรือเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตร แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงนี้จะมีค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวรองรับแบบอื่น ๆ ที่มีขนาดเท่ากัน (Baker, 2000)

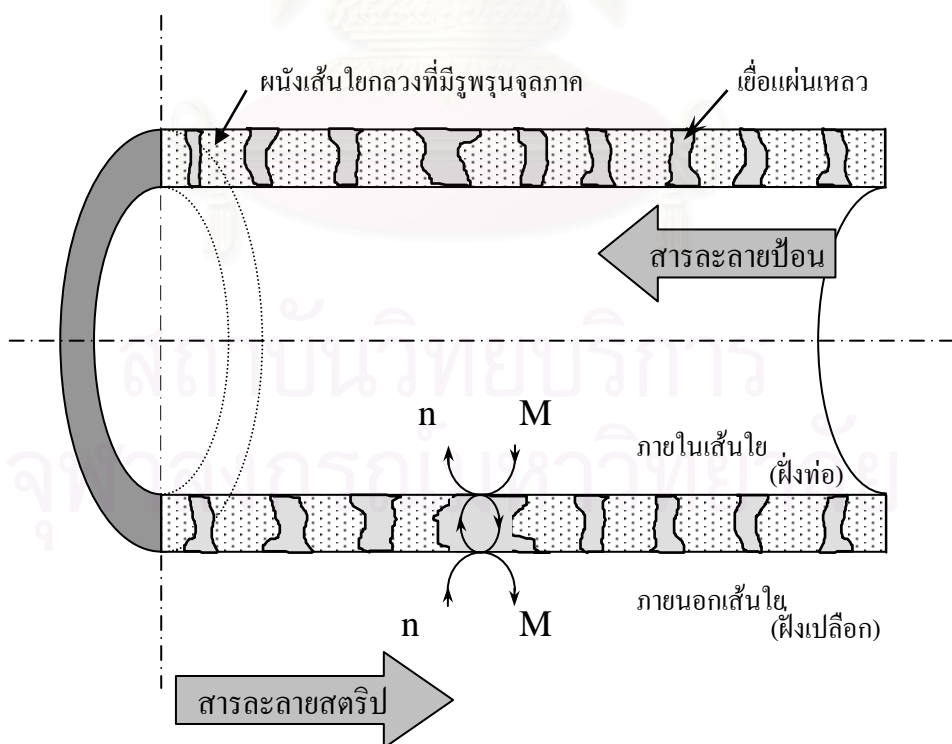
เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับนี้ สมบัติและเสถียรภาพจะขึ้นกับตัวรองรับที่ใช้ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกตัวรองรับให้เหมาะสม โดยจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ความพรุนของตัวรองรับ ควรจะมีความพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลและการสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับสารสกัด

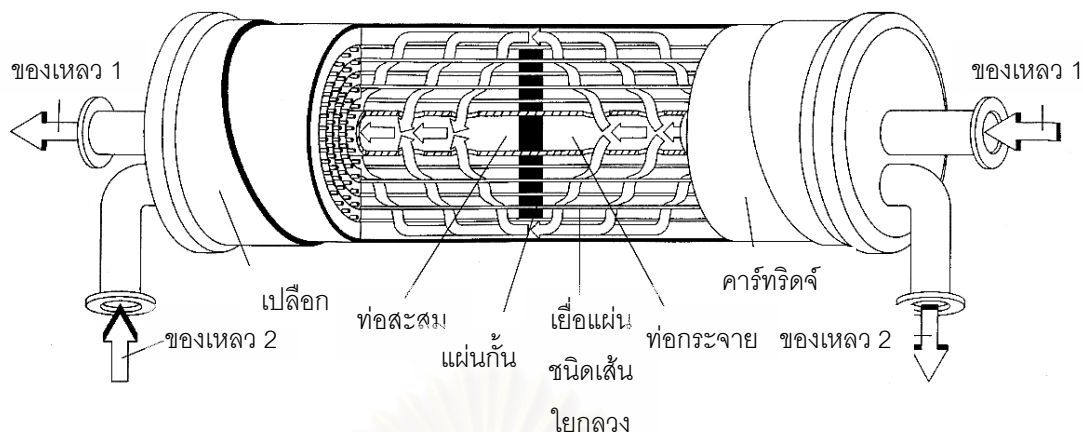
- 2) ความหนา ตัวรองรับควรจะมีบางเพื่อลดความต้านทานการถ่ายเทมวล
- 3) เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ควรจะมีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของแรงแคปิลลารี ทำให้เยื่อแผ่นมีเสถียรภาพ แต่ถ้ารูพรุนเล็กมากเกินไปอาจเกิดการอุดตันได้
- 4) ทนต่อสารเคมีต่างๆ ได้ดี และไม่เกิดการบวม (Swelling)
- 5) ราคาไม่แพง



รูปที่ 2.11 รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง



รูปที่ 2.12 ภาคตัดขวางของเส้นใยกลวงโดยป้อนสารในลักษณะไหลสวนทางกัน



รูปที่ 2.13 โมดูลเส้นใยกลวง

การพิจารณาเลือกใช้ตัวรองรับแบบใดขึ้นอยู่กับเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบกับต้องนำไปประยุกต์ใช้กับสารป้อนประเภทไหน โดยตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวรองรับแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบโมดูลเยื่อแผ่นแบบต่าง ๆ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

สมบัติ	แผ่นบาง	แผ่นเกลียววน	เส้นใยกลวง
พื้นที่ต่อปริมาตร (m^2/m^3)	100-400	300-1000	9000-30000
ฟลักซ์ ($L/m^2 \cdot h$)	10-50	10-50	0.5-5.0
ความกว้างของช่องสารละลาย (mm)	ประมาณ 5	ประมาณ 1.5	0.1-0.5
การเปลี่ยนเยื่อแผ่น	เป็นแผ่น	ทั้งหมด	ทั้งหมด
การเกิดการอุดตัน	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
การทำความสะอาด	ปานกลาง	ปานกลาง	ยากมาก
ราคา	ปานกลาง	ถูก	ถูกมาก

การประยุกต์ใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับจะคล้ายกับชนิดอิมัลชันดังได้กล่าวข้างต้น จากลักษณะของเยื่อแผ่นชนิดอิมัลชันและชนิดที่มีตัวรองรับสามารถเปรียบเทียบข้อดี-ข้อด้อยของชนิดที่มีตัวรองรับเทียบกับชนิดอิมัลชัน ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อด้อยของเยื่อแผ่นเหลวชนิดที่มีตัวรองรับเทียบกับชนิดอิมัลชัน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

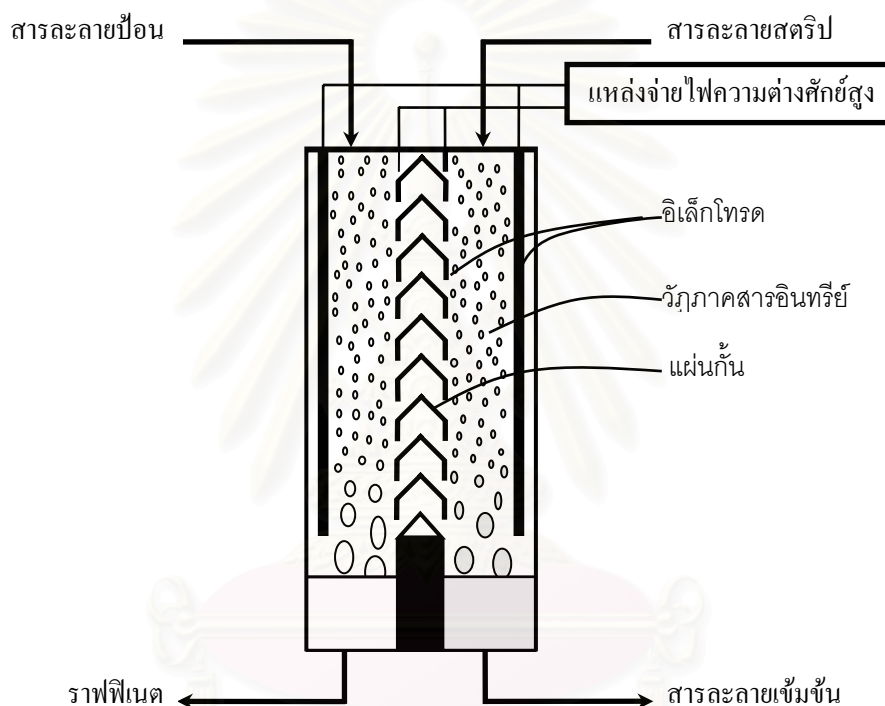
ข้อดี	ข้อด้อย
1) ใช้สารอินทรีย์และสารสกัดในปริมาณน้อย	1) เสียค่าใช้จ่ายสำหรับตัวรองรับ
2) ปราศจากการผสมย้อนกลับ (Back mixing)	2) เกิดความดันลดในกรณีที่ใช้เส้นใยกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย
3) มีการรั่วซึมของวัฏภาคสารอินทรีย์สู่วัฏภาคสารละลายเอเคเวียสต่ำ	3) ต้องการสารละลายป้อนที่สะอาดจึงต้องมีการกรองแยกขั้นต้น (Prefiltration)
4) ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	4) ต้องมีการทำความสะอาดอยู่เสมอ
5) มีเสถียรภาพมากกว่าชนิดอิมัลชัน	5) แรงตึงผิวระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับตัวรองรับต้องมีค่าสูงกว่ากับสารละลายป้อน
6) สามารถประยุกต์ใช้ในการแยกแก๊สได้	

2.1.3.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ คิดค้นโดย Gu และคณะในปี ค.ศ. 1988 (นภกร ธัมพิพิธ, 2542) ซึ่งเป็นการรวมเทคนิคของไฟฟ้าสถิตย์กับหลักการของเยื่อแผ่นเหลวเข้าด้วยกัน เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอื่น คือ ลดการดำเนินการที่ซับซ้อนของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน และมีเสถียรภาพมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ การดำเนินการจะเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์พิเศษดังรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 ในการดำเนินการสารละลายเยื่อแผ่นจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) สารละลายเอเคเวียสทั้งสอง (สารละลายป้อนกับสารละลายสตรีป) จะถูกพ่นเป็นละอองเข้าสู่แต่ละฝั่งของถังปฏิกรณ์ ซึ่งแยกด้วยแผ่นกั้นพลาสติก (Baffle plate) รูปตัววีคว่ำ และร้อยเชื่อมกันด้วยเส้นลวด แผ่นกั้นสามเหลี่ยมปลายแหลมนี้จะทำหน้าที่ป้องกันการไหลข้ามฝั่งของสารละลายเอเคเวียส ในขณะที่เส้นลวดจะทำหน้าที่เป็นสายดิน ข้างถึงด้านในจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟความต่างศักย์สูง เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับสารละลายเอเคเวียสทำให้เกิดการกระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ภายในสารละลายเยื่อแผ่น ปฏิกริยาการสกัดจะเกิดขึ้นรอบ ๆ หยดของสารละลายป้อน สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะจะแพร่ไปสู่ฝั่งของสารละลายสตรีปด้วยความแตกต่างของความเข้มข้น จากนั้นปฏิกริยานำกลับจะเกิดขึ้นที่รอบ ๆ หยดของสารละลายสตรีป

ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบจะมีผลต่อหยดน้ำเท่านั้น เนื่องจากในระบบนี้หยดน้ำจะมีขั้วแต่สารละลายเยื่อแผ่นจะไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อหยดน้ำไหลเข้าสู่แผ่นพลาสติกจะเกิดการรวมตัวเป็นหยดใหญ่ขึ้น เพราะบริเวณดังกล่าวไม่มีกระแสไฟฟ้าทำให้หยดน้ำที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่ถังของมันเป็นด้วยแรงดึงดูดของโลก และเมื่อมาเจอกระแสไฟฟ้าก็จะกระจายเป็นหยดเล็ก ๆ อีกครั้ง เมื่อหยดน้ำที่ตกลงมาจนถึงบริเวณที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าจะรวมตัวเป็นหยดใหญ่ขึ้นตกลงสู่ถังพัก ก่อนที่จะปล่อยออกจากเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.14 การดำเนินการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

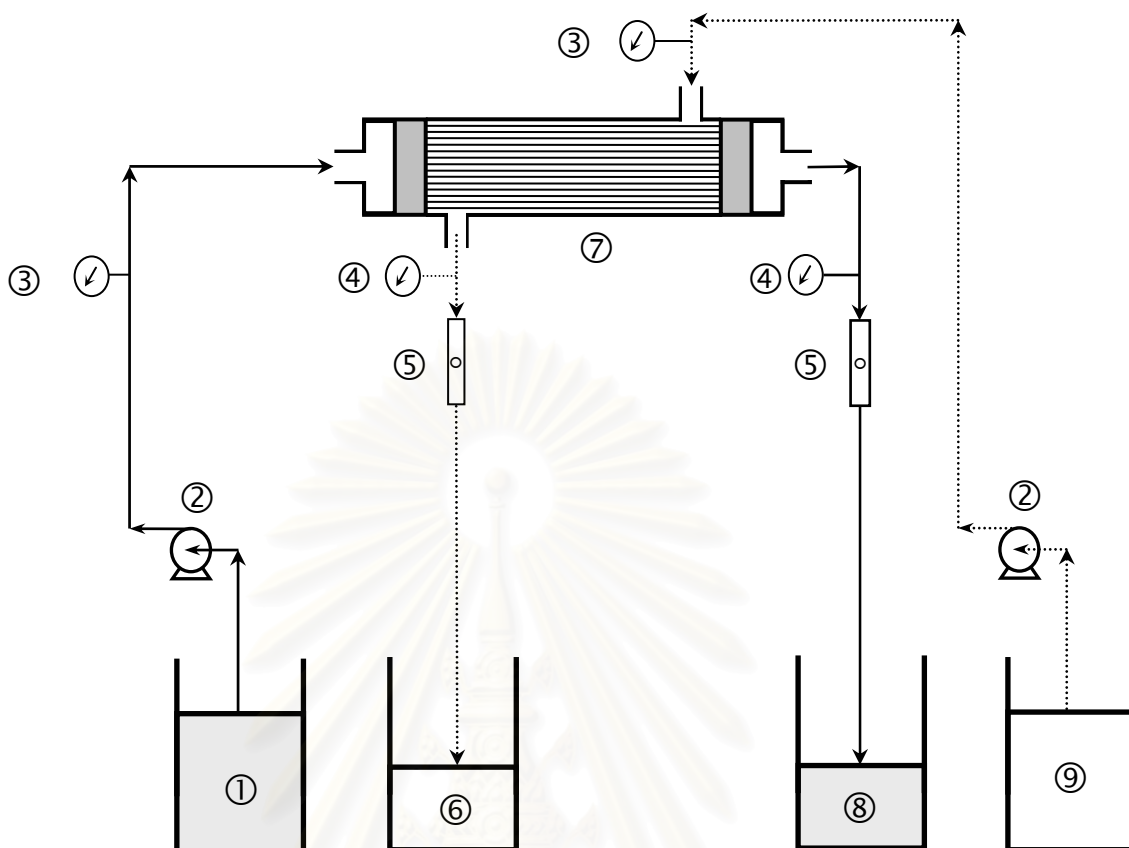
จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาทำให้สามารถเปรียบเทียบข้อดี และข้อด้อยระหว่างกระบวนการสกัด และนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพอง		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> - มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก - มีกำลังการผลิตมาก - มีกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> - ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิวและการกำจัด - ปัญหาการปนเปื้อน - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณสูง - ใช้พลังงานสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพสูง - ไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณต่ำ - ใช้พลังงานต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ - ปัญหาทางด้านอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูง - มีประสิทธิภาพสูงมาก - ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ - ไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีกำลังการผลิตต่ำ - สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ด่ำ - ใช้กับกระบวนการที่สารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น - ปัญหาอันตรายทางด้านไฟฟ้า - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณมาก

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำกลับแพลตฟอร์มโดยเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้สามารถพัฒนานำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้มากกว่าระบบอื่น (Schulz, 1988) โดยอุปกรณ์เส้นใยกลวงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.15

ในการดำเนินการจำเป็นต้องเคลือบฝั่งสารละลายเยื่อแผ่นในรูพรุนของเส้นใยกลวง โดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบหมุนเวียน (Circulate) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (ประมาณ 30 นาที) ซึ่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะซึมเข้าสู่รูพรุนด้วยสัมพรรคภาพระหว่างพอลิเมอร์ กับสารละลายเยื่อแผ่นเหลว และด้วยแรงแคปิลารี จากนั้นล้างสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ภายนอกเส้นใยกลวงออก แล้วเริ่มต้นป้อนสารละลายป้อน และสารละลายสตริปเข้าสู่อุปกรณ์ โดยอาจเป็นลักษณะไหลตามกันหรือไหลสวนทางกันก็ได้ (รูปที่ 2.15 เป็นแบบไหลสวนทางกัน)



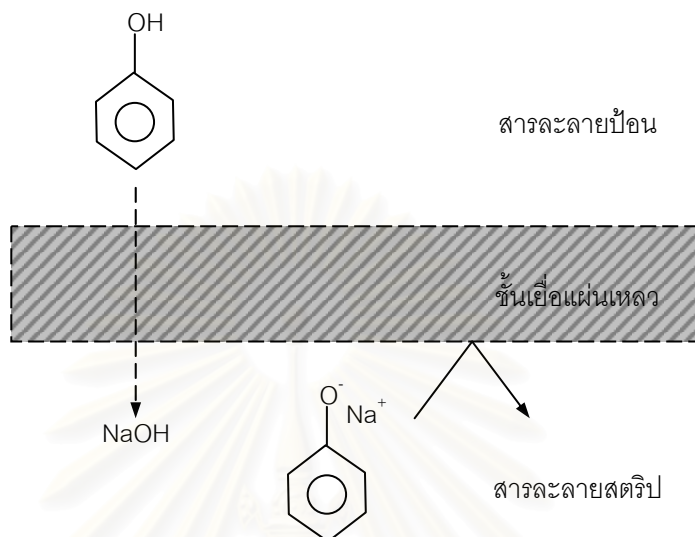
รูปที่ 2.15 การดำเนินงานของอุปกรณ์เส้นใยกลวงที่ใช้ในงานวิจัยโดย (1) ถังสารละลาย ป้อน (2) ปั๊ม (3) เกจวัดความดันขาเข้า (4) เกจวัดความดันขาออก (5) มิเตอร์วัดอัตราการไหล (6) ถังสารละลายเข้มข้น (7) โมดูลเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (8) ถังราฟพิเนต (9) ถังสารละลายสตริป

2.1.4 กลไกการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทมวลในระบบเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบดังนี้

2.1.4.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 1 เรียก Unfacilitated transport ใน กลไกแบบนี้วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวกับตัวทำละลายอินทรีย์ (น้ำมัน) เท่านั้น ไม่มีสารสกัดละลายอยู่ ตัวถูกละลายที่ต้องการสกัด (ปกติไม่มีประจุ) จะสามารถละลาย และแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมาเกิดปฏิกิริยากับสารในวัฏภาคของสารละลายสตริปเกิดเป็น สารใหม่ ซึ่งไม่สามารถแพร่กลับไปในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวได้ การถ่ายเทมวลแบบนี้ขึ้นกับค่าการ

ละลาย หรือค่าการซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวของตัวถูกละลายที่ต้องการ ตัวอย่างการถ่ายเทมวลแบบนี้ได้แก่ การแยกฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16

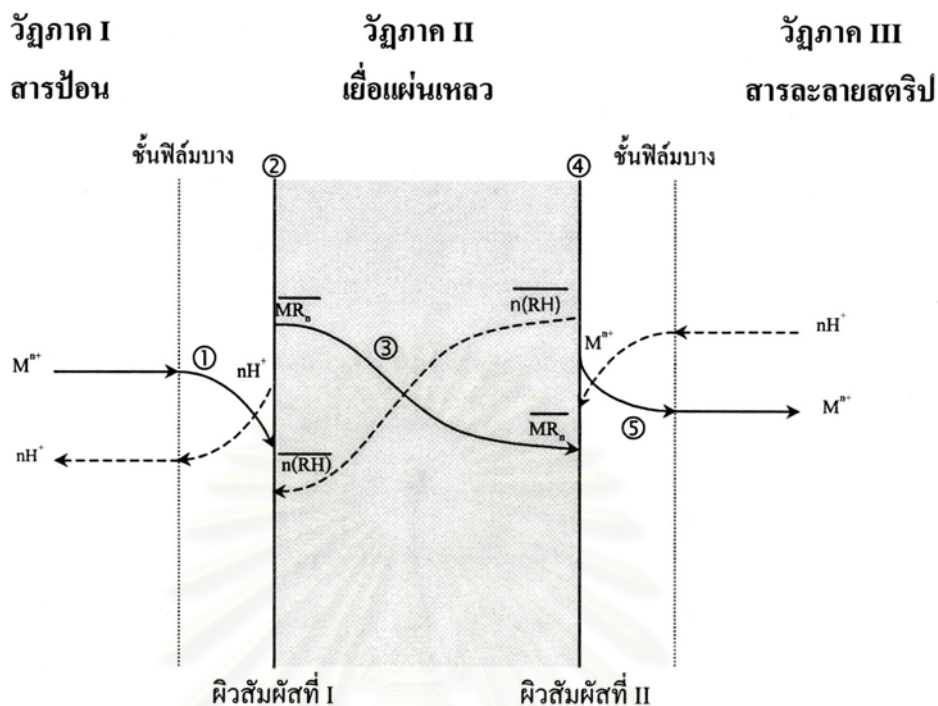


รูปที่ 2.16 การแยกฟีนอลจากน้ำทิ้ง (กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 1) (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

จากรูปที่ 2.16 น้ำทิ้งเป็นสารละลายป้อน ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายสตรีป การแยกเกิดขึ้นโดยฟีนอลในน้ำทิ้งแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโซเดียมฟีนอลเลท ซึ่งไม่ละลายในเยื่อแผ่นเหลว

2.1.4.2 กลไกการถ่ายเทมวลแบบที่ 2 เรียกว่า Facilitated transport เป็นกลไกที่ต้องอาศัยตัวพา หรือสารสกัดที่ละลายอยู่ภายในเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งกลไกแบบที่ 2 นี้จะเกิดการถ่ายเทมวลเร็วกว่าแบบที่ 1 (นภกร รัมพิพิท, 2542; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) การถ่ายเทมวลแบบนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามทิศทางการถ่ายเทดังนี้

2.1.4.2.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-transport) เกิดขึ้นเมื่อไอออนที่ต้องการสกัดมีประจุบวก (M^{n+}) และสารสกัดที่ใช้เป็นกรด (HR) (จะกล่าวถึงชนิดของสารสกัดในส่วนต่อไป) ซึ่งกลไกการสกัดไอออนของโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทาง แสดงดังรูปที่ 2.17

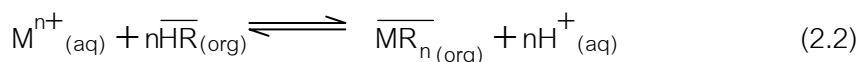


รูปที่ 2.17 กลไกการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทาง เมื่อใช้สารสกัดที่เป็นกรด (วีรวุฒน์ ปัททวิคองคา, 2542)

จากรูปที่ 2.17 แสดงกลไกการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวซึ่งมี 5 ขั้นตอนนั้นคือ

ขั้นตอนที่ 1 ไอออนโลหะจากสารละลายป้อน (M^{n+}) จะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของสารละลายป้อนกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัสที่ I) ด้วยแรงขับเคลื่อนของความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration gradient)

ขั้นตอนที่ 2 ไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสที่ I จะเกิดปฏิกิริยากับสารสกัด (\overline{HR}) ที่ละลายในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (\overline{MR}_n) ที่ผิวสัมผัสที่ I ดังปฏิกิริยา (2.2)



ขั้นตอนที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารสกัดที่เกิดขึ้น ณ ผิวสัมผัสที่ I จะแพร่ผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสที่ II ด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้น

ขั้นตอนที่ 4 สารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวสัมผัสที่ II จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับ และปล่อยไอออนโลหะเข้าไปยังสารละลายสตริปโดยเกิดสารเชิงซ้อนที่เสถียรกับสารสตริป ดังปฏิกิริยาที่ (2.3)



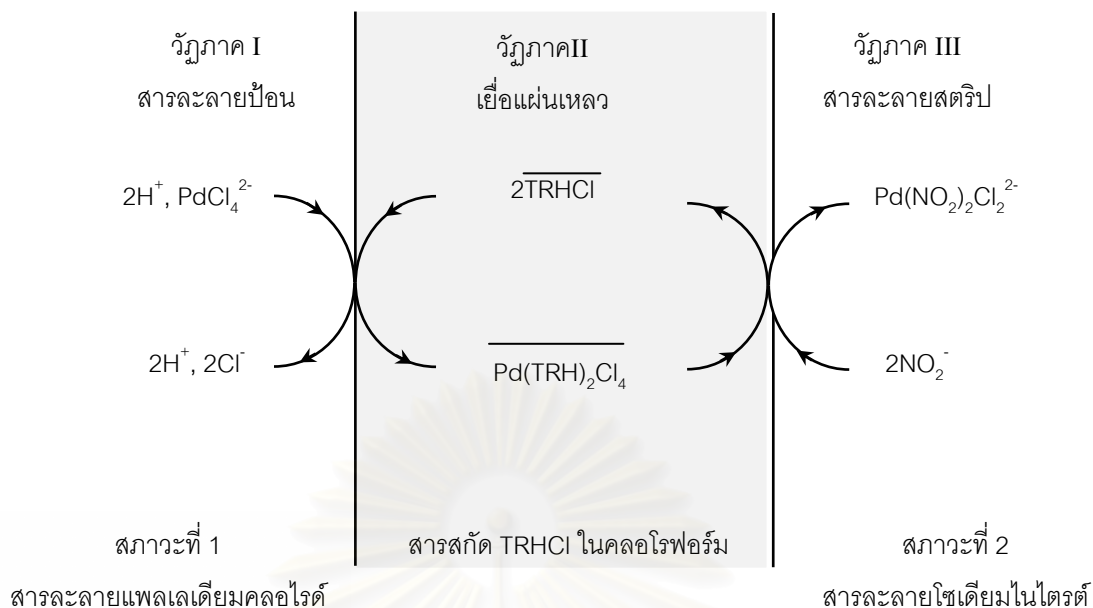
ณ ผิวสัมผัสที่ II นี้ สารสกัดจะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสที่ I ด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้น และจะเกิดปรากฏการณ์เดิมซ้ำไปซ้ำมา

ขั้นตอนที่ 5 ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II จะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่กระแสของสารละลายสตริป ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ถูกสตริปออกมา

นอกจากนี้การถ่ายเทมวลแบบสวนทางสามารถเกิดกับกรณีที่ถูกกลุ่มไอออนโลหะที่ต้องการสกัดมีประจุลบ (A⁻) ส่วนสารสกัดที่ใช้เป็นเบสที่มีการเกิดเกลือ (R₃NHX) และสารสตริปสามารถแตกตัวเป็น X⁻ ซึ่งปฏิกิริยาการสกัด และการนำกลับที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (2.4)



ในงานวิจัยนี้มีกลไกการสกัดและการนำกลับแพลเลเดียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัดไธโอไรดาซีน (Thioridazine•HCl, TRHCl) และกรดโอเลอิก (Oleic acid, OA) ละลายอยู่ ซึ่งมีกลไกการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันเมื่อใช้สารสกัดเป็นเบสที่มีการเกิดเกลือ (TRHCl) และสารสตริปเป็นโซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) แสดงดังรูปที่ 2.18



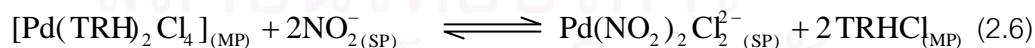
รูปที่ 2.18 กลไกการถ่ายเทไอออนแพลเลเดียมในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่ศึกษา

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป็นดังนี้

TRHCl ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับ PdCl_4^{2-} เกิดเป็นสารเชิงซ้อนในรูป ML_2X_4 (Farhadi and Shamdipur, 2000)



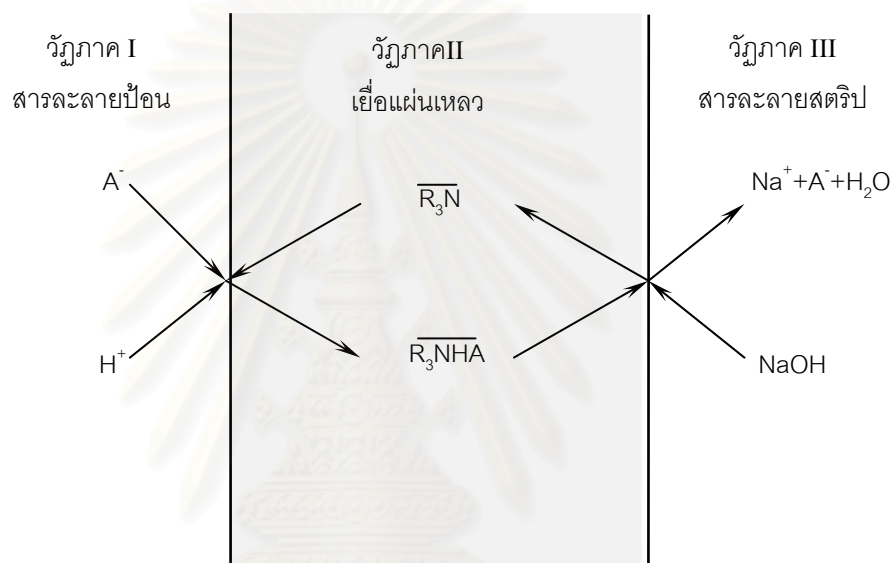
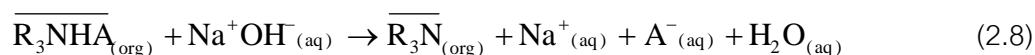
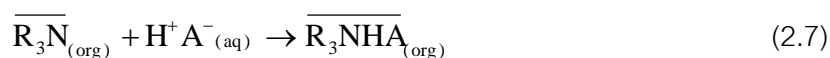
ไอออนไนไตรต์ในสารละลายสตรีปจะทำปฏิกิริยากับ $[\text{Pd}(\text{TRH})_2\text{Cl}_4]_{(\text{MP})}$ เพื่อสตรีปแพลเลเดียมเข้าไปในวัฏภาคของสารละลายสตรีป



2.1.4.2.2 การถ่ายเทแบบทางเดียวกัน (Co-transport) การถ่ายเท

แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดที่เป็นเบส (R_3N) และสารละลายสตรีปเป็นเบสเช่นกัน (NaOH) โดยกลุ่มไอออนลบของโลหะ (A^-) และไฮโดรเนียมไอออน (H^+) จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.19 ในการเกิดปฏิกิริยาไอออนของโลหะที่อยู่ในรูป H^+A^- ซึ่งละลายอยู่ในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด R_3N ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน R_3NHA แพร่ผ่าน

เยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น และจะทำปฏิกิริยาน่ากลับกับสารละลาย สตรีป NaOH ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)



รูปที่ 2.19 กลไกการถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน (รัตน จิระรัตนานนท์, 2543)

2.2 ชนิดของสารสกัด

ไอออนของสารสกัดที่ต้องการสกัดอาจอยู่ในรูปของแคทไอออน แอนไอออน หรือเป็นกลาง เพื่อที่จะทำให้ไอออนสามารถถ่ายเทไปยังตัวทำละลายอินทรีย์ภายในเยื่อแผ่นเหลวจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปแบบของไอออนเหล่านี้ ซึ่งตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนมากมีพันธะโควาเลนต์ รูปแบบที่จะทำให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้มี 2 วิธีด้วยกัน คือ การทำประจุของไอออนให้เป็นกลาง (Charge neutralization) และการแทนที่โมเลกุลของน้ำที่เป็นโซลเวทด้วยลิแกนด์ที่มีพันธะโควาเลนต์ สารที่ทำหน้าที่ทั้งสองนี้เรียก “สารสกัด” โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบได้ดังนี้ (Tavlarides et al., 1987)

2.2.1 สารสกัดที่เป็นกรด (Acidic extractants)

สารสกัดประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ สารสกัดที่เป็นกรด และสารสกัดที่เป็นคีเลท (Chelating extractants) สารสกัดกลุ่มแรกประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $>\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ เป็นต้น ส่วนสารสกัดกลุ่มหลังจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการที่ (2.9)



ซึ่งเครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ (เยื่อแผ่นเหลว) นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ดังนั้นความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายเอเคเวียส นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น

สารสกัดที่เป็นกรดที่มีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดที่เป็นกรดนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) มีการนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acids, D2EHPA) ซึ่งข้อดีของสารสกัด D2EHPA นี้คือ มีเสถียรภาพทางเคมี การสกัดมีจลนศาสตร์ที่ดี สามารถสกัด และนำกลับได้ง่าย ค่าการละลายในวัฏภาคสารละลายเอเคเวียสมีค่าต่ำ สามารถสกัดไอออนโลหะได้หลายชนิด นอกจากนี้ยังสามารถหาได้ง่ายในทางการค้าด้วย

สารสกัดที่เป็นคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยกลุ่มดอนเนอร์ (Donor groups) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดที่เป็นคีเลทในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ (ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกไซม์ (2-hydroxy benzophenone oximes) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่

ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline) แต่ข้อด้อยของสารสกัดที่เป็นคีเลทคือ เมื่อใช้ในสารละลายที่เป็นกรดจะมีจลนศาสตร์ที่ช้า

2.2.2 สารสกัดที่เป็นด่าง (Basic extractants)

สารสกัดที่เป็นด่าง หรือ Anion exchangers เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นเกลือได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดประเภทนี้ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุรภูมิ (Quaternary ammonium halides) ได้มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salts) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NH) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และชนิดจตุรภูมิ (Quaternary, R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายเอควียสเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน ดังสมการที่ (2.10)

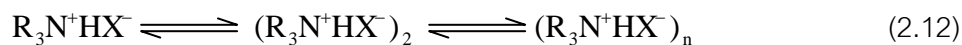


เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นได้ เอมีนจะต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม เพื่อแลกเปลี่ยนประจุลบกับไอออนโลหะดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเปลี่ยนเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ $\text{R}_3\text{NH}^+\text{A}^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายเอควียสที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ A^{n-} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ (2.10) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวทำละลาย และธรรมชาติของ

แอมโมเนียมที่มีประจุบวก และประจุลบ ซึ่งการรวมตัวจะทำให้เกิดวัฏภาคที่สาม ดังสมการที่ (2.12)

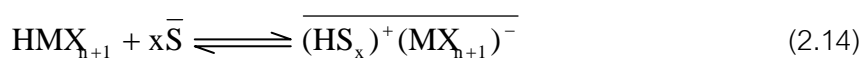


การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) ได้แก่ พวกลิพิดฟอสโฟลิดที่มีสายโซ่ยาว เช่น โดเดคานอล เป็นต้น

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการสกัดโลหะด้วยเอมีนคือ ธรรมชาติของสายโซ่คาร์บอน และจำนวนอะตอมคาร์บอนในสายโซ่ ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของเอมีนจะอยู่ในช่วง 250-600 แต่ปกติที่ใช้กันจะอยู่ในช่วง 250-400 (ถ้าน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 250 เอมีนมีแนวโน้มสามารถละลายในน้ำได้ ส่วนถ้าน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 600 เอมีนสามารถละลายในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ได้มาก) โดยทั่วไปแล้วลิวทิกเอมีนนำมาใช้เป็นสารสกัดได้ดีที่สุด

2.2.3 สารสกัดที่เป็นโซลเวท (Solvating extractants)

สารสกัดที่เป็นโซลเวท หรือสารสกัดที่เป็นกลาง เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะกลุ่มดอนเนอร์จึงไม่สามารถแตกโปรตรอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไฮดรอกซิลที่มีประจุบวกหรือไฮดรอกซิลที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไฮดรอกซิลในวัฏภาคของสารละลายเอควิวสจะถูกลักโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไฮดรอกซิลในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายเอควิวสเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดที่เป็นต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมกลางของสารประกอบเชิงซ้อน หรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ



เมื่อ S คือสารสกัดที่เป็นไซลเวท จากสมการข้างต้นพบว่าความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้ โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดที่เป็นไซลเวท

สารสกัดที่เป็นไซลเวทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยพันธะระหว่างออกซิเจน และคาร์บอน เช่น อีเทอร์ เอสเทอร์ แอลกอฮอล์ และคีโตน ส่วนอีกกลุ่มประกอบด้วยพันธะระหว่างออกซิเจนหรือซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัส เช่น อัลคิลฟอสเฟต หรือ อัลคิลไฮโอฟอสเฟต เป็นต้น

2.3 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction)

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) หมายถึง การสกัดแยกไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกัน ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงกว่าผลรวมของประสิทธิภาพการสกัดเมื่อใช้สารสกัดแต่ละชนิดแยกกันสกัด (Mathur, 1983) ซึ่งการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นี้เริ่มแรกได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพื่อการนำกลับไอออนของโลหะมีค่า เนื่องจากมีนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์มาตั้งแต่ ค.ศ.1970 ทำให้มีการนำสารสกัดหลายชนิดมาผสมกัน จึงจำเป็นที่จะต้องแยกประเภทของสารที่นำมาผสม ซึ่ง Healy (Healy's classification) (Healy, 1975) ได้เสนอไว้ดังนี้

- (1) สารสกัดที่เป็นกรดผสมกับสารสกัดที่เป็นกลาง โดยสารสกัดที่เป็นกรด ได้แก่ β -diketone หรือ สารสกัดกลุ่มคีเลท เช่น salicylaldoxime หรือ phosphoric acid carboxylic acid และ sulfonic acid เป็นต้น
- (2) สารสกัดที่เป็นกรด 2 ชนิดผสมกัน ส่วนมากจะเป็น β -diketone 2 ชนิด หรือ กรดอินทรีย์ 2 ชนิดผสมกัน
- (3) สารสกัดที่เป็นกลาง 2 ชนิดผสมกัน ได้แก่ การผสมกันของสารสกัด organo-phosphorus สารสกัด sulfoxides หรือที่เรียก "inert diluents"
- (4) สารสกัดที่เป็นเบสผสมกับสารสกัดที่เป็นกลาง โดยเฉพาะการผสมกันของเกลือเอมีนกับอนุพันธ์ของฟอสฟอรัส
- (5) สารสกัดที่เป็นเบสผสมกับสารสกัดที่เป็นกรด เป็นการผสมกันของเกลือเอมีนกับสารประกอบที่เป็นกรด

- (6) สารสกัดที่เป็นเบส 2 ชนิดผสมกัน เช่น เกลือของเอมีน 2 ชนิดผสมกัน แต่ระบบนี้มีผู้ทำการศึกษาไม่มากนัก

ในงานวิจัยนี้ใช้สารสกัดผสมระหว่างไฮโดรไลซิสกับกรดโอเลอิก ซึ่งจัดอยู่ในประเภทที่ 5 ของ Healy คือ สารสกัดไฮโดรไลซิสเป็นสารสกัดที่เป็นเบส (เกลือของเอมีน) ผสมกับกรดโอเลอิก ซึ่งเป็นสารสกัดที่เป็นกรด

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์นี้ไม่ใช่การนำสารสกัดสองชนิดมาผสมกันแล้วจะเกิดการสกัดที่ดีขึ้นได้ แต่ต้องขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) ซึ่ง Taube และ Siekierski (Taube and Siekierski, 1961) ได้นิยามไว้ดังนี้

$$S.C. = \log \frac{D_{(1,2)}}{D_{(1)} + D_{(2)}} \quad (2.15)$$

ซึ่ง $D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) ระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย

ป้อนเอควิวสและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ 1

$D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) ระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย

ป้อนเอควิวสและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ 2

$D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) ระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย

ป้อนเอควิวสและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เมื่อใช้สารสกัดทั้งสองชนิดผสมกัน

ถ้าค่า S.C. มีค่ามากกว่า 0 หมายความว่าเมื่อผสมสารสกัดทั้งสองชนิดจะเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ แต่ถ้าค่า S.C. มีค่าน้อยกว่า 0 หมายความว่าเมื่อผสมสารสกัดทั้งสองชนิดจะทำให้เกิดการสกัดได้น้อยลงเรียก "Antagonistic extraction" ดังนั้นในการผสมสารสกัดเพื่อให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงชนิดของสารสกัด และความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกัน

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งขั้นตอน และวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษากลับแพลตฟอร์มเดิมจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

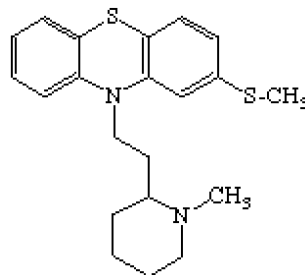
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 3.1 โดยสารละลายป้อน คือ กรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้วได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด ซึ่งมีโลหะที่ทำการศึกษาได้แก่ แพลเลเดียม พลาตินัม ทอง และทองแดง ส่วนน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออนในเซชัน 2 รอบ (Doubly deionized water) จะนำมาใช้ตลอดการทดลอง สารเคมีที่ใช้มีระดับคุณภาพระดับ A.R. (Analytical reagent grade) ดังตารางที่ 3.1

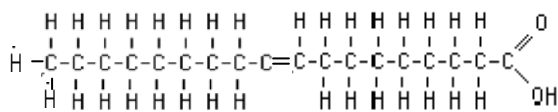
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล	บริษัท
กรดในสารละลายป้อน	ไฮโดรคลอริก	HCl	36.46	LAB-SCAN
เบสในสารละลายป้อน	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	40.00	MERCK
สารสกัด	ไฮโอไรดาซีน	$C_{21}H_{26}N_2S_2 \cdot HCl$	407.00	SIGMA
	กรดโอเลอิก	$CH_3(CH_2)_7CHCH(CH_2)_7COOH$	282.45	CARLO ERBA
ตัวทำละลายอินทรีย์	คลอโรฟอร์ม	$CHCl_3$	119.38	APS Chemical Limited
สารสตริป	โซเดียมไนไตรต์	$NaNO_2$	69.00	APS Chemical Limited

สารสกัดที่ใช้ทั้ง 2 ชนิดมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



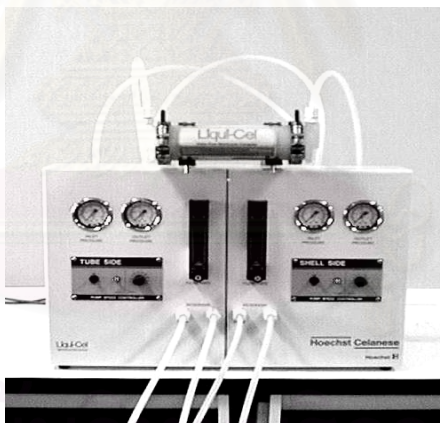
รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัดไฮโอไรดาซีน



รูปที่ 3.2 สูตรโครงสร้างของสารสกัดกรดโอเลอิก

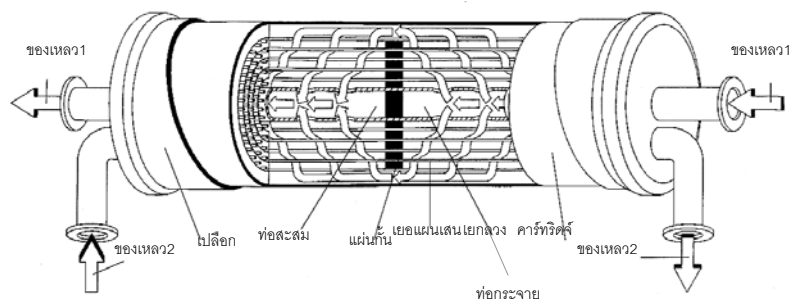
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat.#5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ซึ่งประกอบด้วย เครื่องสูบลม ชุดควบคุมความเร็ว มาตรฐานอัตราการไหล และมาตรฐานความดัน อย่างละ 2 ชุด เพื่อใช้ในฝั่งท่อ และฝั่งเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

3.2.2 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง Celgard[®]x-30 240 Micropore Polypropylene Hollow Fiber แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 ลักษณะของโมดูลเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวรองรับเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	มิติ
วัสดุเส้นใยกลาง	โพลีโพรไพลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลาง	30 %
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 Kg/cm ² (60 psi)
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² /m ³)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการ	1°c ถึง 60°c
ขนาดของเปลือก (เส้นผ่านศูนย์กลาง×ยาว)	8×28 cm (2.5×8 inch)

บริษัท Jenco

3.2.4 เครื่องอะตอมมิคสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ AA SPECTRAA รุ่น TENPLUS ระบบ Single Beam ของบริษัท Varian® (หลักการของเครื่องอะตอมมิคสเปคโตรโฟโตมิเตอร์อธิบายในภาคผนวก ง)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดไธโอไรดาซีน (Thioridazine•HCl, TRHCl) ต่อการสกัด และนำกลับแพลงก์ตอนจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด TRHCl ความเข้มข้น 0.000125 โมลาร์ กับสารสกัดกรดโอเลอิก (Oleic acid, OA) ความเข้มข้น 0.050 โมลาร์ ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝั่งภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

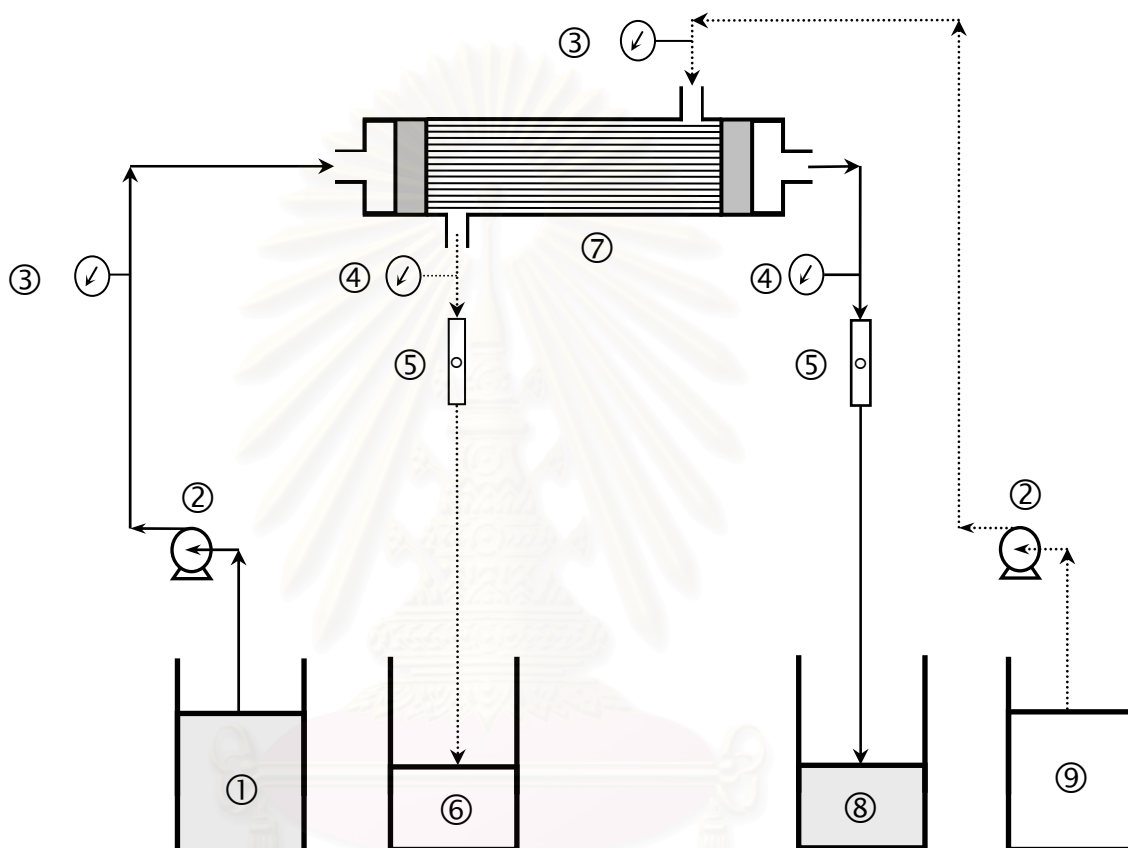
(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสูญญากาศ (Vacuum filter) ด้วยกระดาษกรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อนอิ่มตัว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน (ค่าการละลายของคลอโรฟอร์มในน้ำเท่ากับ 0.8 ส่วนในน้ำ 100 ส่วน) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตริป ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิ่มตัวเช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อนสารละลายสตริปทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออก เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลงก์ตอนพลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

(7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI เป็น 0.00025, 0.0005, 0.00075 และ 0.001 โมลาร์



รูปที่ 3.5 ลักษณะการปฏิบัติการ โดยที่ ① ถังของสารป้อนขาเข้า, ② ปั๊มสุบ, ③ เกจวัดความดันขาเข้า, ④ เกจวัดความดันขาออก, ⑤ มาตรวัดอัตราการไหล, ⑥ ถังของสารละลายสตริปขาออก, ⑦ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง, ⑧ ถังของสารป้อนขาออก, ⑨ ถังของสารละลายสตริปขาเข้า

3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิก (Oleic acid, OA) ต่อการสกัด และนำกลับแพลงก์ตอนจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด TRHCI ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัดกรดโอเลอิกความเข้มข้น 0.000 โมลาร์ ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝังภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอริจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสุญญากาศด้วยกระดาษกรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อนอิมมัตว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตริป ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิมมัตวเช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อนสารละลายสตริปทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออก เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลงก์ตอนพลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด OA เป็น 0.025, 0.050, 0.075, 0.250, 0.375 และ 0.500 โมลาร์

3.3.3 การศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และ
 นักกลับแพลงเลเดียมจากกรดกัดทองไปแล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มี
 ขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด
 TRHCI ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัด OA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ละลายในตัวทำ
 ละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่ง
 ท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝังภายใน
 รูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว
 (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสุญญากาศด้วยกระดาษ
 กรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออ
 ไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อน
 อิ่มตัว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง
 ให้มีค่า 0.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น
 เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตริป ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความ
 เข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิ่มตัว
 เช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อน
 สารละลายสตริปทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว
 อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลา
 ผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออก เพื่อนำไป
 วิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลงเลเดียม
 พลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลาย
 ป้อนให้มีค่า 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.2

3.3.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสตริบโซเดียมไนไตรต์ (Sodiumnitrite, NaNO_2) ต่อการสกัด และนำกลับแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด TRHCI ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัดกรดโอเลอิก OA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่ง ท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝั่งภายใน รูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสุญญากาศด้วยกระดาษ กรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อน อิมิตัว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้มีค่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตริบ ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความเข้มข้น 0.00 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิมิตัว เช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตริบเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อน สารละลายสตริบทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลา ผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริบขาออก เพื่อนำไป วิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลเลเดียม พลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารโซเดียมไนไตรต์ เป็น 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมลาร์

3.3.5 การศึกษาผลอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสตรีปต่อการสกัด และนำกลับแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด TRHCI ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัดกรดโอเลอิก OA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝังภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสุญญากาศด้วยกระดาษกรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อนอิมิตัว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตรีป ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิมิตัวเช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตรีปเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อนสารละลายสตรีปทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตรีปขาออก เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลเลเดียม พลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 150, 200 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที

3.3.6 การศึกษาผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัด และ
 นักกลับแพลงก์ตอนจากกรดกัดทองไว้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มี
 ขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) เตรียมสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมการสกัด
 TRHCI ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัดกรดโอเลอิก OA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์
 ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มให้มีปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน

(2) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่ง
 ท่อ และฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเคลือบฝังภายใน
 รูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

(3) เตรียมสารละลายป้อน ซึ่งเป็นกรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว
 (จากบริษัท เกรทเทสต์โกลด์แอนรีไฟเนอรีจำกัด) โดยนำไปกรองผ่านสุญญากาศด้วยกระดาษ
 กรองของ Whatman เบอร์ 42 จากนั้นนำไปเจือจาง 100 เท่า ด้วยน้ำที่ผ่านกระบวนการดีไอออ
 ไนเซชัน 2 รอบ ให้มีปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร ให้สารละลายป้อน
 อิมิตัว เพื่อป้องกันสารละลายเยื่อแผ่นเหลวละลายในสารละลายป้อน ปรับค่าความเป็นกรด-
 ด่างให้มีค่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อน
 เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(4) เตรียมสารละลายสตริป ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนไตรต์ในน้ำให้มีความ
 เข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 5 ลิตร เติมคลอโรฟอร์มปริมาตร 40 มิลลิลิตร เพื่อให้อิมิตัว
 เช่นเดียวกัน เก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์โลหะ

(5) ป้อนสารละลายป้อนทางฝั่งท่อของโมดูลเส้นใยกลวงพร้อมกับป้อน
 สารละลายสตริปทางฝั่งเปลือก ในลักษณะสวนทางกัน และไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงครั้งเดียว
 อัตราการไหลทั้งสองฝั่งคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อเวลา
 ผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออก เพื่อนำไป
 วิเคราะห์โลหะ

(6) นำตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแพลงก์ตอน
 พลาทินัม ทองคำ และเงิน ด้วยเครื่องอะตอมมิกสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

(7) นำสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออกมาป้อนเข้าโมดูล
 เส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวนทางกัน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขา
 ออก (รอบที่ 2) และสารละลายสตริปขาออก (รอบที่ 2) ไปวิเคราะห์โลหะ

(8) ทำซ้ำข้อ (7) จะได้ตัวอย่างของสารละลายป้อนขาออก (รอบที่ 3) และสารละลายสตรีปขาออก (รอบที่ 3) นำไปวิเคราะห์หาโลหะ เพื่อคำนวณค่าร้อยละการสกัดสะสม และร้อยละการนำกลับสะสม



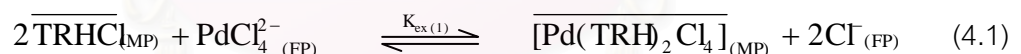
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัด และนำกลับแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ผลของความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีน (Thioridazine•HCl, TRHCl) และสารสกัดกรดโอเลอิก (Oleic acid, OA) ผลของความเข้มข้นต่างในสารละลายป้อน ผลของความเข้มข้นของสารละลายสไตริโซเดียมไนไตรด์ ผลของอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสไตริโซ และผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสารประกอบฟีนโธธาซีน (Phenothiazine compounds) สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกับไอออนแพลเลเดียม Pd(II) ในตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ (Deshmukh and Kharat, 1976; Gowda and Padmaji, 1978; Gowda, Vallabhaneni, and Ananda, 1997) ซึ่งเกิดอันตรกิริยา (Interaction) โดยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ระหว่างอะตอมของคลอรีนในไอออนเชิงซ้อนของแพลเลเดียม (PdCl_4^{2-}) และอะตอมของ protonated nitrogen ของสารสกัดไฮโอไรดาซีน กระบวนการสกัดของไอออนแพลเลเดียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัดไฮโอไรดาซีนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนี้



โดยค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้เป็นดังนี้

$$K_{\text{ex}(1)} = \frac{[\overline{[\text{Pd}(\text{TRH})_2 \text{Cl}_4]}][\text{Cl}^-]^2}{[\overline{\text{TRHCl}}]^2 [\text{PdCl}_4^{2-}]} \quad (4.2)$$

4.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีน (TRHCl) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl ต่อการสกัด และนำกลับไอออนแพลเลเดียมทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl ในสารละลายคลอโรฟอร์มให้มีค่าต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.000125, 0.000250, 0.000500, 0.000750 และ 0.001000

โมลาร์ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดโอเลอิกในคลอโรฟอร์มเท่ากับ 0.05 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายสไตรีนไซเคียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนมีค่า 2 อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสไตรีนไซเคียมเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

จากผลการทดลองที่ได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงดังนี้

1. ความเข้มข้นของ TRHCl ในช่วง 0.000125-0.000500 โมลาร์ จากรูปที่ 4.1 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl จะทำให้สามารถสกัดไอออนโลหะได้มากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัด TRHCl ดังนี้

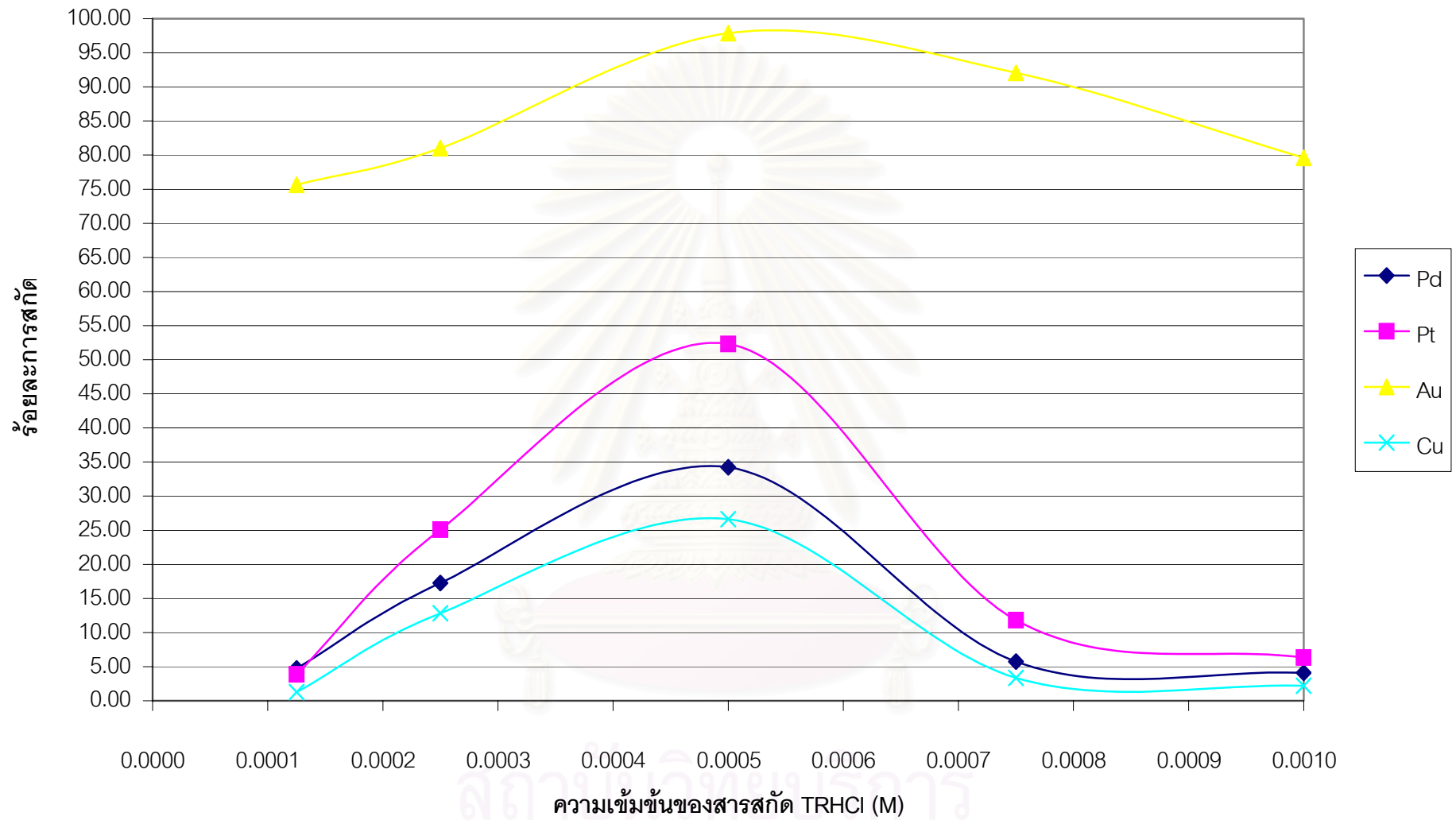


เมื่อ MCl_2^{n-} แทน PdCl_4^{2-} , PtCl_6^{2-} , AuCl_4^- และ CuCl_4^{2-}

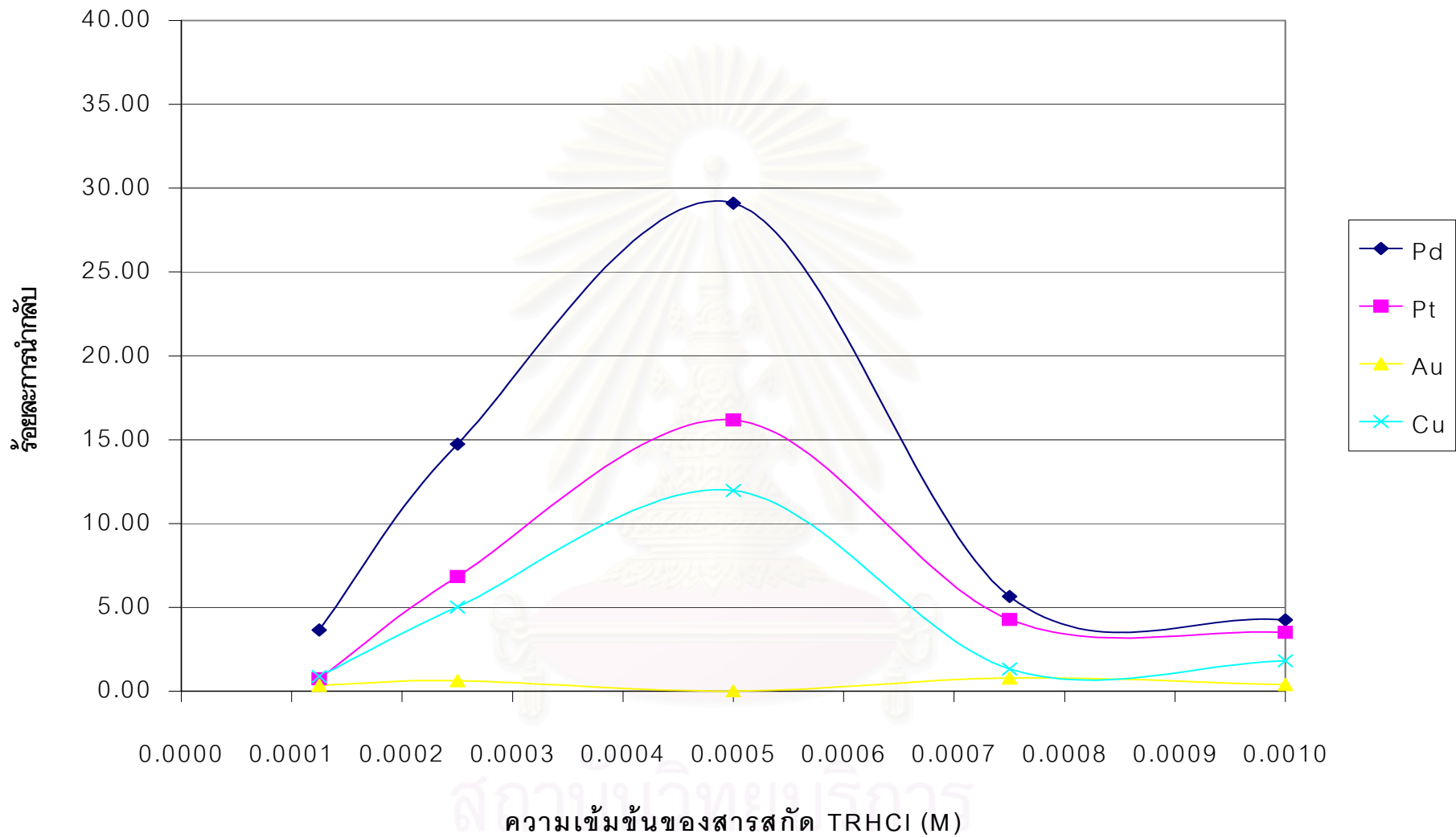
จากสมการที่ (4.3) แสดงให้เห็นว่า เมื่อสารสกัด TRHCl (ซึ่งเป็นสารสกัดที่เป็นเบสสามารถสกัดไอออนโลหะที่มีประจุลบได้) มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นตามหลักของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยอร์ (Henry Louis Le Chatelier) และทำให้สกัดไอออนโลหะได้มากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl ในช่วงนี้สามารถสกัดไอออนโลหะเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ $\text{Au(III)} > \text{Pt(II)} > \text{Pd(II)} > \text{Cu(II)}$ เนื่องจากไอออนทองสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก TRHCl เพียง 1 โมล (AuCl_4^- มีประจุลบ 1) ต่างกับไอออนของโลหะชนิดอื่นที่ต้องเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก TRHCl 2 โมล (PdCl_4^{2-} , PtCl_6^{2-} และ CuCl_4^{2-} มีประจุลบ 2) ทำให้สามารถสกัดไอออนทองได้มากกว่าไอออนโลหะอื่น ๆ ส่วนลำดับการสกัดไอออนชนิดอื่นสามารถอธิบายโดยใช้สมการปฏิกิริยาของสารสกัดหลัก TRHCl ผสมกับสารสกัด OA ที่ช่วยสกัด ดังสมการที่ (4.4)



เมื่อนำสมการที่ (4.4) - (4.3) จะได้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl กับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$
อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl กับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$
อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



ซึ่งค่า $\beta_{n,x}$ หมายถึงค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว โดยค่า $\beta_{n,x}$ นี้จะมีค่าน้อยเมื่อรัศมีไอออนิกของไอออนโลหะน้อย (Farbu, Alstad, and Auguston, 1974, cited in Duychaerts and Desreux, 1997; Mathur, 1983) เนื่องจากรัศมีไอออนิกของพลาทินัมมีค่ามากกว่าแพลเลเดียม และทองแดง (รัศมีไอออนิกของพลาทินัม แพลเลเดียม และทองแดง มีค่า 177×10^{-12} , 169×10^{-12} และ 145×10^{-12} เมตร ตามลำดับ) ทำให้ค่า $\beta_{n,x}$ ของ $\text{Pt} > \text{Pd} > \text{Cu}$ จึงสามารถสกัดไอออนพลาทินัมได้มากกว่าแพลเลเดียม และทองแดงนั่นเอง

เมื่อพิจารณาในส่วนของการนำกลับในช่วงสารสกัด TRHCl มีความเข้มข้น 0.000125 โมลาร์ ถึง 0.0005 โมลาร์ จากรูปที่ 4.2 พบว่าสามารถนำกลับไอออน $\text{Pd} > \text{Pt} > \text{Cu}$ ส่วนไอออนทองแทบจะไม่สามารถนำกลับได้เลย เนื่องจากไอออนแพลเลเดียมสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายสตริบโซเดียมไนไตรต์ได้ดีกว่าไอออนอื่นดังสมการที่ (4.6) (Farhadi and Shamsipur, 2000)



เมื่อ $M(\text{TRH})_n \text{Cl}_z$ คือ $\text{Pd}(\text{TRH})_2 \text{Cl}_4$, $\text{Pt}(\text{TRH})_2 \text{Cl}_6$ และ $\text{Cu}(\text{TRH})_2 \text{Cl}_4$ ส่วนไอออนทองแทบไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายสตริบโซเดียมไนไตรต์ได้จึงไม่สามารถนำกลับได้ โดยความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl มีค่า 0.0005 โมลาร์ จะสามารถนำกลับแพลเลเดียมได้ประมาณร้อยละ 30 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุด และให้ค่าความแตกต่างของการนำกลับ เมื่อเทียบกับไอออนพลาทินัม ทอง และทองแดง เท่ากับ 12.93, 29.10 และ 17.12 ตามลำดับ (คิดจากร้อยละการนำกลับของแพลเลเดียมลบด้วยร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะอื่น ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl ค่าหนึ่ง ๆ)

2. ความเข้มข้นของ TRHCl ในช่วง 0.0005-0.0010 โมลาร์ จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl มีค่ามากขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นของสารสกัด OA คงที่ที่ 0.05 โมลาร์นั้น จะทำให้อัตราการสกัดไอออนโลหะต่าง ๆ มีค่าลดลงเกิดปรากฏการณ์ Antagonistic extraction เนื่องมาจากความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีค่ามากขึ้น (วีรวัดณ์ ปัทวีคองคา, 2542; Visser, 1994) ซึ่งเมื่อความหนืดมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์

การแพร่ (Diffusion coefficient) ของสารประกอบไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด TRHCI ที่ละลายในเยื่อแผ่นเหลวมีค่าน้อยลง ดังแสดงได้จากสมการของ Nernst ดังนี้ (Schulz, 1988)

$$D = \frac{RT}{6\Pi\eta r} \quad (4.7)$$

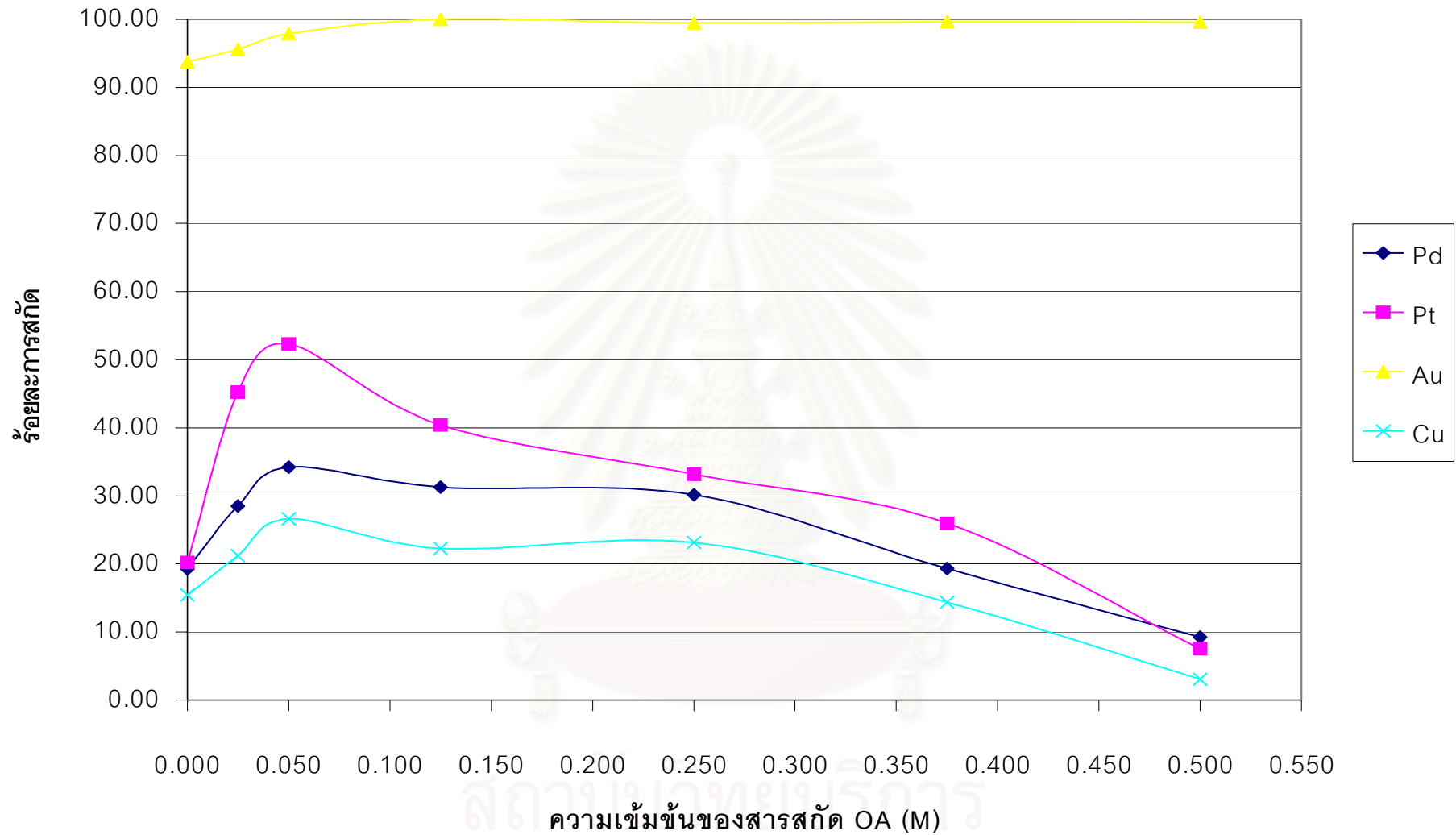
เมื่อ T คือ อุณหภูมิของสารละลาย, η คือ ความหนืดของสารละลาย, r คือ ขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน และ R คือ ระยะทางในการแพร่

สาเหตุอีกประการหนึ่งอาจเนื่องมาจากสารสกัด TRHCI เป็นสารสกัดที่เป็นเบส (พวกเอมีน) สามารถรวมตัวกันเองเกิดเป็นวัฏภาคที่สามขึ้นมาขัดขวางการแพร่ ดังสมการที่ (2.12) ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.2

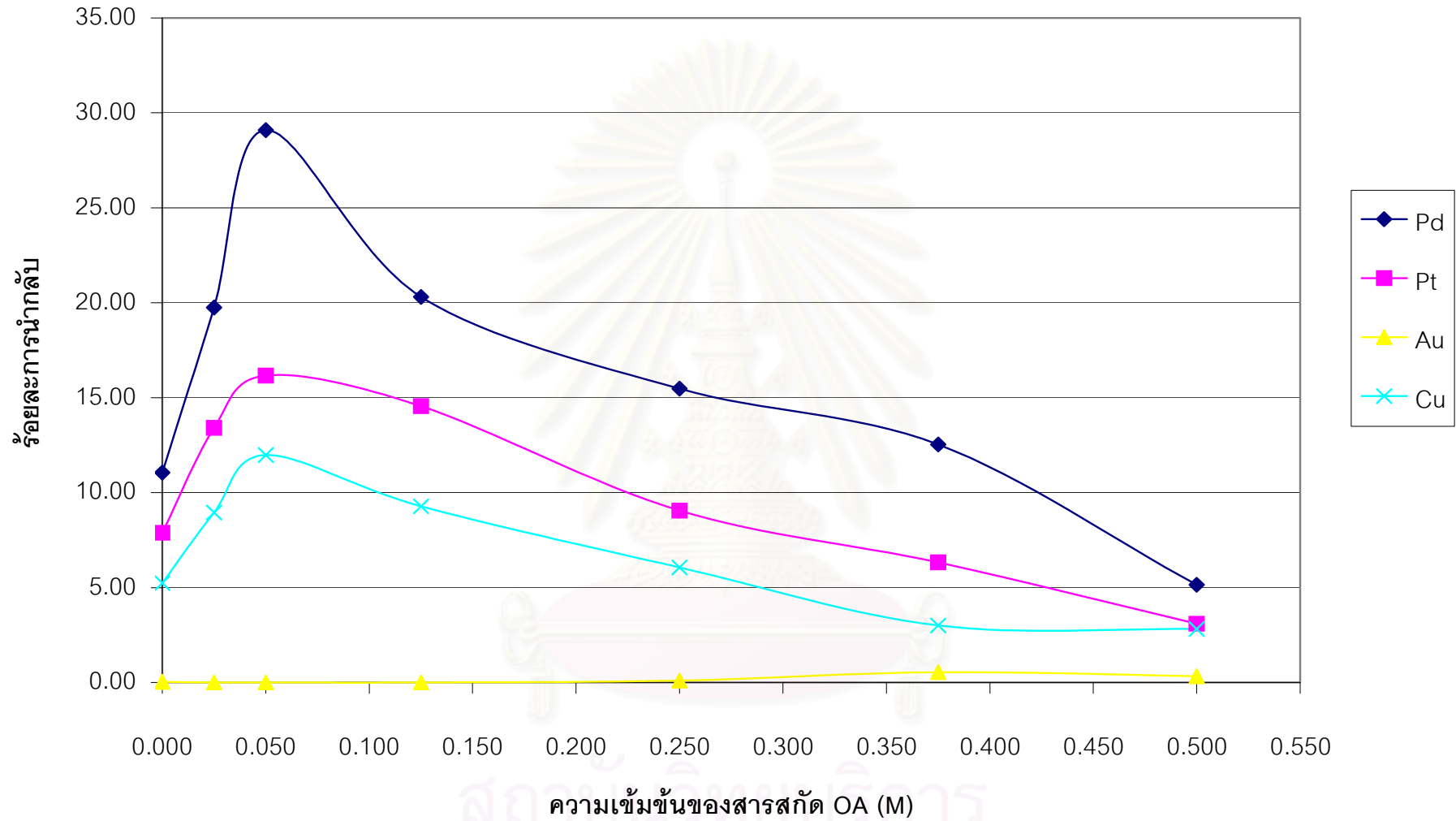
เมื่อพิจารณาในส่วนของการนำกลับในช่วงความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI นี้ จากรูปที่ 4.2 พบว่าการนำกลับมีแนวโน้มคล้ายกับการสกัด โดยสามารถนำกลับไอออน $Pd > Pt > Cu > Au$ ด้วยเหตุผลดังได้กล่าวแล้วข้างต้น

4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิก (OA) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด OA (เป็นสารช่วยสกัด เนื่องจากตัวมันเองจะไม่สกัดไอออนลบ) ต่อการสกัด และนำกลับแพลเลเดียม ทำได้โดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด OA ในสารละลายคลอโรฟอร์มให้มีค่าต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.000, 0.025, 0.050, 0.075, 0.250, 0.375 และ 0.500 โมลาร์ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI เท่ากับ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่หาจากการทดลองในหัวข้อ 4.1) ความเข้มข้นของสารละลายสตริบโซเดียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนมีค่า 2 อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริบเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



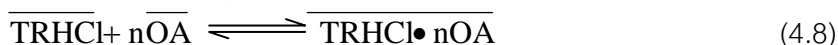
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด OA กับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$
อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด OA กับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$
อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด OA เท่ากับ 0.000 โมลาร์ นั้นคือในเยื่อแผ่นเหลวมีเพียงสารสกัด TRHCI ซึ่งเป็นสารสกัดหลักสามารถสกัด และนำกลับไอออนแพลเลเดียมได้เท่ากับ ร้อยละ 20 และร้อยละ 11 ตามลำดับ โดยจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะโดยตรงดังสมการที่ (4.3) (กล่าวไว้แล้ว) นอกจากนี้เมื่อไม่มีสารสกัด OA พบว่าค่าการเลือกของไอออนแพลเลเดียมจะมีค่าน้อยอีกด้วย เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด OA จนถึง 0.050 โมลาร์ จะทำให้สามารถสกัด และนำกลับแพลเลเดียมได้เท่ากับ ร้อยละ 35 และร้อยละ 30 ตามลำดับ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าค่าการเลือกของไอออนแพลเลเดียมก็มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไอออนโลหะอื่น โดยความสามารถในการสกัดและนำกลับที่เพิ่มขึ้นนี้ เนื่องมาจากเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ขึ้นดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) (ดังได้กล่าวแล้ว) โดยสมการที่ 4.5 เป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารสกัดที่ให้โปรตอน (Proton donor) คือสารสกัด OA และสารสกัดที่รับโปรตอน (Proton acceptor) คือสารสกัด TRHCI (อะตอมของไนโตรเจนจะเป็นตัวรับโปรตอน) (Akhond and Shamsipur, 1996; DadFarnia and Shamsipur, 1992) ความเป็นไปได้อีกประการหนึ่งคือ สารสกัด OA จะก่อตัวเป็นหยดไมเซลล์ (Micelle) ซึ่งจะมีสารสกัด TRHCI อยู่ภายใน ทำให้สารสกัด TRHCI สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาภายในเยื่อแผ่นเหลวได้ง่ายขึ้น (Rosen, 1978; Myers, 1988) ในส่วนของลำดับการสกัดนั้นจะขึ้นกับค่า β ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1

ส่วนความเข้มข้นของสารสกัด OA ในช่วง 0.050 โมลาร์ ถึง 0.500 โมลาร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด OA เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการสกัด และนำกลับไอออนโลหะจะลดลง เนื่องมาจากสารสกัด OA มีความหนืดสูงส่งผลให้ความหนืดที่เพิ่มขึ้นขัดขวางการแพร่ของโลหะภายในเยื่อแผ่นเหลว (Visser, 1994) นอกจากนี้สาเหตุอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารสกัดกรดโอเลอิก (OA) ซึ่งเป็นกรดอ่อนกับสารสกัดไฮโอไรดาซีน (TRHCI) ซึ่งเป็นเบส ดังสมการที่ (4.8) ทำให้ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI กับสารสกัด OA ที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะลดลง (Mathur, 1983)



ในส่วนต่อไปนี้จะเป็นการหาจำนวนโมลของสารสกัด OA ที่เข้าร่วมในปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์จากผลที่ได้จากการทดลอง ปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะที่มีประจุลบ (Anion) ด้วยสารสกัด TRHCI เป็นดังสมการที่ (4.9)



เมื่อ MCl_z^{n-} แทน PdCl_4^{2-} , PtCl_6^{2-} , AuCl_4^- และ CuCl_4^{2-}

ซึ่งค่าคงที่สมดุลการสกัดสำหรับสารสกัด TRHCl เท่ากับ

$$K_{\text{ex}(1)} = \frac{[\overline{\text{M}(\text{TRH})_n \text{Cl}_z}][\text{Cl}^-]^n}{[\overline{\text{TRHCl}}]^n [\text{MCl}_z^{n-}]} \quad (4.10)$$

จากนิยามค่าอัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio, D)

$$D = \frac{[\overline{\text{M}(\text{TRH})_n \text{Cl}_z}][\text{Cl}^-]^n}{[\overline{\text{TRHCl}}]^n [\text{MCl}_z^{n-}]} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.10) และ (4.11) จะได้ค่าคงที่สมดุลในเทอมของค่าอัตราส่วนการกระจายเท่ากับ

$$K_{\text{ex}(1)} = \frac{D [\text{Cl}^-]^n}{[\overline{\text{TRHCl}}]^n} \quad (4.12)$$

เมื่อใช้สารสกัด OA เข้าร่วมสกัดกับสารสกัด TRHCl จะเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ดังสมการที่ (4.13)



ซึ่งค่าคงที่สมดุลการสกัดสำหรับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์เท่ากับ

$$K_{\text{ex}(1,2)} = \frac{[\overline{\text{M}(\text{TRH})_n \text{Cl}_z \bullet \text{OA}_x}][\text{Cl}^-]^n}{[\text{MCl}_z^{n-}][\overline{\text{TRHCl}}]^n [\overline{\text{OA}}]^x} \quad (4.14)$$

จากนิยามของค่าการกระจายจะได้

$$K_{\text{ex}(1,2)} = \frac{D [\text{Cl}^-]^n}{[\overline{\text{TRHCl}}]^n [\overline{\text{OA}}]^x} \quad (4.15)$$

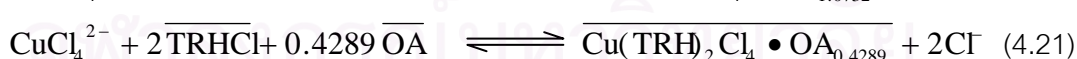
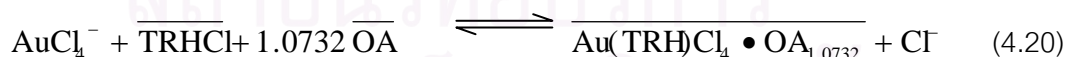
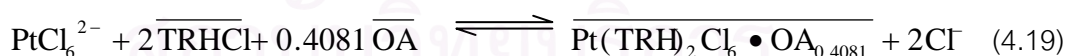
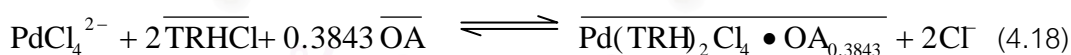
$$D = \frac{K_{ex(1,2)} [\overline{\text{TRHCl}}]^n [\overline{\text{OA}}]^x}{[\text{Cl}^-]^n} \quad (4.16)$$

ใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการที่ (4.16) จะได้

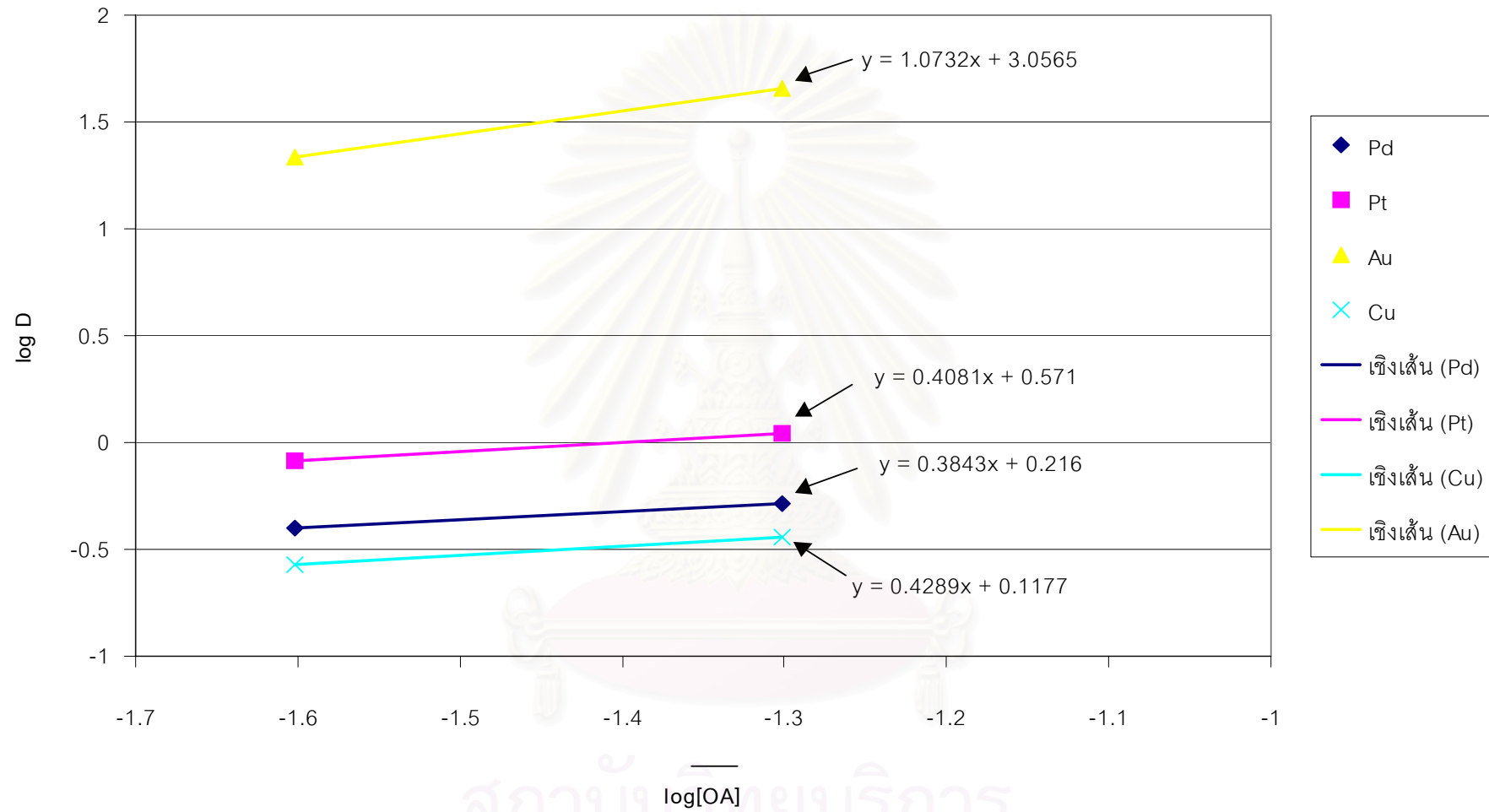
$$\log D = \log(K_{ex(1,2)}) + n \log[\overline{\text{TRHCl}}] + x \log[\overline{\text{OA}}] - n \log[\text{Cl}^-] \quad (4.17)$$

เนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิดไม่ลดลงอย่างมากจึงสมมติว่าคงที่ได้ (Ma, Chen, and Hossain, 2000) จากสมการที่ (4.17) เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\log D$ กับ $\log[\overline{\text{OA}}]$ จะได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ x

ในการทดลองนี้จะใช้ช่วงความเข้มข้นของสารสกัด OA ในช่วงความเข้มข้น 0.025-0.050 โมลาร์ มาพิจารณาเท่านั้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารสกัด OA มากกว่า 0.050 โมลาร์ จะไม่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (ดูรูปที่ 4.4 ประกอบ) และความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl คงที่ที่ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) รูปที่ 4.5 แสดงกราฟระหว่าง $\log D$ กับ $\log[\overline{\text{OA}}]$ (ข้อมูลค่า D แสดงในภาคผนวก ก ตาราง ก.5) จากรูปที่ 4.5 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\log D$ กับ $\log[\overline{\text{OA}}]$ สำหรับแพลเลเดียม พลาทินัม ทอง และทองแดง มีค่าความชันเท่ากับ 0.3843, 0.4081, 1.0732 และ 0.4289 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของสารสกัดผสมระหว่าง TRHCl ความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับสารสกัด OA ความเข้มข้น 0.025-0.050 โมลาร์ ได้ดังนี้



ในส่วนของการนำกลับ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 พบว่าความเข้มข้นของสารสกัด OA ที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนแพลเลเดียมมากที่สุดเท่ากับ 0.05 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์มากที่สุด



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log D$ กับ $\log[OA]$ เมื่อ $pH=2$, $[TRHCl]=0.0005M$, $[OA]=0.025-0.050M$, $[NaNO_2]=0.03M$
 อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายstripperเท่ากับ 100 ml/min

4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในสารละลายป้อน

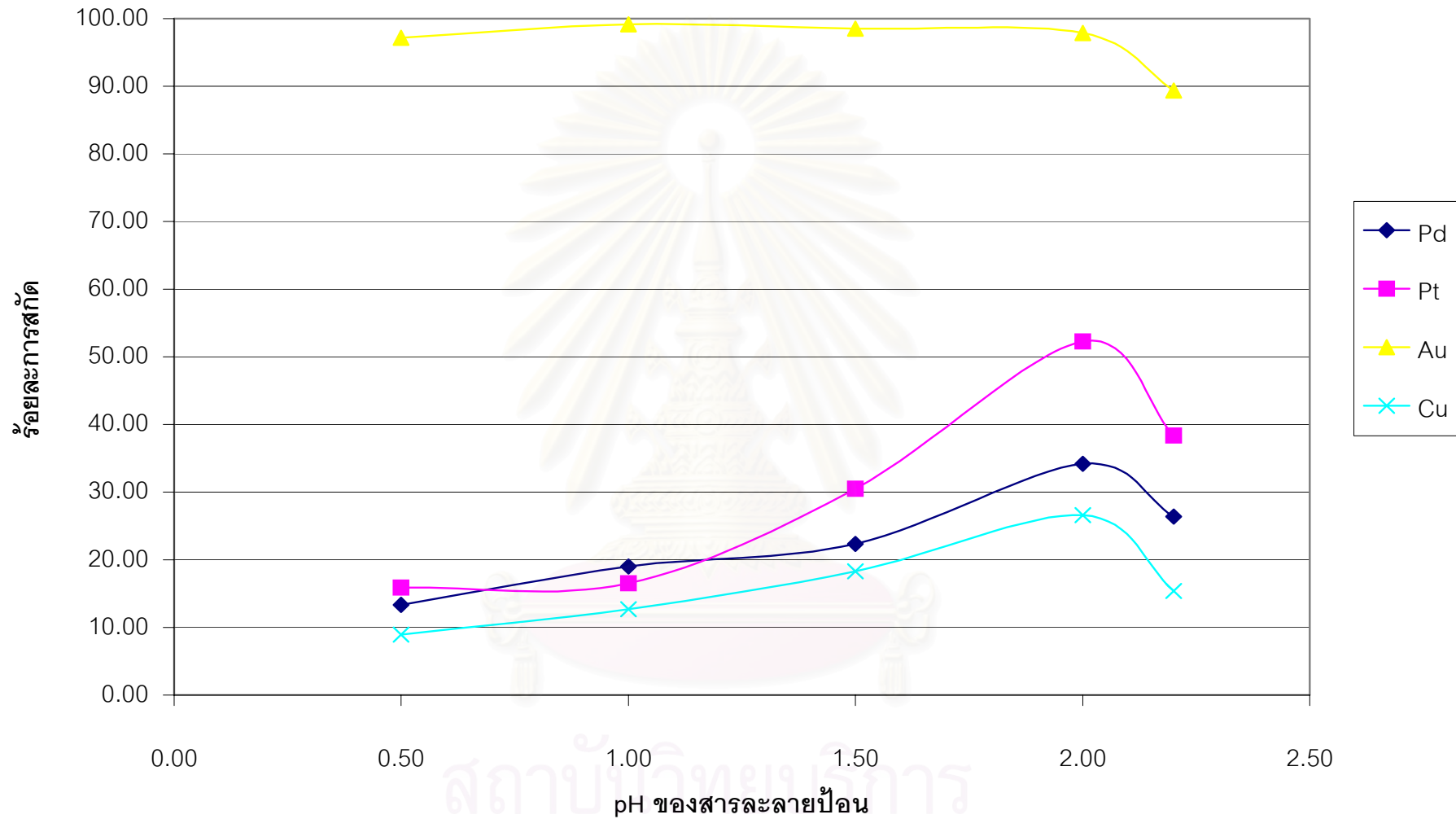
การทดลองเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัด และ นำกลับแพลเลเดียม ทำได้โดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่า 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.2 ตามลำดับ (ที่ pH มีค่ามากกว่า 2.2 สารละลายป้อนจะเกิดการตกตะกอน) ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI เท่ากับ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) ความเข้มข้นของสารสกัด OA เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 2.0 การสกัดไอออนโลหะต่าง ๆ มีค่ามากขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จากสมการปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัด TRHCI และปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัดผสม TRHCI กับ OA ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ

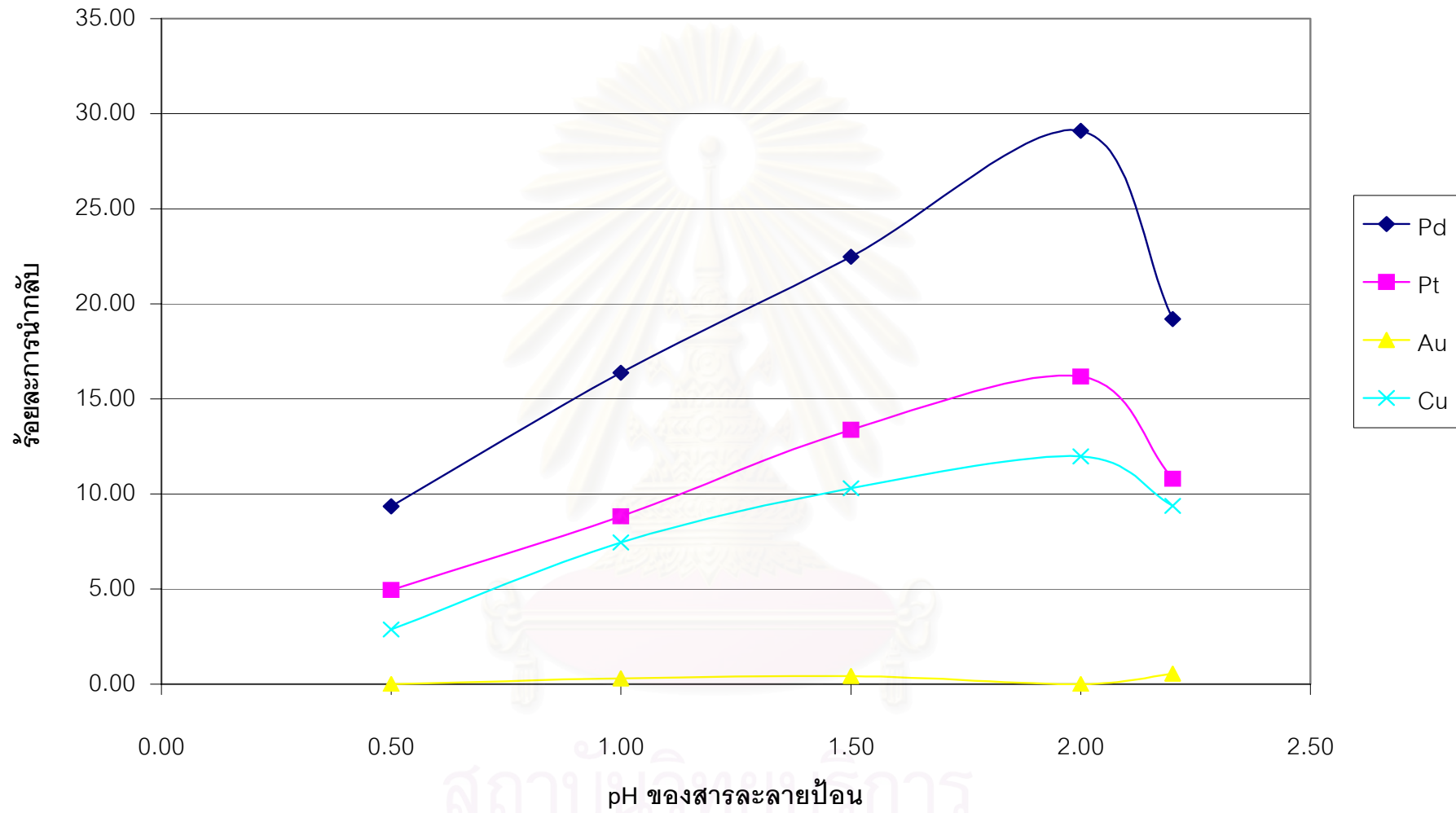


จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะเห็นว่าถ้าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น นั่นคือ Cl^- มีค่าน้อยลง (ในการทดลองนี้ใช้กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง) ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าส่งผลให้การสกัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ นอกจากนี้สารสกัด TRHCI เป็นสารสกัดที่เป็นเบส ดังนั้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้น (มีความเป็นเบสมากขึ้น) จึงสามารถสกัดได้มากขึ้น

ส่วนในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่า 2 จากรูปที่ 4.6 พบว่าจะทำให้การสกัดไอออนโลหะต่าง ๆ มีค่าลดลง เนื่องมาจากสารประกอบเชิงซ้อน $\text{M}(\text{TRH})_n \text{Cl}_2$ จะมีเสถียรภาพอย่างมากภายใต้สภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง (Gowda, Ramappa, and Achar, 1975; Gowda, Vallabhaneni et al., 1997) แต่เมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดน้อยลง (pH สูงขึ้น)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $[TRHCl]=0.0005M$, $[OA]=0.05M$, $[NaNO_2]=0.03M$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $[TRHCl]=0.0005M$, $[OA]=0.05M$, $[NaNO_2]=0.03M$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปเท่ากับ 100 ml/min

ทำให้การสกัดลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ที่ pH มากกว่า 2.2 พบว่าสารละลายป้อนจะเกิดการตกตะกอนอย่างมาก

สำหรับผลการทดลองในส่วนของการนำกลับแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการสกัด โดยสารละลายนำกลับโซเดียมไนไตรต์จะสามารถนำกลับไอออนแพลเลเดียมได้มากกว่าพลาทินัม ทองแดง และทอง

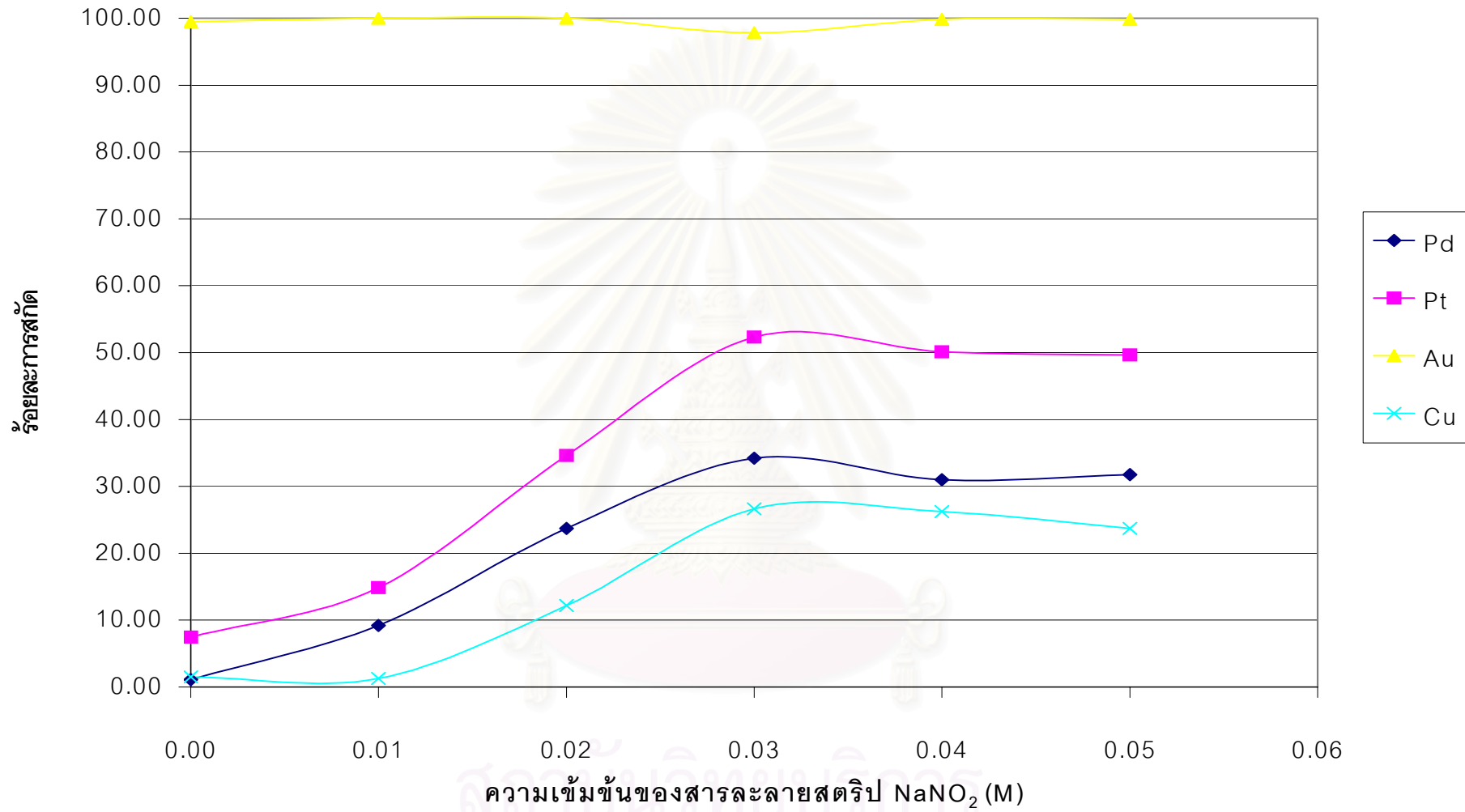
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไนไตรต์ (NaNO_2)

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไนไตรต์ต่อการสกัด และการนำกลับแพลเลเดียม ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์ให้มีค่าต่าง ๆ ได้แก่ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมลาร์ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCl เท่ากับ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) ความเข้มข้นของสารสกัด OA เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนเท่ากับ 2 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3) อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

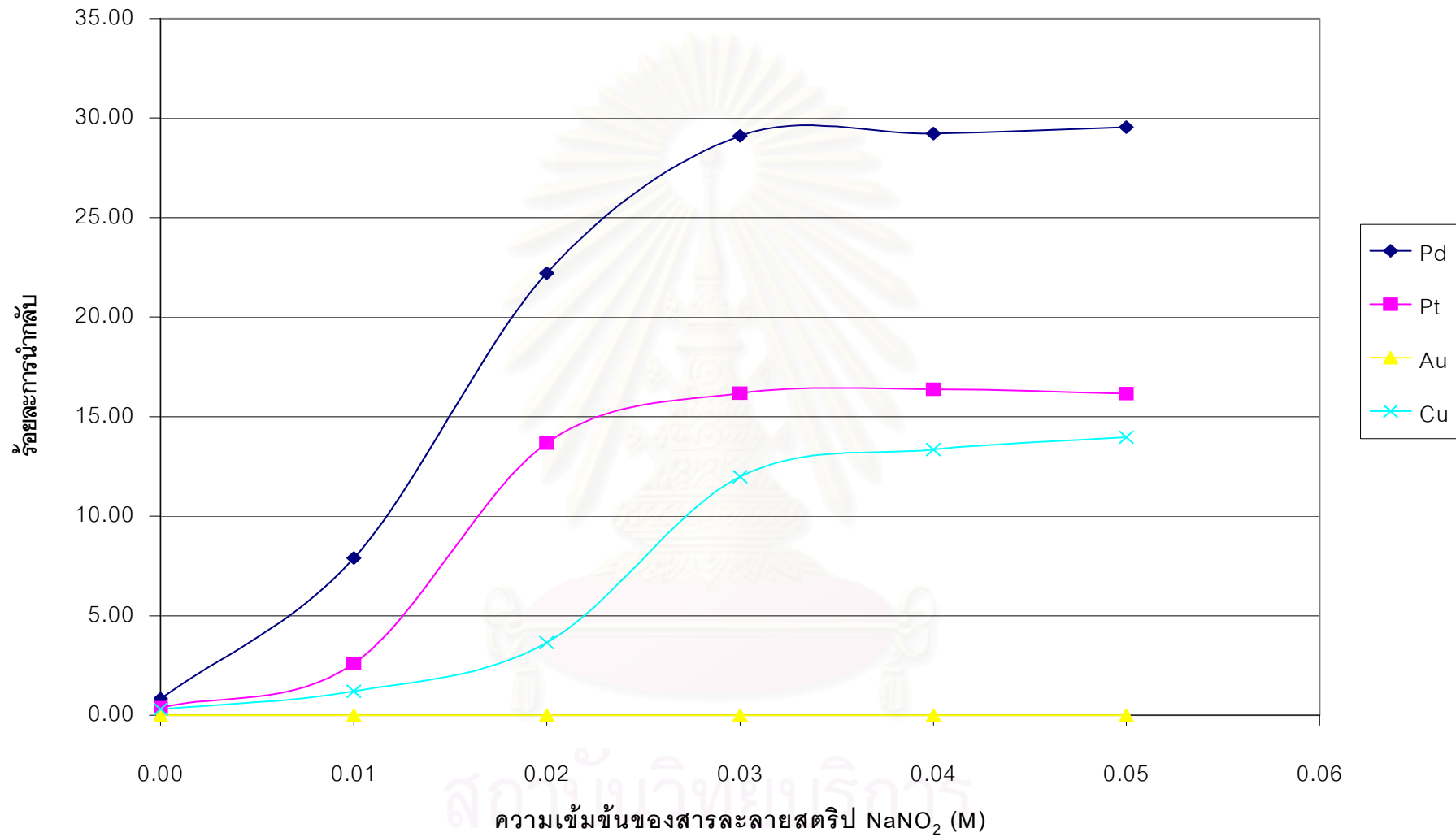
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์ ซึ่งเป็นสารละลายสตริป จึงขออธิบายในส่วนของการนำกลับก่อนการสกัด จากรูปที่ 4.9 (รูปการนำกลับ) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะต่าง ๆ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์เพิ่มจนถึงค่า ๆ หนึ่งร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะจะมีค่าเกือบคงที่ โดยร้อยละการนำกลับของไอออนแพลเลเดียม พลาทินัม และทองแดงจะเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์มีค่าเท่ากับ 0.03 โมลาร์ ส่วนไอออนทองไม่สามารถนำกลับได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการการนำกลับไอออนโลหะดังสมการที่ (4.6)



เมื่อ $\overline{M(\text{TRH})_n \text{Cl}_2}$ คือ $\text{Pd}(\text{TRH})_2\text{Cl}_4$, $\text{Pt}(\text{TRH})_2\text{Cl}_6$ และ $\text{Cu}(\text{TRH})_2\text{Cl}_4$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริป NaNO_2 กับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



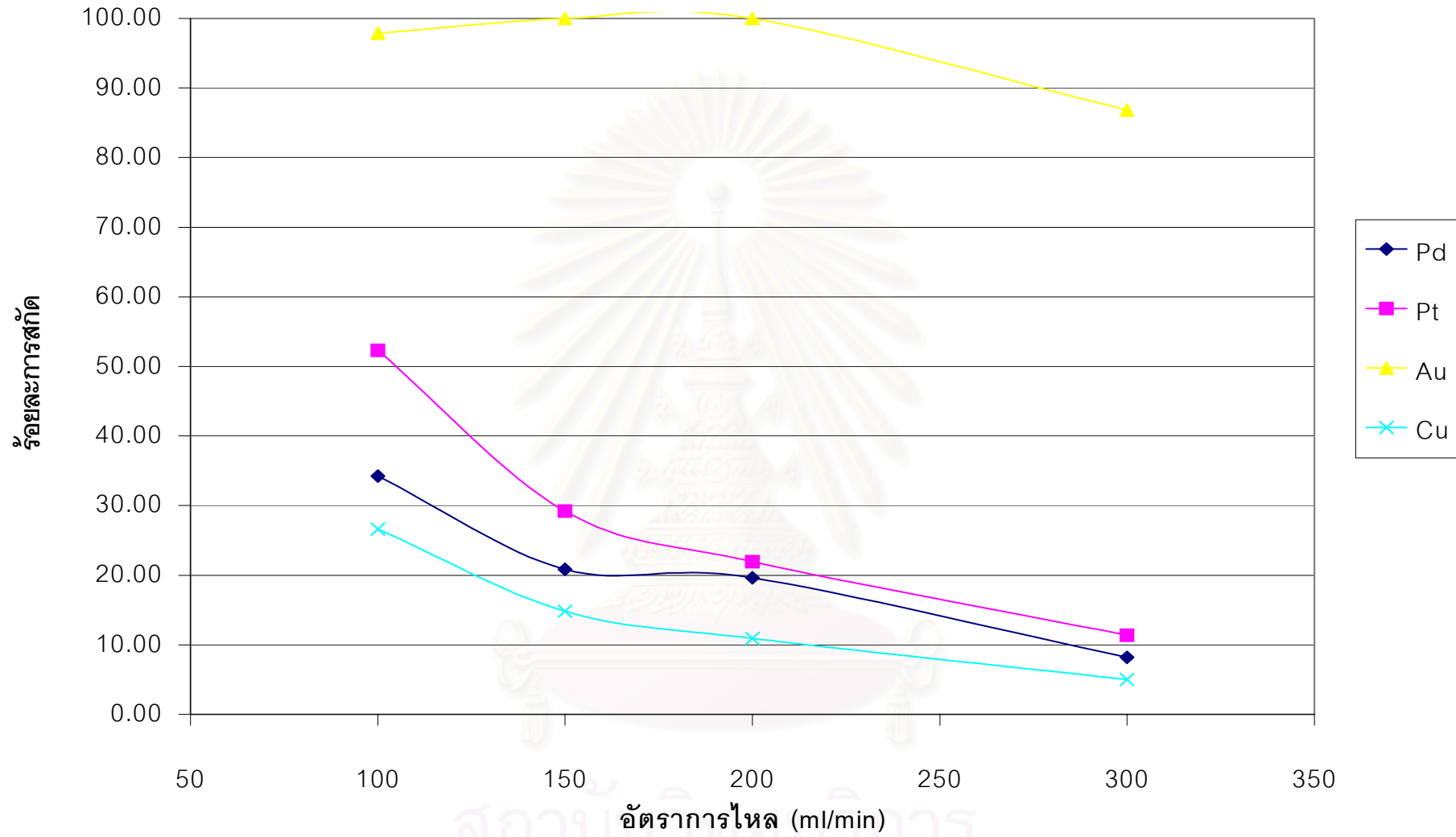
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริป NaNO_2 กับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min

จากสมการที่ (4.6) จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ไอออนโลหะหนักกลับได้มากขึ้น ตามหลักของเฮนรี หลุยส์ เลอชาว์ เตอริเยร์ แต่เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์มากกว่า 0.03 โมลาร์ ก็ไม่ทำให้ร้อยละการนำกลับเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากร้อยละการสกัดของไอออนโลหะมีค่าคงที่นั่นเองดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการสกัดที่สูงที่สุดของระบบที่ศึกษานี้ ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์ที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.03 โมลาร์

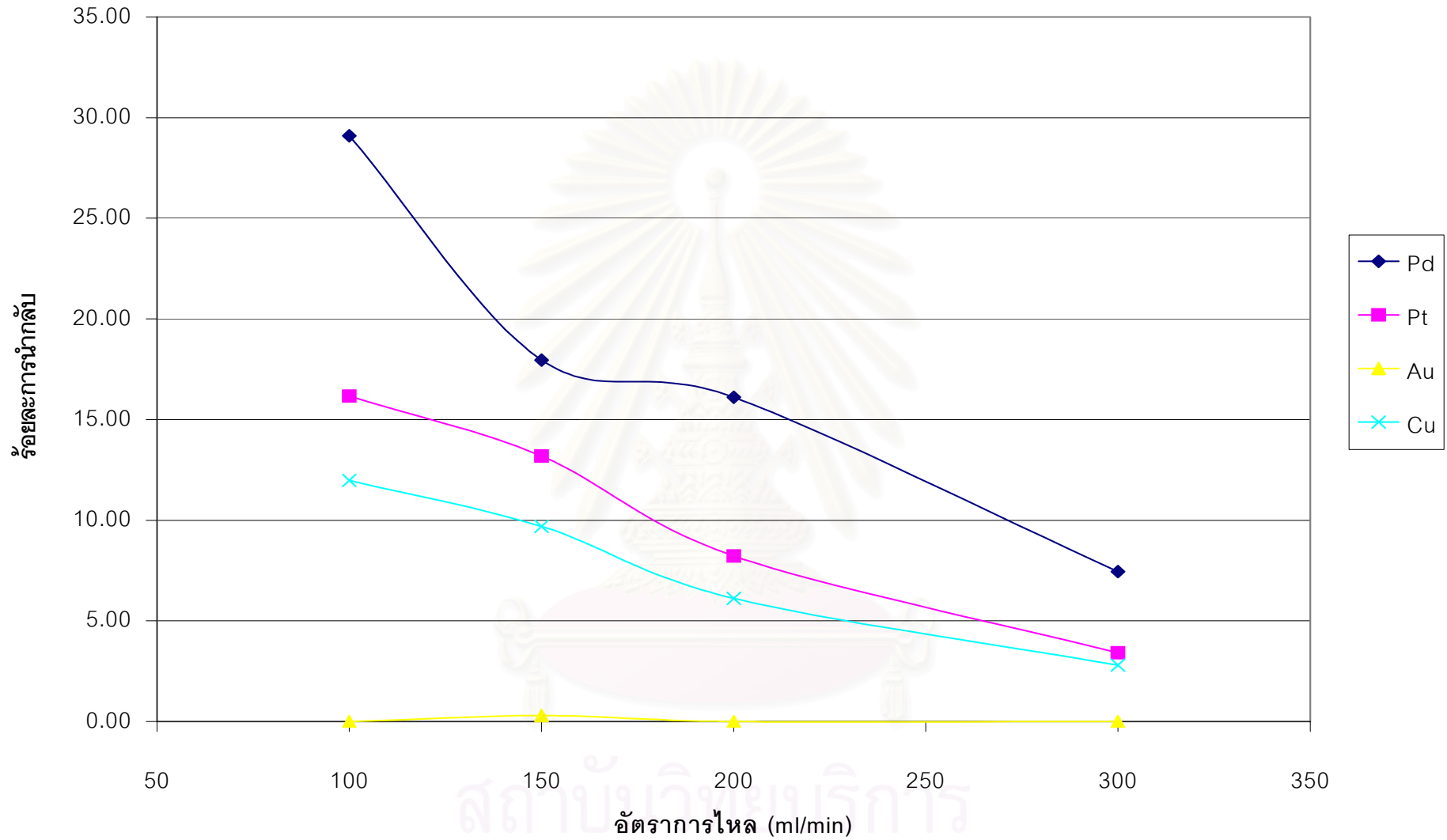
4.5 ผลของอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสตริป

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปต่อการสกัด และการนำกลับแพลเลเดียม ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปที่เท่ากันให้มีค่าต่าง ๆ ได้แก่ 100, 150, 200 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI เท่ากับ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) ความเข้มข้นของสารสกัด OA เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนเท่ากับ 2 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.4) และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัด และการนำกลับของไอออนโลหะลดลง เนื่องมาจากเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อนสามารถสัมผัสกับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้น้อยลง (Retention time น้อยลง) จึงเกิดปฏิกิริยาการสกัดได้น้อยลง ซึ่งไอออนกลุ่มโลหะมีค่าจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้า (Antico' et al., 1994; Kakoi, Horinouchi et al., 1996; Kakoi, Goto et al., 1997) ส่วนในด้านการนำกลับสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกัน โดยจากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบนี้เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งที่อัตราการไหลน้อยกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที แม้จะมีแนวโน้มที่จะสกัด และนำกลับได้ดีขึ้น แต่ไม่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ เพราะอัตราการไหลที่ช้าจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาานกว่าจะได้ผลผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (ในที่นี้คือไอออนแพลเลเดียม)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายกับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$



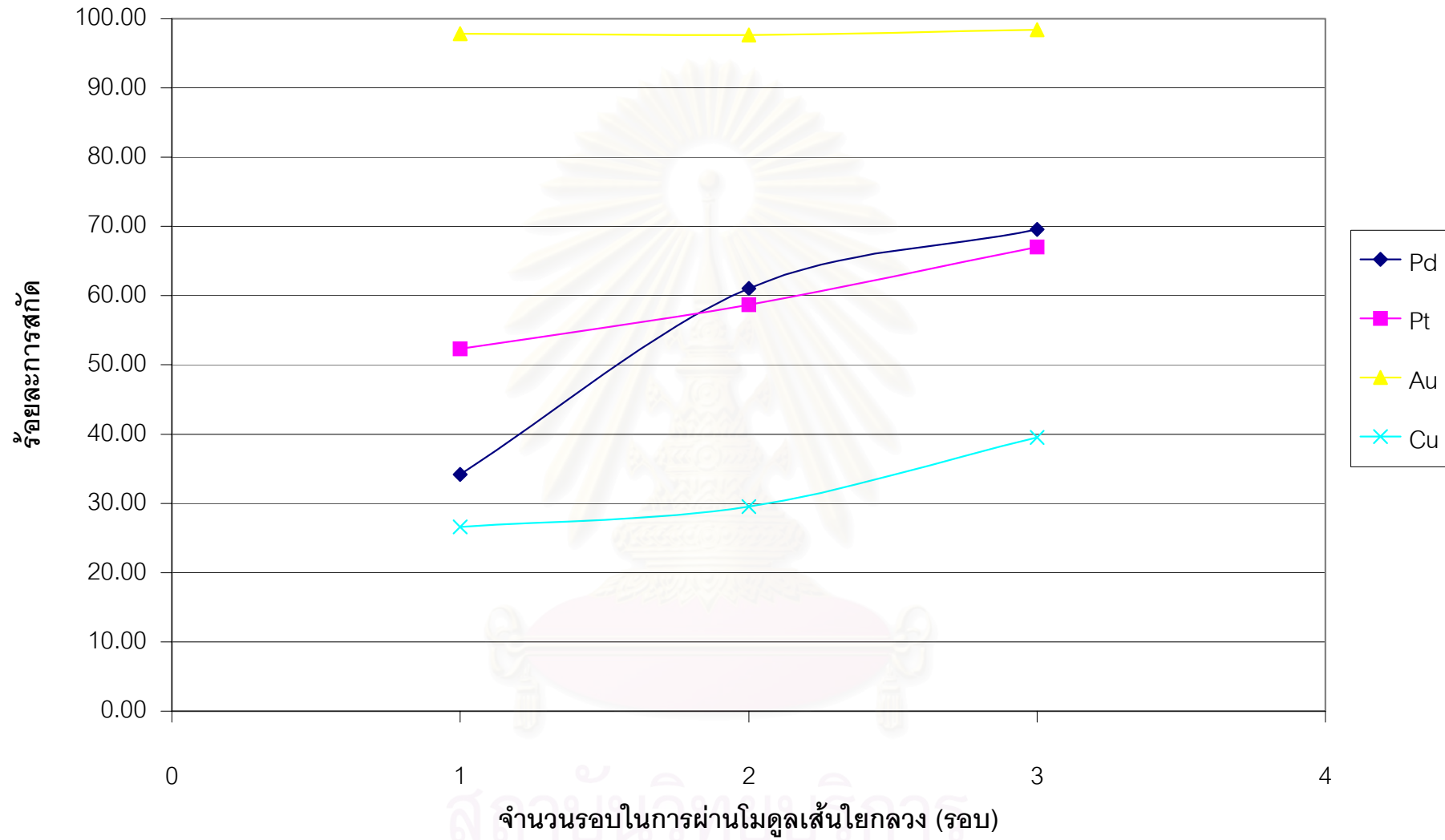
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายกับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$

4.6 ผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง

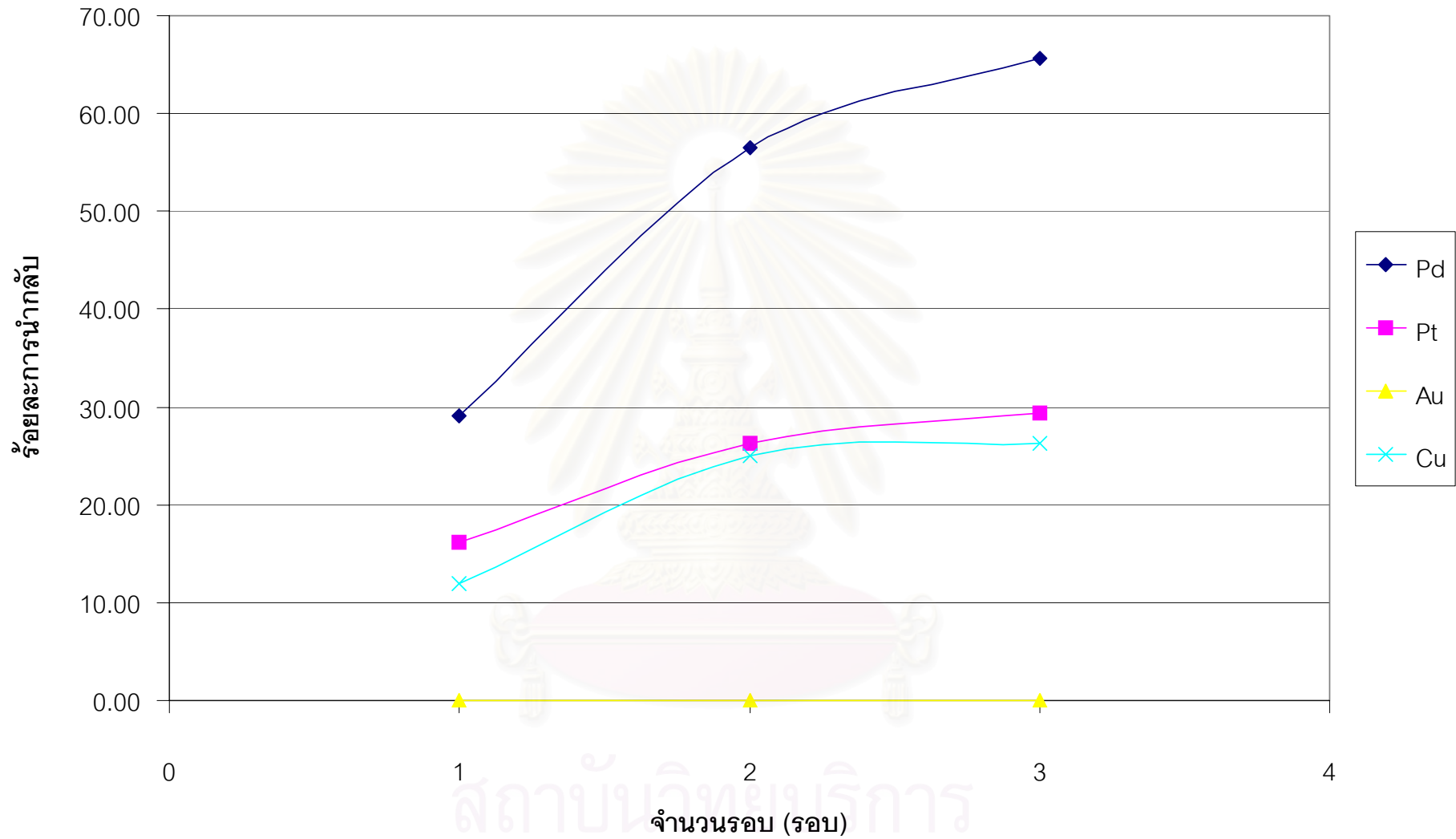
การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัด และการนำกลับแพลเลเดียม ทำได้โดยนำสารละลายป้อนขาออก และสารละลายสตริปขาออกจากการปฏิบัติการในรอบแรกมาเป็นสารละลายป้อนขาเข้า และสารละลายสตริปขาเข้าในการปฏิบัติการครั้งที่ 2 ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ซึ่งในการทดลองนี้จะดำเนินการ 3 รอบด้วยกัน ในขณะที่ตัวแปรอื่น ๆ มีค่าคงที่ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด TRHCI เท่ากับ 0.0005 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) ความเข้มข้นของสารสกัด OA เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2) ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนเท่ากับ 2 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3) ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.4) อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.5) ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13

จากรูปที่ 4.12 พบว่าในการปฏิบัติการในรอบแรกจะสามารถสกัดไอออน $Au > Pt > Pd > Cu$ (ทองสกัดได้ 97.86% พลาตินัมสกัดได้ 52.30% แพลเลเดียมสกัดได้ 34.21 และทองแดงสกัดได้ 26.62%) ด้วยเหตุผลดังได้กล่าวแล้วหัวข้อ 4.1 แต่เมื่อการปฏิบัติการในรอบที่ 2 และรอบที่ 3 จะสามารถสกัดไอออน $Au > Pd > Pt > Cu$ เนื่องจากไอออนแพลเลเดียมนำกลับได้มากกว่าไอออนชนิดอื่นดังรูปที่ 4.13 โดยร้อยละการสกัดไอออนแพลเลเดียมจะมีค่ามากกว่าร้อยละการนำกลับ เนื่องจากไอออนแพลเลเดียมจะต้องใช้เวลาในการถ่ายเทผ่านวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่ง Hann และคณะ (Hann, Bartels, and Graauw, 1989) พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสตริปจะช้ากว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสกัด ซึ่งเมื่อปฏิบัติการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 3 รอบ สามารถนำกลับไอออนแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 รอบถึง 2 เท่าด้วยกัน นอกจากนี้เยื่อแผ่นเหลวในระบบนี้ยังมีเสถียรภาพที่ดีอยู่ แม้ผ่านการดำเนินงาน 3 รอบก็ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของโลหะชนิดต่าง ๆ เมื่อ $pH_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$, $[\text{NaNO}_2]=0.03\text{M}$ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเท่ากับ 100 ml/min

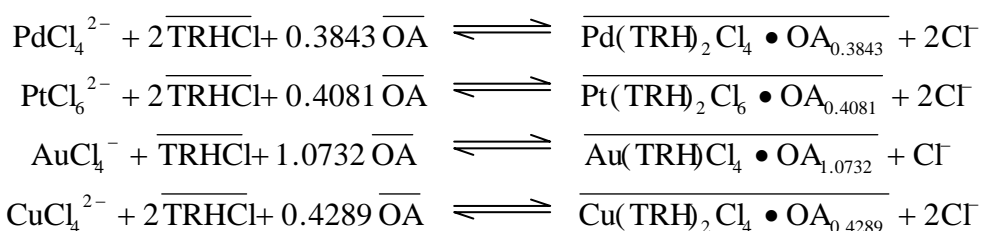
บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานำกลับแพลเลเดียมจากกรดกัดทองใช้แล้ว โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวง ซึ่งมีสารสกัดไธโอไรดาซีน (TRHCl) ผสมกับสารสกัดกรดโอเลอิก (OA) ละลายในตัว ทำละลายคลอโรฟอร์ม สารละลายป้อนที่ใช้ คือ กรดกัดทองที่ผ่านกระบวนการทำทองแล้ว สารละลายสตริป คือ สารละลายโซเดียมไนไตรต์ อัตราการไหลของสารละลายทั้งสองเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การปฏิบัติการเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

1. เมื่อความเข้มข้นสารสกัดกรดโอเลอิกคงที่ แต่ความเข้มข้นของสารสกัดไธโอไรดาซีน เพิ่มขึ้นจาก 0.000125-0.0005 โมลาร์ ส่งผลให้ร้อยละการสกัดไอออนโลหะเพิ่มขึ้น โดยลำดับการสกัด คือ ทอง>พลาทินัม>แพลเลเดียม>ทองแดง แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดไธโอไรดาซีนมากกว่า 0.0005 โมลาร์ ร้อยละการสกัดไอออนโลหะจะลดลง ในส่วนของลำดับการนำกลับ คือ แพลเลเดียม>พลาทินัม>ทองแดง>ทอง ซึ่งค่าความเข้มข้นของสารสกัดไธโอไรดาซีนที่ให้ร้อยละการสกัด และการนำกลับสูงที่สุดเท่ากับ 0.0005 โมลาร์
2. เมื่อผสมสารสกัดกรดโอเลอิกกับสารสกัดไธโอไรดาซีน ทำให้ความสามารถในการสกัดไอออนแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้สารสกัดไธโอไรดาซีนเพียงสารเดียว นอกจากนี้สารสกัดกรดโอเลอิกยังส่งผลให้ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะแต่ละตัวแตกต่างกันเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความเข้มข้นของสารสกัดโอเลอิกที่ทำให้ประสิทธิภาพการสกัด และการนำกลับแพลเลเดียมได้มากที่สุดเท่ากับ 0.05 โมลาร์ ที่ความเข้มข้นของสารสกัดไธโอไรดาซีนเท่ากับ 0.0005 โมลาร์
3. ปฏิกริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของสารสกัดผสมระหว่างไธโอไรดาซีนความเข้มข้น 0.0005 โมลาร์ กับกรดโอเลอิกความเข้มข้น 0.025-0.05 โมลาร์ เป็นดังนี้



4. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของกรดกัดทองใช้แล้วที่เหมาะสมต่อการนำกลับ แพลเลเดียมเท่ากับ 2.00
5. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนไตรต์ที่ใช้เป็นสารละลายสตริป จะส่งผลให้สามารถนำกลับแพลเลเดียมได้มากขึ้น โดยความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.03 โมลาร์ ซึ่งแม้ความเข้มข้นมากกว่า 0.03 โมลาร์ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการนำกลับเพิ่มขึ้น
6. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปพร้อม ๆ กัน ส่งผลให้ความสามารถในการสกัด และนำกลับไอออนแพลเลเดียมลดลง โดยอัตราการไหลที่เหมาะสมเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที
7. ที่สภาวะการทดลอง ความเป็นกรด-ด่างในกรดกัดทองใช้แล้วเท่ากับ 2.00 ความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีน และสารสกัดกรดโอเลอิกในคลอโรฟอร์มเท่ากับ 0.0005 โมลาร์ และ 0.05 โมลาร์ ตามลำดับ ความเข้มข้นของโซเดียมไนไตรต์เท่ากับ 0.03 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสตริปเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที เมื่อปฏิบัติการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 1 รอบ ได้ค่าร้อยละการนำกลับแพลเลเดียมเท่ากับ 29.10 แต่เมื่อผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 3 รอบจะได้ร้อยละการนำกลับแพลเลเดียมเท่ากับ 65.63 และความแตกต่างในการแยกไอออนโลหะแต่ละตัวออกจากกันก็เพิ่มขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงจะเพิ่มความสามารถในการนำกลับแพลเลเดียมเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นควรศึกษาการเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวง โดยอาจจะนำมาต่ออนุกรมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับแพลเลเดียมให้มากยิ่งขึ้น หรืออาจจะเพิ่มเวลาในการสัมผัสกันระหว่างไอออนโลหะในสารละลายกับสารสกัด และสารสตริป โดยใช้การปฏิบัติการแบบหมุนเวียน
2. ควรศึกษาการนำกลับไอออนโลหะอื่นที่ละลายในกรดกัดทองใช้แล้ว เช่น ทอง พลาทินัม และทองแดง เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับไอออนแต่ละตัว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
3. เนื่องจากสารสกัดไฮโอไรดาซีนเป็นสารสกัดที่มีราคาแพง ทำให้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง ดังนั้นควรทำการศึกษาสารสกัดอื่นที่มีราคาถูกลงกว่า แต่ให้

ความสามารถในการสกัดแพลงก์ตอนสูง นอกจากนี้อาจทดลองใช้สารสกัดกรดไขมันชนิดอื่นแทนกรดโอเลอิก เนื่องจากกรดโอเลอิกมีความหนืดสูง ส่งผลให้ค่าการแพร่ของไอออนโลหะไม่สูงนัก

4. ควรมีการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่ศึกษา ขณะดำเนินการทดลอง
5. ในวิทยานิพนธ์นี้ได้หาค่าจำนวนโมลที่สารสกัดกรดโอเลอิกเข้าร่วมปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยใช้ผลการทดลองเพียง 2 จุด ซึ่งทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนผิดพลาดไป ควรมีการทดลองที่ความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอ-เลอิกที่ความเข้มข้นอื่น ๆ ในช่วง 0.025-0.050 โมลาร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จดหมายข่าว, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 1996, ปีที่ 3 ฉบับที่ 1-4.

จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์. 2543. Liquid Membrane. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์ และธนัญชัย บุญนะที. 2542. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ไอโซน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นภกร ธัมพิพิธ. 2542. บทที่ 1 เมมเบรนสังเคราะห์และการเตรียม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

นิสิต สุไลมาน. 2543. การสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2539. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์.

รัตนา จิระรัตนานนท์. 2543. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเล็ง.

วีรวุฒน์ บัตทวิคคา. 2542. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติก กับโซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Akhond, M. and Shamsipur, M. 1996. Journal of Membrane Science 117: 221-229.

- Antico', E., Masana, A., Hidalgo, M., Salvado', V., and Valiente, M. 1994. New sulphur-containing reagents as carriers for the separation of palladium by solid supported liquid membranes. Hydrometallurgy 35: 343-352.
- Baker, R. W. 2000. Membrane technology and applications. New York: McGraw-Hill.
- Brock, T. D. 1983. Membrane Filtration: A User's Guide and Reference Manual. Stevens Point, Wisconsin, The United State of America: Worzalla Publishing.
- DadFarnia, S. and Shamsipur, M. 1992. Bulletin of The Chemical Society of Japan 65: 2779.
- Deshmukh, B. K. and Kharat, R. B. 1976. Journal of The Indian Chemical Society 53: 980.
- Farbu, L., Alstad, J., and Auguston, J. H. 1974. Cited in G. Duychaerts and J. F. Desreux. 1997. Recent development and new combinations of extractants in synergistic processes. Proceeding of International Solvent Extraction Conference.
- Farhadi, K., and Shamsipur, M. 2000. Separation study of palladium through a bulk liquid membrane containing thioridazine•HCl and oleic acid. Separation Science and Technology 35, 6: 859-868.
- Gowda, H. S. and Padmaji, K. A. 1978. Current Science 47: 226.
- Gowda, H. S., Ramappa, P. G., and Achar, B. N. 1975. Fresenius Zeitschrift Fur Analytische Chemie 275: 127.
- Gowda, N. M. M., Vallabhaneni, R. K., Gajula, J., and Ananda, S. 1997. Journal of Molecular Structure 407: 125.
- Hann, A.B., Bartels, P.V., and Graauw, J. 1989. Extraction of Metals Ions from Waste Water Modeling of the Mass Transfer in a Supported-Liquid-Membrane Process. Journal of Membrane Science 45:281-297.
- Healy, T. V. 1975. Gmelin Handbuch, Band 21, Teil D2, no.21, 360. Berlin: Springer Verlag
- Ivan, R. and Bedrich M. 1967. Atomic Absorption Spectrophotometry. London: the Butterworth Group.

- Kakoi, T., Goto, M., and Nakashio, F. 1997. Separation of palladium and silver from a nitric acid solution by liquid surfactant membranes. Separation Science and Technology 32, 8: 1415-1432.
- Kakoi, T., Horinouchi, N., Goto, M., and Nakashio, F. 1996. Recovery of palladium from an industrial wastewater using liquid surfactant membranes. Separation Science and Technology 31: 381-391.
- Kamasawa, I., Otake, T., and Yamashita, T. 1983. Mechanism kinetics of copper permeation through a supported liquid membrane containing a hydroxyoxime as mobile carrier. Industrial Engineering and Chemical Fundamental 22: 127-131.
- Livingstone, S. E. 1973. The chemistry of ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium and platinum. New York: Pergamon Press.
- Marr, R. and Copp, A. 1982. Liquid membrane technology-A survey of phenomena, mechanisms and models. International Chemical Engineering 22: 44-59.
- Mathur, J. N. 1983. Synergism of Trivalent Actinides and Lanthanides. Solvent Extraction and Ion Exchange 1,2: 349-412.
- Myers, D. 1988. Surfactants Science and Technology. Weinheim: VCH Publishers.
- Noble, R. D., Koval, C. A., and Pellegrino, J. J. 1989. Facilitated transport membrane systems. Chemical Engineering Progress (March 1989): 58-70.
- Paul, M., Xiao, D. C., and Md Monwar, H. 2000. Lithium extraction from a multicomponent mixture using supported liquid membrane. Separation Science and Technology 35, 15:2513-2533.
- Rizvi, G. H., Mathur, J. N., Murali, M. S., and Iyer, R. H. 1996. Recovery of fission product palladium from acidic high level waste solution. Separation Science and Technology 31, 13: 1805-1816.
- Rosen, M.J. 1978. Surfactants and Interfacial Phenomena. New York: Wiley.
- Sayed, S. A., Sami, T. M., and EL Tawab, A. A. A. 1996. Synergistic extraction of some rare earth(III) from nitrate media by thenoyltrifluoroacetone and tri-n-octylamine. Separation Science and Technology 31, 18: 2579-2587.
- Schulz, G. 1988. Separation techniques with supported liquid membranes. Desalination 68: 191-202.
- Taube, M. and Siekierski, S. 1961. Nukleonika 6: 489.

- Tavlarides, L. L., Bae, J. H., and Lee, C. K. 1987. Solvent extraction, membranes, and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology 22, 2&3:581-617.
- Terufumi, M., Masahiro, G., and Fumiyuki, N. 1995. Novel synergistic agent for selective separation of yttrium from other rare-earth-metals. Separation Science and Technology 30, 11: 2349-2363.
- Venkafachalam, S. 1998. Hydrometallurgy. NQROSA Publishing House.
- Visser, H.C. 1994. Supported liquid membranes with improved stability : kinetics and mechanism of carrier mediated transport. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- Winston Ho, W. S. and Li, N. N. 1992. Emulsion liquid membrane. Membrane Handbook, 656-672.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลดิบ และผลการคำนวณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดไฮโดรไควนินในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ

[TRHCl] (M)	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตรีปเข้า	สตรีปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตรีปเข้า	สตรีปออก
0.000125	23.01	21.92	0.00	0.84	10.84	10.42	2.84	2.92
0.000250	24.09	19.93	0.01	3.56	11.87	8.89	2.79	3.60
0.000500	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
0.000750	23.58	22.23	0.00	1.33	13.10	11.55	4.36	4.92
0.001000	21.36	20.48	0.00	0.91	7.43	6.96	2.69	2.95

[TRHCl] (M)	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตรีปเข้า	สตรีปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตรีปเข้า	สตรีปออก
0.000125	65.92	16.06	0.00	0.23	186.90	184.50	0.00	1.66
0.000250	66.80	12.69	0.00	0.42	191.00	166.50	0.00	9.57
0.000500	51.40	1.10	0.00	0.00	197.20	144.70	0.00	23.62
0.000750	56.00	4.45	0.01	0.45	238.25	230.25	0.00	3.15
0.001000	67.57	13.77	0.00	0.27	196.80	192.50	0.05	3.64

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_3]_{\text{strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.2 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดไฮโอไรดาซีนในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ

[TRHCl] (M)	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.000125	4.74	3.65	3.87	0.74	75.64	0.35	1.28	0.89
0.000250	17.27	14.74	25.11	6.82	81.00	0.63	12.83	5.01
0.000500	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
0.000750	5.73	5.64	11.83	4.27	92.05	0.79	3.36	1.32
0.001000	4.12	4.26	6.33	3.50	79.62	0.40	2.18	1.82

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_3]_{\text{strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.3 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ

[OA] (M)	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.000	33.28	26.87	0.00	3.68	13.56	10.82	0.00	1.07
0.025	32.36	23.14	0.00	6.39	18.72	10.25	1.46	3.97
0.050	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
0.125	31.41	21.59	0.00	6.38	16.21	9.66	0.00	2.36
0.250	42.00	29.34	0.00	6.50	16.68	11.15	1.44	2.95
0.375	41.23	33.26	0.00	5.17	18.82	13.93	1.96	3.15
0.500	41.16	37.35	0.00	2.12	17.44	16.13	2.27	2.81
[OA] (M)	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.000	116.0	7.22	0.00	0.05	452.6	382.8	0.03	23.75
0.025	124.8	5.49	0.00	0.00	442.3	348.4	0.00	39.60
0.050	51.4	1.10	0.00	0.00	197.2	144.7	0.00	23.62
0.125	106.3	0.00	0.00	0.00	448.3	348.5	0.07	41.66
0.250	139.0	0.73	0.10	0.24	235.7	181.1	0.00	14.28
0.375	135.5	0.51	0.03	0.77	223.3	191.2	0.00	6.72
0.500	134.1	0.57	0.05	0.49	218.3	211.6	0.00	6.15

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_3]_{\text{strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.4 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดกรดโอเลอิกในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และการนำกลับ

[OA] (M)	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.000	19.26	11.06	20.21	7.89	93.78	0.04	15.42	5.24
0.025	28.49	19.75	45.25	13.41	95.60	0.00	21.23	8.95
0.050	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
0.125	31.26	20.31	40.41	14.56	100.00	0.00	22.26	9.28
0.250	30.14	15.48	33.15	9.05	99.47	0.10	23.17	6.06
0.375	19.33	12.54	25.98	6.32	99.62	0.55	14.38	3.01
0.500	9.26	5.15	7.51	3.10	99.57	0.33	3.07	2.82

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_3]_{\text{strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.5 ข้อมูลการหาจำนวนโมลของสารสกัด OA ที่เข้าร่วมในปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กับสารสกัด TRHCl

[OA] (M)	log[OA]	Pd		Pt		Au		Cu	
		D	log D	D	log D	D	log D	D	log D
0.025	-1.60206	0.3984	-0.39963	0.8263	-0.08284	21.7322	1.337105	0.2695	-0.56941
0.050	-1.30103	0.5200	-0.28396	1.0965	0.040017	45.7273	1.660175	0.3628	-0.44031

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.025\text{-}0.050\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_3]_{\text{strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.6 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และการนำกลับ

pH of feed	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.50	38.68	33.51	0.06	3.68	17.59	14.79	0.00	0.87
1.00	31.62	25.60	0.14	5.32	19.70	16.44	0.00	1.74
1.50	35.31	27.43	0.08	8.02	17.66	12.28	0.00	2.36
2.00	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
2.20	32.90	24.22	0.10	6.42	6.67	4.11	0.00	0.72

pH of feed	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.50	74.0	2.09	0.00	0.00	228.8	208.4	0.00	6.58
1.00	78.9	0.69	0.00	0.24	447.2	390.4	0.00	33.32
1.50	97.5	1.47	0.00	0.42	444.5	363.2	0.03	45.84
2.00	51.4	1.1	0.00	0.00	197.2	144.7	0.00	23.62
2.20	78.8	8.36	0.00	0.43	446.4	377.7	0.00	41.81

สภาวะที่ทดลอง: [TRHCl]=0.0005M in CHCl₃ , [OA]=0.05M in CHCl₃ , [NaNO₃]_{strip}=0.03M, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.7 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และการนำกลับ

pH of Feed	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.50	13.37	9.36	15.92	4.95	97.18	0.00	8.92	2.88
1.00	19.04	16.38	16.55	8.83	99.13	0.30	12.70	7.45
1.50	22.32	22.49	30.46	13.36	98.49	0.43	18.29	10.31
2.00	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
2.20	26.38	19.21	38.38	10.79	89.39	0.55	15.39	9.37

สภาวะที่ทดลอง: $[TRHCl]=0.0005M$ in $CHCl_3$, $[OA]=0.05M$ in $CHCl_3$, $[NaNO_3]_{strip}=0.03M$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.8 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไนไตรต์ต่อการสกัด และการนำกลับ

[NaNO ₂] (M)	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.00	26.98	26.68	0.00	0.22	15.38	14.23	0.00	0.06
0.01	26.20	23.79	0.00	2.07	15.73	13.39	0.00	0.41
0.02	25.76	19.65	0.00	5.72	19.31	12.63	0.00	2.64
0.03	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
0.04	25.01	17.26	0.00	7.31	15.69	7.83	0.00	2.57
0.05	25.62	17.49	0.00	7.57	18.20	9.16	0.00	2.94

[NaNO ₂] (M)	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
0.00	82.90	0.45	0.00	0.00	231.80	228.30	0.36	1.08
0.01	80.50	0.00	0.00	0.00	232.50	229.50	0.51	3.32
0.02	78.00	0.00	0.00	0.00	231.30	203.10	0.66	9.11
0.03	51.40	1.10	0.00	0.00	197.20	144.70	0.00	23.62
0.04	82.00	0.12	0.00	0.00	243.30	179.50	1.00	33.49
0.05	78.70	0.14	0.00	0.00	235.00	179.20	1.25	34.08

สภาวะที่ทดลอง: pH_{Feed}=2, [TRHCl]=0.0005M in CHCl₃, [OA]=0.05M in CHCl₃, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.9 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัด และการนำกลับ

[NaNO ₂] (M)	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
0.00	1.11	0.82	7.48	0.39	99.46	0.00	1.51	0.31
0.01	9.20	7.90	14.88	2.61	100.00	0.00	1.29	1.21
0.02	23.72	22.20	34.59	13.67	100.00	0.00	12.19	3.65
0.03	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
0.04	30.99	29.23	50.10	16.38	99.85	0.00	26.22	13.35
0.05	31.73	29.55	49.67	16.15	99.82	0.00	23.74	13.97

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.10 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายสตริปต่อการสกัด และการนำกลับ

อัตราการไหล (ml/min)	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
100	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
150	34.10	26.99	0.06	6.18	17.44	12.34	6.40	8.70
200	32.92	26.46	0.02	5.32	17.13	13.37	7.20	8.61
300	33.15	30.43	0.00	2.47	17.84	15.81	8.03	8.64

อัตราการไหล (ml/min)	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
100	51.40	1.10	0.00	0.00	197.20	144.70	0.00	23.62
150	72.60	0.00	0.00	0.21	392.40	334.10	0.00	38.06
200	71.60	0.00	0.00	0.00	383.70	341.80	0.00	23.47
300	69.60	9.18	0.00	0.00	387.90	368.40	0.00	10.90

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_2]_{\text{Strip}}=0.03\text{M}$

ตาราง ก.11 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายstripline ไตรต์ต่อการสกัด และการนำกลับ

อัตราการไหล (ml/min)	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
100	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
150	20.85	17.95	29.24	13.19	100.00	0.29	14.86	9.70
200	19.62	16.10	21.95	8.23	100.00	0.00	10.92	6.12
300	8.21	7.45	11.38	3.42	86.81	0.00	5.03	2.81

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_2]_{\text{Strip}}=0.03\text{M}$

ตาราง ก.12 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัด และการนำกลับ

จำนวนรอบ (รอบ)	[Pd] ²⁺ (ppm)				[Pt] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
1	25.02	16.46	0.00	7.28	18.68	8.91	1.49	4.51
2	25.02	9.75	0.00	14.14	18.68	7.72	1.49	6.39
3	25.02	7.62	0.00	16.42	18.68	6.16	1.49	6.97

จำนวนรอบ (รอบ)	[Au] ³⁺ (ppm)				[Cu] ²⁺ (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
1	51.40	1.10	0.00	0.00	197.20	144.70	0.00	23.62
2	51.40	1.22	0.00	0.00	197.20	138.90	0.00	49.26
3	51.40	0.81	0.00	0.00	197.20	119.20	0.00	51.82

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_2]_{\text{Strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ตาราง ก.13 ข้อมูลร้อยละการสกัด และการนำกลับของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัด และการนำกลับ

จำนวนรอบ (รอบ)	Pd		Pt		Au		Cu	
	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
1	34.21	29.10	52.30	16.17	97.86	0.00	26.62	11.98
2	61.03	56.51	58.67	26.23	97.63	0.00	29.56	24.98
3	69.54	65.63	67.02	29.34	98.42	0.00	39.55	26.28

สภาวะที่ทดลอง: $\text{pH}_{\text{Feed}}=2$, $[\text{TRHCl}]=0.0005\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{OA}]=0.05\text{M}$ in CHCl_3 , $[\text{NaNO}_2]_{\text{Strip}}=0.03\text{M}$, Flow rate=100 ml/min

ภาคผนวก ข

คำนิยาม

ข.1 ร้อยละการสกัด (%Extraction)

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่สกัดได้}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น}}$$

ข.2 ร้อยละการนำกลับ (%Recovery)

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่นำกลับได้}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น}}$$

ข.3 ค่าอัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio, D)

$$D = \frac{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายอินทรีย์}}{\text{ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเอเควียส}}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ก ตาราง ก.2 พิจารณาข้อมูลที่ความเข้มข้นของ TRHCI เท่ากับ 0.000125 M ของแพลเลเดียม

ความเข้มข้นของแพลเลเดียมในสารละลายป้อนขาเข้า = 23.01 ppm

ความเข้มข้นของแพลเลเดียมในสารละลายป้อนขาออก = 21.92 ppm

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{23.01 - 21.92}{23.01} \times 100$$

$$= 4.74$$

(ดังตาราง ก.2)

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ก ตาราง ก.2 พิจารณาข้อมูลที่ความเข้มข้นของ TRHCI เท่ากับ 0.000125 M ของแพลเลเดียม

ความเข้มข้นของแพลเลเดียมในสารละลายป้อนขาเข้า = 23.01 ppm

ความเข้มข้นของแพลเลเดียมในสารละลายสตรีปขาเข้า = 0.00 ppm

ความเข้มข้นของแพลเลเดียมในสารละลายสตรีปขาออก = 0.84 ppm

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{0.84 - 0.00}{23.01} \times 100$$

$$= 3.65$$

(ดังตาราง ก.2)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2522 ที่อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี เป็นบุตรคนที่สองในจำนวนสามคนของ นายพิชัย และนางสุชาดา วิจิตรเฉลิมพงษ์ สำเร็จการศึกษาชั้นประถมจากโรงเรียนธีรศาสตร์ จังหวัดราชบุรี ในปี 2534 จากนั้นเดินทางเข้ากรุงเทพฯ เพื่อศึกษาในระดับมัธยมที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จนจบการศึกษาในปี 2539 และต่อมาศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ในปี 2543 ภายในปีเดียวกันนี้ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย