

การสกัดแลนทานัมไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายวิทยา นามสว่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

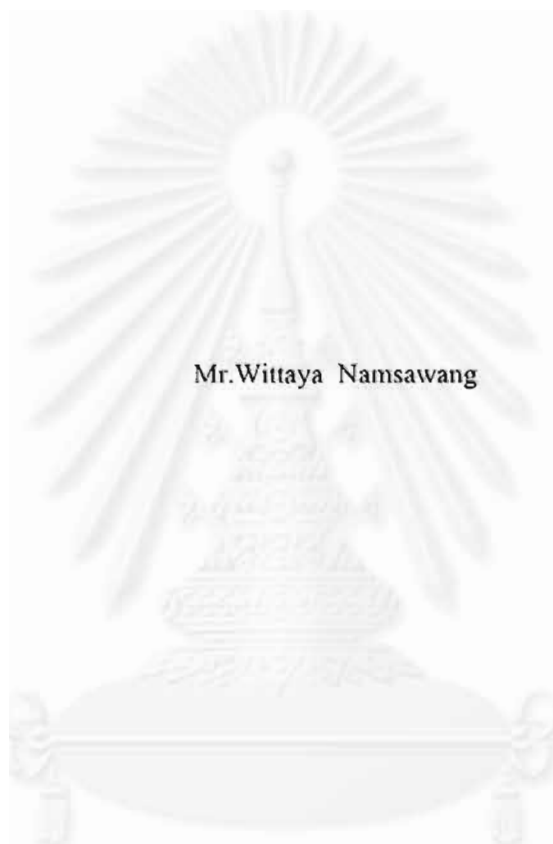
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-751-2

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF LANTHANUM IONS THROUGH
A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



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

Academic Year 1999

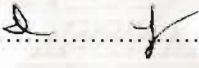
ISBN 974-333-751-2

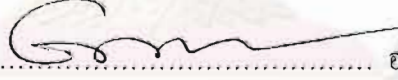
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสกัดแทนนัมไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย นายวิทยา นามสว่าง
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

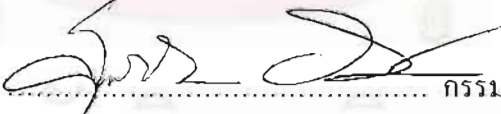
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

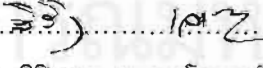

..... คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)


..... กรรมการ
(ดร. สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์)

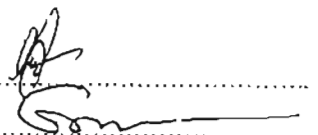
วิทยา นามสว่าง : การสกัดแลนทานัมไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (EXTRACTION OF LANTHANUM IONS THROUGH A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ, 100 หน้า ISBN 974-333-751-2

งานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบการสกัดแลนทานัมไอออนโดยใช้กรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก(D2EHPA) เป็นสารสกัดละลายในน้ำมันก๊าดเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลว สารละลายเยื่อแผ่นเหลวถูกพองไว้ในรูปหลอดกลวงของเส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำ และได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 1 ถึง 1000 ส่วนในล้านส่วน, ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 1.0 โมลต่อลิตร, ค่า pH ในสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเป็นกรด, ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปในช่วงความเข้มข้น 0.05 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร และการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร แต่เมื่อสารสกัดมีความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวล สำหรับความเข้มข้นของสารสกัดในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายโอนมวลจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 0.5 โมลต่อลิตร จากการทดลองนี้พบว่าค่า pH มีผลต่อร้อยละการสกัดโดยได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ pH เท่ากับ 2.5 และพบว่า การปรับ pH ในสารละลายป้อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกดีกว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีผลกระทบต่อการสกัดเมื่อใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.25 โมลต่อลิตร และสุดท้ายกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนี้สามารถเพิ่มความเข้มข้นให้กับแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีปโดยการแพร่จากสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังสารละลายสตรีปที่มีความเข้มข้นสูงกว่าได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



4170521321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

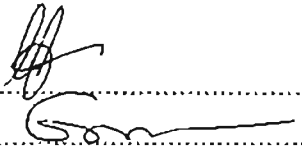
KEY WORD:

LANTHANUM/ EXTRACTION/ SUPPORTED LIQUID MEMBRANE/ HOLLOW FIBER
WITTAYA NAMSAWANG : EXTRACTION OF LANTHANUM IONS THROUGH A HOLLOW
FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSO. PROF. URA PANCHAROEN,
D.Eng.Sc. 100 pp. ISBN 974-333-751-2

The study investigated solvent extraction of lanthanum ion by using di(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) which is an extractant dissolved in kerosene as membrane solution. The membrane solution was carried out using a microporous hydrophobic hollow fiber membrane extractor. The effect of this process were also studied including the concentration of lanthanum ion in feed solutions in the range of 1 to 1000 ppm, the concentration of D2EHPA in membrane solutions in the range of 0.1 to 1.0 mol/l, the pH of feed solutions within the acidic-pH range, the concentration of sulfuric acid in strip solution in the range of 0.05 to 0.5 mol/l and concentrated lanthanum ion in strip solution.

The results of the experiment reveal that the molar flux of lanthanum ion increases in accordance with the concentration of lanthanum ion in feed solution when the concentration of D2EHPA is higher than 0.5 mol/l, but the concentration of lanthanum ion does not affect the molar flux of lanthanum ion when the concentration of D2EHPA is low. In addition, when the concentration of D2EHPA is in the range of 0.1 to 0.5 mol/l, the molar flux increases in accordance with an increase in the concentration of D2EHPA. However, the molar flux is constant when the concentration of D2EHPA is higher than 0.5 mol/l. Furthermore, the percentage of extraction is dependent on the pH of the feed solution, with the maximum value at pH 2.5. It has also been observed that the adjustment of pH by using hydrochloric acid in feed solution give higher molar flux than using buffer solution. Moreover, the extraction is not affected by sulfuric acid with the concentration higher than 0.25 mol/l. Finally, this process can increase the concentration of lanthanum ion in the strip solution by means of diffusing from the feed solution with lower concentration to the higher concentration in strip solution.

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือฉันนี่สิ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ ปานเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ดร.สิรินาฏ เลหาะโรจนพันธ์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ รวมทั้งขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติและสมาคมนิสิตเก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยและทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียนตามลำดับ ขอขอบคุณบริษัทไทยออยล์ จำกัด ที่เล็งเห็นความสำคัญของการวิจัยและได้ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมี และสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและให้ความรักความอบอุ่น และขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ประโยชน์ของธาตุแลนทานัม.....	3
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	10
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
2 ทฤษฎี.....	12
2.1 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว.....	12
2.2 เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน.....	12
2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ.....	15
2.3.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	15
2.3.2 ตัวรองรับชนิดเกลียววน.....	17
2.3.3 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลาง.....	19
2.4 กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบควบคู่.....	22
2.4.1 การถ่ายโอนมวลแบบสวนทาง.....	22
2.4.2 การถ่ายโอนมวลแบบไปด้วยกัน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 กลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว.....	26
2.6 ชนิดของสารสกัด.....	34
2.6.1 สารสกัดชนิดกรด.....	34
2.6.2 สารสกัดชนิดด่าง.....	35
2.6.3 สารสกัดชนิดขอลเวท.....	36
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 วิธีการทดลอง.....	42
3.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของ pH ในสารละลายป้อน และการเปรียบเทียบการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ควบคุม pH ให้คงที่กับการปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียว.....	42
3.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวและความเข้มข้นของแลนทานัม ไอออนในสารละลายป้อนที่มีต่อการสกัด.....	46
3.3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ในสารละลายสตรีป.....	48
3.3.4 การทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัม ไอออน.....	50
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
4.1 การทดลองเพื่อหาช่วงของความเป็น กรด-ด่าง (pH) ในสารละลาย ป้อนที่เหมาะสม.....	54
4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแลนทานัม ไอออนใน สารละลายป้อน.....	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ใน สารละลายเชื้อแผ่นเหลว.....	62
4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกใน สารละลายสตรีป.....	69
4.5 การทดลองเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน.....	71
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.....	98
ประวัติผู้วิจัย.....	100

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่	
2.1	แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลว13
2.2	แสดงกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....16
2.3	แสดงตัวรองรับแบบแผ่นม้วน.....17
2.4	แสดงตัวรองรับแบบเส้นใยกลาง.....19
2.5	แสดงโมดูลของเส้นใยกลาง.....20
2.6	แสดงการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน.....23
2.7	แสดงการถ่ายโอนมวลแบบไปด้วยกัน.....27
2.8	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน ของทองแดง.....30
3.1	สูตรโครงสร้างของสารสกัด.....39
3.2	แสดงอุปกรณ์ Liqui-Cel Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง.....40
3.3	แสดงโมดูลของเส้นใยกลาง.....40
3.4	แสดงปฏิบัติการการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว.....45
3.5	แสดงปฏิบัติการการไหลในลักษณะไหลวน.....52
4.1	แสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละการสกัดกับค่า pH ของสารละลายป้อน.....55
4.2	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการสกัดของการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ กับการปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียว.....56
4.3	แสดงค่าของร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน.....59
4.4	แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลกับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน.....60
4.5	แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA.....63
4.6	แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการคำนวณจากทฤษฎี.....67
4.7	แสดงลักษณะรูจุลภาคของเยื่อแผ่นรองรับ.....68
4.8	แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ในสารละลายสตรีป.....70
4.9	แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายสตรีป.....72
ก-1	แสดงการปรับมาตรฐานอัตราการไหลด้านในเส้นใยกลาง.....83
ก-2	แสดงการปรับมาตรฐานอัตราการไหลด้านนอกเส้นใยกลาง.....84
ก-1	แสดงการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดของตัวรองรับแบบ Flat sheet กับ Hollow fiber..98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 แสดงคุณสมบัติของโมดูลเส้นใยกลวง.....	41
ก-1 ข้อมูลการปรับมาตรฐานของมาตรวัดอัตราการไหลด้านท่อ.....	79
ก-2 ข้อมูลการปรับมาตรฐานของมาตรวัดอัตราการไหลด้านเปลือก.....	80
ข-1 แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เหลือที่ค่าความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกต่าง ๆ	83
ข-2 แสดงค่าร้อยละการสกัดของแลนทานัมไอออน ที่มีค่าความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกต่าง ๆ	83
ข-3 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออน ที่ค่าความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกต่าง ๆ	83
ข-4 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนหลังจากผ่านการสกัดที่ความเข้มข้น ของกรดซัลฟูริกต่าง ๆ	86
ข-5 แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เหลือ ที่ค่า pH..... และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ	87
ข-6 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนหลังจากผ่านการสกัดในแต่ละค่า pH ที่ปรับเปลี่ยน.....	88
ข-7 แสดงร้อยละการสกัดของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เหลือที่ค่า pH..... และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ	89
ข-8 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออน ที่ค่า pH และความเข้มข้น..... ของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ	90
ข-9 แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เหลือ (ppm.)..... ที่ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของ สารสกัดมีค่าต่าง ๆ กัน	91
ข-10 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนหลังจากผ่านการสกัด..... ในแต่ละค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่ปรับเปลี่ยน	92
ข-11 แสดงร้อยละการสกัดของแลนทานัมไอออน ที่ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน..... ในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่าง ๆ กัน	93
ข-12 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออน ที่ความเข้มข้นของแลนทานัม..... ไอออนในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่าง ๆ กัน	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-13	แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เวลาต่าง ๆ กัน จากการทดลองเพื่อเพิ่ม..... 95
	ความเข้มข้น
ข-14	แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนและสตริปที่เวลาใดๆ..... 96
ข-15	แสดงค่าการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลทางทฤษฎี..... 97
ค-1	แสดงการเปรียบเทียบของตัวรองรับ Flat sheet กับ Hollow fiber 99



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

k_f	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยา
k_r	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยา
r_f	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า
r_r	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ
K	ค่าคงที่สมดุล
K	ค่าคงที่สมดุลกรณีที่ตัดผลขององค์ประกอบที่มีอยู่น้อยออกไป
k_m	สัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficient) ของ M
k_a	สัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficient) ของ A
J	อัตราการถ่าย โอนมวล
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
γ	ความหนาแน่นเชิงโมล
t	เวลาที่ใช้ในการทดลอง
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวิทยาศาสตร์ละลายของน้ำ

ตัวยก

'	หมายถึงวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว
"	หมายถึงวิทยาศาสตร์ละลายของน้ำ

ตัวห้อย

o	หมายถึงที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว
l	หมายถึงที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตรีป
f	หมายถึงวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
s	หมายถึงวิทยาศาสตร์ละลายสตรีป

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากการมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกชั้นสูงมากมาย อาทิเช่น โทรศัพท์ติดตามตัว คอมพิวเตอร์ รถยนต์ความเร็วสูง ฯลฯ ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไม่ได้หยุดยั้งเพียงแค่นี้แต่ได้มีการพัฒนาเพื่อสนองความต้องการของมนุษย์ที่มีอย่างไม่สิ้นสุด โลหะวัสดุที่รู้จักกันดีจำพวก เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ดีบุก เป็นทรัพยากรที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลานาน โดยการเปิดเหมืองแร่จากเปลือกโลก สินแร่โลหะเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างฟุ่มเฟือยโดยไม่คำนึงถึงประโยชน์สูงสุดที่จะได้รับและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป จึงทำให้สินแร่โลหะเริ่มจะลดน้อยลงไปก่อปรการออกกฏหมายที่เข้มงวดมากขึ้น การวิจัยและพัฒนาโลหะวัสดุตลอดจนกระบวนการผลิตได้จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศ เพื่อแสวงหาวัสดุและกรรมวิธีในการผลิตที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดผลคุ้มค่าและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2539)

แลนทานัมเป็นธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่และเป็นธาตุแรกของอนุกรมธาตุแลนทาไนด์ (lanthanides series) ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 15 ธาตุ ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 - 71 แลนทานัมถูกค้นพบโดย C.G. Mosander ในปี พ.ศ. 2382 มาจกภาษากรีกว่า "lanthanein" แปลว่า "ถูกซ่อนอยู่" เพราะมันอยู่ในออกไซด์ผสม ซึ่งเชื่ออยู่นานถึง 36 ปีว่าเป็นซีเรียมบริสุทธิ์ แลนทานัมอาจถูกจัดอยู่ในหมู่ของธาตุหายาก (rare earth elements) ซึ่งหมายถึงธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์รวมกับอีก 2 ธาตุคือ อิตเทรียม (Y) และสแกนเดียม (Sc) (ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก : 29) เมื่อกว่าศตวรรษครึ่งมาแล้วนักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่าเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยเพราะเกาะกลุ่มกันอยู่ถึง 15 ธาตุและยากในการแยกให้เป็นธาตุบริสุทธิ์ แต่ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่ามี

ปริมาณไม่น้อยเหมือนชื่อของมัน แม้จะมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับเหล็กและอลูมิเนียม แต่ก็ยังมีปริมาณมากพอๆ กับสังกะสี และทองแดง และพบว่าธาตุแลนทานัมเป็นธาตุที่มีอยู่ในสินแร่โมนาไซต์ซึ่งเป็นสินแร่ที่ติดมากับการทำเหมืองแร่ดีบุก พบมากในจังหวัด ภูเก็ต พังงา ระนอง ชุมพร และจังหวัดอื่นๆ ในภาคใต้ สินแร่โมนาไซต์นอกจากจะพบตามแหล่งแร่ดีบุกแล้วยังสำรวจพบในบริเวณชายหาดตามชายฝั่งของทะเลอันดามันและบริเวณอ่าวไทย

ธาตุแลนทานัมและธาตุหายากตัวอื่นๆ เป็นทรัพยากรที่มีในประเทศอยู่ในรูปของสินแร่โมนาไซต์ (monazite) และซีโนไทม์ (xenotime) ซึ่งเป็นหางแร่จากการทำเหมืองดีบุกในประเทศไทย แต่มีค่าทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก ในอดีตสินแร่นี้ถูกนำไปขายให้ต่างประเทศในราคาถูกเพราะยังไม่มีเทคโนโลยีในการแยกธาตุ จนในช่วงปี พ.ศ. 2517 ได้มีการเรียกร้องจากหน่วยงานและองค์กรต่างๆ ให้รัฐบาลระงับการส่งออกสินแร่โมนาไซต์ออกนอกประเทศ ซึ่งต่อมารัฐบาลได้กำหนดนโยบายการพัฒนาควบคุม สงวนสินแร่โมนาไซต์ และแร่กัมมันตรังสีไว้ในประเทศ เมื่อเดือน มีนาคม พ.ศ. 2518 รัฐบาลได้ให้กรมทรัพยากรธรณี และสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ร่วมเป็นเจ้าของเรื่องจัดทำโครงการสกัด และแปรสภาพสินแร่โมนาไซต์ และได้รับการบรรจุไว้ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 4 เป็นต้นมา สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ใช้เวลาในการศึกษาวิจัย และทดลองแปรสภาพสินแร่โมนาไซต์เพื่อแยกธาตุผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้ และรายงานผลเสนอต่อรัฐบาล จนได้รับความเห็นชอบให้จัดสร้างโรงงานแปรสภาพโมนาไซต์ ขนาดปีละ 300 ตัน ในระหว่างปี พ.ศ. 2530-2538 (เอกสารเผยแพร่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก : 4) ในปัจจุบัน(พ.ศ.2541) สามารถดำเนินการผลิต ได้ในบางส่วนแต่ยังไม่สามารถดำเนินงานได้เต็มประสิทธิภาพ

กระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการ สกัดสมัยใหม่ที่ได้รับการพัฒนามาจากการสกัดแบบเคมี เป็นกระบวนการที่มีการลงทุนต่ำ ขั้นตอนการดำเนินงานไม่ยุ่งยาก ง่ายในการขยายขนาด โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง และมีค่าใช้จ่ายระหว่างการดำเนินงานที่ต่ำกว่า กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวมีจุดที่น่าสนใจหลายอย่างที่ น่าจะศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการสกัดแยก และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับสูงสุด

1.2 ประโยชน์ของธาตุแลนทานัม

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมสารเรืองแสง

1. ออกไซด์ร้อยละ 5-40% ผสมในแก้วเชิงทัศนศาสตร์ (optical glass) ซึ่งจะทำให้แก้วมีดัชนีการหักเหสูงและทำให้แสงผ่านได้มากถึง 99% เทียบกับแก้วทั่วไปแสงจะผ่านได้ในช่วง 85-90% มีประโยชน์ เช่น สำหรับทำเลนส์, ปริซึม, และใยแก้วนำแสง (optic fiber) (จดหมายข่าวศูนย์วิจัยธาตุหายาก, ฉบับที่ 3, 2539)
2. ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (glass electrode) สำหรับเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) และใช้ทำแก้วชนิดทนสารเคมี (จดหมายข่าวศูนย์วิจัยธาตุหายาก, ฉบับที่ 3, 2539)
3. ใช้ผลิตสารเรืองแสง (phosphor) ที่สำคัญ 3 ด้าน (จดหมายข่าวศูนย์วิจัยธาตุหายาก, 2539) ได้แก่
 - 3.1 ใช้ฉาบจอของหลอดภาพโทรทัศน์ (cathode ray tube)
 - 3.2 ใช้เคลือบหรือฉาบหลอดไฟฟ้า (fluorescent lighting phosphors)
 - 3.3 ใช้เคลือบจอคุณภาพจากการฉายรังสีเอกซ์ (X-ray screen phosphor)
4. สารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนระหว่างแลนทานัมกับทองแดงสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นสารตัวนำยิ่งยวด (superconductor) ที่อุณหภูมิ 30-40 K (Topp, 1965)

ประโยชน์ในด้านพลังงาน

5. แลนทานัม-นิกเกิลอัลลอยด์ (LaNi) สามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนเป็นปริมาณมากๆ ได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนัก และยังดูดซับและคายไฮโดรเจนด้วยอัตราที่สูงมาก ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกักเก็บไฮโดรเจนซึ่งมีปัญหาและเกิดอันตรายจากความดันสูงและการติดไฟได้ง่าย เป็นผลดีสำหรับการผลิตพลังงานสำหรับอนาคต
6. แลนทานัม-นิกเกิลอัลลอยด์ ถูกนำมาผลิตเป็นแบตเตอรี่แห้งชนิดที่สามารถเพิ่มประจุใหม่ได้ (rechargeable) ตระกูล nikel-metal hydride (ni-MH) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้ มีความจุไฟฟ้าสูงกว่า นิกเกิล-แคดเมียม ถึง 1.6-2 เท่าตัว นอกจากนี้ยังเกิดข้อดีที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษเหมือนแคดเมียมซึ่งเป็นโลหะหนัก (เอกสารเผยแพร่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก)

7. ใช้ในการผลิตพลังงาน แลนทานัมเกี่ยวข้องกับอย่างมากที่สุดกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิด solid oxide fuel cell (SOFC) ที่มีส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ทุกส่วนทำมาจากธาตุหายากเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้น โดยแลนทานัมเป็นส่วนประกอบในขั้วลบ (จดหมายข่าวศูนย์วิจัยธาตุหายาก, ฉบับที่ 3, 2538)

จากประโยชน์ของธาตุแลนทานัมที่กล่าวมาแล้ว ธาตุหายากตัวอื่นยังมีประโยชน์อีกมากมายในหลายๆ ด้าน ที่สำคัญ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา และแม่เหล็กถาวรในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

Konishi, Asai, Midoh et al. (1993) ได้นำไบโอโพลีเมอร์เจลจากกรดอัลจินิก (alginate) มาใช้ในการนำกลับธาตุสังกะสี แคลเซียม และแลนทานัมที่ละลายอยู่ในน้ำ โลหะจะถูกดูดซับโดยเม็ดเจลโดยใช้สารละลายกรดเกลือ(HCl) ที่เจือจางความเข้มข้น 0.1 kmol/m^3 การทดลองใช้วิธีแบบกะ (batch method)

ผลการทดลองพบว่า เจลสามารถดูดซับและสะสมโลหะ สังกะสี แคลเซียม และแลนทานัม จากสารละลายน้ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะ (sorption) และการคายกลับ (regeneration) ได้โดยใช้สารละลายกรดเกลือที่เจือจางความเข้มข้น 0.1 kmol/m^3 เมื่อนำเจลกลับมาใช้ใหม่ประสิทธิภาพจะไม่ลดลง เจลให้ค่าการดูดซับสูงสุด $3.78 \times 10^{-3} \text{ kmol/kg}$ และได้ค่าคงที่สมดุลเป็น 0.074, 0.125 และ 3.4 kg/m^3 สำหรับ สังกะสี แคลเซียม และแลนทานัมตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อค่าคงที่สมดุลสำหรับธาตุแลนทานัมน้อยมากในช่วงอุณหภูมิ 15 ถึง $35 \text{ }^\circ\text{C}$

Gaikwad และ Damodaram (1993) ศึกษาการสกัดธาตุโฮสเมียม (Ho) ด้วยกระบวนการสกัดด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้สารสกัด ได้แก่ 2-ethylhexyl phosphoric acid mono-2-ethylhexyl ester กรด naphthenic และกรด Versatic 10 รวมทั้งหาค่าคงที่สมดุลของแต่ละระบบสารสกัดจากสารละลายกรดไนตริก ตลอดจนกลไกการสกัดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Sugiura (1993) งานวิจัยนี้ได้ทำอัตราการถ่ายเทมวลของธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ผ่านเยื่อแผ่นเซลลูโลสไดอะอะซิเตด โดยมีสารผสมระหว่าง o-nitrophenyl n-octyl ether และ quaternary ammonium salts เป็นตัวทำละลายของเยื่อแผ่นเหลว มีสารสกัดคือ 4-benzoyl-3-methyl-1-phenyl-5-pyrazolone (BMPP) และ 4-trifluoroacetyl-3-methyl-1-phenyl-5-pyrazolone (TMPP) เป็นสารสกัด (carriers) ละลายในตัวทำละลาย ซึ่งเรียกระบบละลายนี้ว่า สารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ quaternary ammonium salts 5 ชนิด ได้แก่ didodecyldimethyl-, distearyldimethyl-, tetrahexyl-, tetraoctyl-, และ tetradecylammonium bromides [อ้างอิงเป็น $(C_{12})_2NBr$, $(C_{18})_2NBr$, $(C_6)_4NBr$, $(C_8)_4NBr$ และ $(C_{10})_4NBr$ ตามลำดับ]

ผลการทดลองแรก เยื่อแผ่นเหลวที่บรรจุ $(C_{12})_2NBr$ และ $(C_{18})_2NBr$ และใช้สารสกัด BMPP และ TMPP พบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่มีความเข้มข้น 0.1 M ของ $(C_{12})_2NBr$ และ $(C_{18})_2NBr$ ในสารสกัด BMPP จะให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอื่นๆ สำหรับธาตุแลนทานัมและซีเรียม เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 0.1 M ของ $(C_{12})_2NBr$ จะให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่าธาตุอื่น แต่อัตราการถ่ายเทมวลจะต่ำเมื่อใช้สารสกัด TMPP ซึ่งไม่เหมาะในการนำมาใช้กับธาตุอนุกรมแลนทาไนด์

ผลการทดลองที่สอง เปรียบเทียบเยื่อแผ่นเหลวที่บรรจุ $(C_6)_4NBr$, $(C_8)_4NBr$ และ $(C_{10})_4NBr$ เข้มข้น 0.1 M ในสารสกัด BMPP พบว่าเยื่อแผ่นเหลว $(C_6)_4NBr$ ให้อัตราการถ่ายเทมวลสูง

Sugiura และ Hirata (1993) เป็นงานวิจัยที่ทำต่อจากงานวิจัยแรก ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทมวลของธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ทั้ง 14 ธาตุผ่านเยื่อแผ่นชนิดเซลลูโลสไดอะอะซิเตด โดยมีสารผสมระหว่าง o-nitrophenyl n-octyl ether และ สารสังเคราะห์ phospholipids เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ของเยื่อแผ่นเหลว และมี 4-benzoyl-3-methyl-1-phenyl-5-pyrazolone (BMPP) และ hinokitiol (HIPT) เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้สารสังเคราะห์ phospholipids ที่เป็นตัวแปรในการศึกษาได้แก่ didecanoil, dilauroyl, และ dimyristoyl- α -phosphatidylcholines [อ้างอิงเป็น $C_{10}PC$, $C_{12}PC$ และ $C_{14}PC$ ตามลำดับ] ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ BMPP เป็นสารสกัดพบว่าให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นตามรัศมีของไอออนธาตุอนุกรมแลนทาไนด์ และมีค่าสูงสุดที่ธาตุดิสโพรเซียมหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงของธาตุพาสซีโอเดียมจนถึงธาตุแลนทานัม ผลของตัวแปรที่ศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความ

ยาวของหมู่อัลคิลในสารสังเคราะห์ phospholipids จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลง สำหรับสารสกัด HIPT อัตราการถ่ายเทมวลมีลักษณะคล้ายกันกับสารสกัด BMPP แต่จะให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มอย่างมากในช่วงของธาตุเออเบียม และยูโรเปียมหลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทมวลจะเริ่มลดลง

Kubota, Goto, Nakashio et al. (1995) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ที่เกี่ยวกับสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุหายากกับสารละลายของ 2-ethylhexyl phosphonic acid Mono-2-ethylhexyl Ester ซึ่งเป็นสารสกัดใน n-heptane สารละลายนี้จะถูกเคลือบฝังในเยื่อแผ่นที่พองด้วยเส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ ผลกระทบที่เกิดจากความเข้มข้นของธาตุในสารละลายน้ำ และความเข้มข้นของตัวสกัดในสารละลายอินทรีย์ได้ถูกตรวจสอบ และแสดงให้เห็นถึงกลไกการสกัดในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลจากการทดลองสามารถทำนายได้ว่าอัตราการสกัดถูกควบคุมโดยการแพร่ในสารละลายของน้ำและในสารละลายอินทรีย์ และโดยปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน และได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการสกัด คือ

$$P_M = J_M / C_{MO} = EQ_M / 2\pi r_1 L$$

$$P'_M = J'_M / C_{MR33HRO} = E' Q_{ORG} / 2\pi r_1 L$$

เมื่อ $P'_M, P_M =$ permeabilities for the stripping and extraction

$J'_M, J_M =$ the average stripping and extraction rates

$Q_{ORG}, Q_M =$ the volumetric flow rates of aqueous and organic solutions

$E', E =$ the extents of metal extracted and striped

$r, L =$ radius of tube and length respectively

Kataoka, Nishiki, Muto et al. (1995) งานวิจัยนี้นำเสนอกลไกการสกัดธาตุแลนทานัมโดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวชนิดพอง (supported liquid membranes) ซึ่งใช้เยื่อพองชนิดเทฟลอน (teflon millipore membrane) ภายในบรรจุสารละลายกรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (HDEHP) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัด ละลายในเคโรซีนและยึดเกาะในเยื่อแผ่นพองด้วยแรงคาпилลารี (capillary forces) เยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างสารละลายน้ำที่มี pH ต่างกันคือด้านสกัดและด้านสกัดแลนทานัมจะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นและถ่ายเทมวลจากด้านของสารละลายน้ำที่มี pH สูงมายังด้านที่มี pH ต่ำ งานวิจัยนี้ได้ทำการ

ตรวจสอบผลของความเข้มข้นของสารนำพาในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายน้ำในด้านสกัดและด้านสตรีป และ pH ของสารละลายน้ำที่มีต่ออัตราการซึมผ่าน (permeation of lanthanum) และได้ศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งพบว่าจะทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง ผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการซึมผ่าน (permeation model) พบว่าอัตราการซึมผ่านสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้โดยแบบจำลอง การซึมผ่านที่รวมปฏิกิริยาการสกัดและปฏิกิริยาการสตรีปที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน รวมทั้งการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวและการแพร่ของแลนทานัมในฟิล์มบางๆ เข้าไปในเยื่อแผ่นเหลว

Urbanski, Fornari, Abbruzzese (1996) ได้ศึกษาสมดุลการสกัดธาตุซีเรียม(Ce)และแลนทานัม(La) ในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยใช้สารสกัด LIX 54 ในตัวทำละลาย n-heptane จากการศึกษาพบว่าสมดุลของการสกัดธาตุทั้งสองจะขึ้นอยู่กับ pH ความเข้มข้นของสารสกัด แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของคลอไรด์ สำหรับความเข้มข้นของธาตุแลนทานัมจะไม่มีผลต่อการสกัด เมื่อความเข้มข้นเกิน 0.05 M แต่ในความเข้มข้นของธาตุซีเรียมเกิน 1.5 mM จะทำให้ค่าการสกัดลดลง และพบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุทั้งสองที่เกิดขึ้นกับสารสกัดคือ CeR_3 และ $LaR_3 \cdot 3HR$ จะได้ค่าคงที่สมดุลของการสกัดสำหรับ CeR_3 มีค่าเท่ากับ $\log K_{ex} = -15.67$ สำหรับ $LaR_3 \cdot 3HR$ ค่าเท่ากับ $\log K_{ex} = -14.2$ และถ้าสมมุติให้เกิดสารประกอบของธาตุแลนทานัมเป็น LaR_3 จะได้ค่าคงที่สมดุลเท่ากับ $\log K_{ex} = -18.2$ เกิดการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการละลายเป็น 7.3 kJ/mol. และการใช้สารสกัด LIX 54 จะสกัดธาตุซีเรียมได้ดีกว่าธาตุแลนทานัม และจะให้ค่าการคัดเลือก (selectivity) สูงเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1 M

Thamphiphit (1996) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดและการนำกลับโคบอลต์ในขั้นตอนเดียวกันจากสารละลายน้ำโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนในช่วง 5000 ถึง 10000 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อนในช่วงความเป็นกรด ชนิดของสารละลายสตรีปซึ่งใช้สารละลายกรดออกซาลิกและกรดเกลือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่วง 100 ถึง 1000 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย D2EHPA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายอินทรีย์สองชนิดคือ โทลูอีนและนอร์มัลโคเดเคน ความเข้มข้นร้อยละ 10 ถึง 25 โดยปริมาตร

ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดออกซาลิกไม่สามารถใช้เป็นสารละลายสตริปได้ในระบบนี้ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรดเกลือเป็นสารละลายสตริป ไอออนโคบอลต์มากกว่าร้อยละ 50 ถูกสกัดและดึงกลับหลังจากการหมุนเวียนรอบที่สามของการดำเนินการลักษณะการไหลผ่านครั้งเดียว ในการเปรียบเทียบกับการทดลองแบบกะ โดยการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งการสกัดและการดึงกลับเกิดขึ้นแยกกัน แฟกเตอร์การสกัด (extraction factor) และแฟกเตอร์การดึงกลับ (recovery factor) เพิ่มมากกว่าสี่เท่า

Liu และ Zhang (1997) ได้ศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ความต้านทานการถ่ายเทมวลในวัฏภาคภายในและวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลว ปฏิริยาที่ผิวสัมผัส และการแตกของอิมัลชัน การทดลองใช้ธาตุซาแมเรียม (Sm) ในกระบวนการสกัดแบบอิมัลชัน โดยมีสารละลายเชื่อมแผ่นเหลวของ สารสกัด D2EHPA ละลายในเคโรซีน พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ได้ดีกับธาตุหายาก โดยระบบนี้

Correa, Arbilla และ Carvalho (1998) Countercurrent electromigration (CCEM) เป็นเทคนิค ที่พัฒนามาจากอิเล็กโตรโคอะไลซิส โดยผู้ที่ริเริ่มเป็นคนแรกคือ K.Nagener ในทศวรรษที่ 60 เพื่อใช้ สำหรับแยกโลหะอัลคาไลน์ หลังจากนั้น J.A. Medeiros ได้นำมาทดลองในงานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัด โลหะหนัก I.B.Alleluia และ I.Nukatsuka และคณะ นำเทคนิคนี้มาใช้ในการแยกธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ B.A.Bilal และคณะ ได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการแยกธาตุในกลุ่มแอกทิไนด์จากน้ำที่มีสารรังสี หลังจากนั้น M.S. Caraalho นำมาใช้ในการแยกยูเรเนียมและทอเรียม

สำหรับงานวิจัยล่าสุดของ S.M.Correa และคณะ ได้นำเทคนิคนี้มาแยก ธาตุซาแมเรียม(90%) และ ธาตุยูโรเปียม (10%) ในสารละลายผสม α -hydroxy isobutanic acid (α -HIBA) จะทำให้สามารถแยก ธาตุซาแมเรียมได้บริสุทธิ์ 99.9 % โดยมี equilibrium ของ multicoordinate complexes ของแต่ละ ธาตุที่จะแยกกับ α -hydroxy isobutanic acid เป็นตัวแปรในกระบวนการแยกนี้ และได้ศึกษากระบวนการ และจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น ในการทดลองนี้ได้ใช้ความต่างศักย์ 1700 V กระแสไฟฟ้า 90 mA ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 88 ชั่วโมง โดยสารละลายที่นำมาแยกประกอบด้วย ธาตุซาแมเรียม และยูโรเปียม ในอัตรา 9 : 1 ละลายในสารละลาย 0.01 M α -hydroxy isobutanic acid

วีรวัฒน์ ปัดทวิงคา (1998) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตดที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเตรียมจาก D2EHPA ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 10% โดยปริมาตรในตัวทำละลาย น้ำมันก๊าด Jet A-1 สารละลายป้อนเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสี 100 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตรีปเป็นสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ผลการศึกษาแสดงว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการโดยไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงเมื่อความเข้มข้นเป็น 0.9% โดยปริมาตร ในขณะที่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์เข้าร่วมในกระบวนการเพื่อทำให้ได้ประสิทธิภาพเท่ากันจะใช้สารสกัดเข้มข้นเพียง 0.5% โดยปริมาตร สัดส่วนของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อสารละลายป้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 1 : 50 และอัตราการไหลสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดลง จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบประมาณ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

อิศรา เกษมเศรษฐ (1998) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 25 โดยปริมาตรชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX84-I และสารสกัด LIX860-I ความเข้มข้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด - ด่าง ของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ และการไหลเวียน (circulation) วัฏภาคสารละลายสตรีป สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันก๊าด Jet A-1 โดยสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายสตรีป

ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน และความเป็นกรดและด่างเท่ากับ 5 รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับและไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

ไพศาล อภิณหพัฒน์ (1998) งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัดและการนำกลับธาตุโครเมียม(VI) ในรูปของโครเมตในสารละลาย โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย เมธิลไตรออกซิลเอมโมเนียมคลอไรด์เป็นสารสกัดละลายในน้ำมันก๊าด Jet A-1 และมีโคเดคานอลเป็นตัวประสาน ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมตในสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป

ผลการทดลองพบว่า ปฏิริยาการสกัดเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าปฏิริยาการนำกลับ การสกัดและการนำกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดและค่าเริ่มต้นในสารละลายป้อนต่ำลง หรืออัตราการไหลของสารละลายต่ำลง แต่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมตในสารละลายป้อนมีค่าต่ำกว่า 60 ส่วนในล้านส่วน โคเดคานอลทำให้การสกัดและการนำกลับโครเมตดีขึ้นมากโดยการใช้ความเข้มข้นไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อและไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง ไม่มีผลต่อการสกัดและนำกลับ

1.4 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแลนทานัมไอออนโดยกระบวนการการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane)
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสกัดธาตุแลนทานัม โดยมีตัวแปรที่จะศึกษาดังต่อไปนี้คือ
 - 2.1 ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนและสารละลายสตริป
 - 2.2 ความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายป้อน
 - 2.3 ความเข้มข้นของสารนำพา D2EHPA ในสารละลายอินทรีย์
 - 2.4 ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตริป

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการแยกสกัดสารละลายเลนทาน้ำมันไอออน โดยใช้สารละลายกรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA) เป็นสารสกัดละลายในน้ำมันก๊าด (kerosene) ชนิด Jet A-1 ในช่วงความเข้มข้น $0.05 - 1.00 \text{ mol/dm}^3$
2. ความเข้มข้นของสารละลายเลนทาน้ำมันไอออนอยู่ในช่วง 1-1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)
3. ควบคุมความเป็นกรดและค่าของสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ของโซเดียมคลอไรด์ กับกรดไฮโดรคลอริกที่ความเป็นกรดและค่า 2 - 3 และสารละลายบัฟเฟอร์ของ โซเดียมอะซิเตทกับกรดอะซิติกที่ความเป็นกรดและค่า 3 - 6
4. สารละลายสกัดควบคุมความเป็นกรดและค่าโดยใช้กรดซัลฟูริก ในช่วง $0.1-0.5 \text{ mol/dm}^3$

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการศึกษา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดเลนทาน้ำมันด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรมในการสกัดแยกสินแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมาแปรรูปให้อยู่ในรูปแบบของธาตุบริสุทธิ์ ซึ่งจะสามารถนำธาตุนั้นไปพัฒนาเทคโนโลยีในด้านอื่นๆ ต่อไป
3. ถ้างานวิจัยนี้ได้ผลการสกัดที่ดี จะทำให้กระบวนการสกัดด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวเป็นทางเลือกใหม่ที่ดีกว่า เพราะกระบวนการมีการลงทุนและค่าการดำเนินงานที่ต่ำ อีกทั้งยังใช้ปริมาณของสารสกัดที่น้อย ทำให้เกิดการคุ้มทุนในระยะเวลาอันรวดเร็ว

บทที่ 2

ทฤษฎี

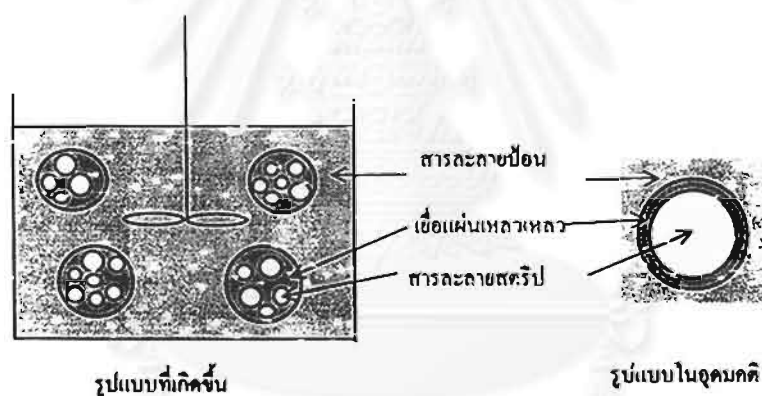
2.1 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane processes)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว เป็นชื่อ กระบวนการที่มีทั้งกระบวนการสกัด (extraction process) และกระบวนการนำกลับ (stripping process) รวมไว้ในขั้นตอนเดียวกัน (Mat และ Kopp, 1982: 44) ประกอบด้วยของเหลวสามวัฏภาค โดยมีวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) เป็นวัฏภาคที่กั้นระหว่างสองวัฏภาคที่ละลายซึ่งกันและกันได้ ซึ่งในสองวัฏภาคนี้จะมีวัฏภาคหนึ่งเป็นวัฏภาคที่ประกอบด้วยตัวถูกละลายหลายชนิดผสมกันอยู่ เรียกว่า วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) และอีกวัฏภาคเรียกว่า วัฏภาคสารละลายสตริป (stripping phase) มีหน้าที่รับเอาตัวถูกละลายที่ต้องการแยกออกมาไว้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวตามโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (emulsion liquid membranes) และเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membranes)

2.2 เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (emulsion liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ประกอบด้วย 3 วัฏภาคคือ วัฏภาคที่หนึ่ง เรียกว่า วัฏภาคภายใน (internal phase) ทำหน้าที่รับเอาตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดไว้ วัฏภาคที่สอง เรียกว่า วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) เป็นวัฏภาคที่กั้นระหว่างสองวัฏภาคที่ละลายซึ่งกันและกัน และวัฏภาคที่สาม เรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) เป็นวัฏภาคที่มีตัวถูกละลายที่ต้องการสกัด (Frankenfeld และ Li, 1987: 840-841)

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายวัตถุภาคภายในและวัตถุภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูง จนเกิดเป็นอิมัลชันที่มีเยื่อแผ่นเหลวห่อหุ้มวัตถุภาคภายในไว้ วัตถุภาคภายในที่อยู่ในวัตถุภาคเยื่อแผ่นเหลวจะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ หลากๆ เม็ด โดยปกติอิมัลชันที่เกิดขึ้นมักไม่เสถียรจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ในวัตถุภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อรักษาเสถียรภาพขณะปฏิบัติการ จากนั้นจึงกระจายเม็ดอิมัลชันเข้าไปในวัตถุภาคต่อเนื่อง เม็ดอิมัลชันที่เติมลงไปจะไม่ละลายกับวัตถุภาคต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นอิมัลชันซ้อน (double emulsion) ทำให้เกิดการสกักและนำกลับในขั้นตอนเดียวกัน โดยการถ่ายโอนมวลในระบบนี้จะเกิดในทิศทางจากวัตถุภาคต่อเนื่องไปยังวัตถุภาคภายใน การถ่ายโอนจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนวัตถุภาคภายในมีความเข้มข้นเพียงพอต่อความต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายจึงแยกอิมัลชันออกจากวัตถุภาคต่อเนื่องแล้วทำการแตกอิมัลชันเพื่อแยกวัตถุภาคภายในออกจากวัตถุภาคเยื่อแผ่นเหลว สารละลายเยื่อแผ่นเหลวก็จะถูกนำกลับไปใช้เตรียมอิมัลชันต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งได้เป็นสองชนิด (Ho และ Li, 1992; Mat และ Kopp, 1982; Frankenfeld และ Li, 1987: 840-841) ได้แก่

1. เยื่อแผ่นเหลวของน้ำในน้ำมัน (water-in-oil (W/O) emulsion) เกิดขึ้นในกรณีวัตถุภาคภายในเป็นสารละลายของน้ำ
2. เยื่อแผ่นเหลวของน้ำมันในน้ำ (oil-in-water (O/W) emulsion) เกิดขึ้นในกรณีวัตถุภาคภายในเป็นสารละลายอินทรีย์

เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวัฏภาคต่อเนื่องซึ่งเป็นสารละลายน้ำ ระบบจะเรียงลำดับจากวัฏภาคด้านในไปยังด้านนอกดังนี้ น้ำ/น้ำมัน/น้ำ (W/O/W) ในทำนองเดียวกันอิมัลชันของน้ำมันในน้ำจะเรียงเป็น น้ำมัน/น้ำ/น้ำมัน (O/W/O) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภทได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactants) ใช้สำหรับอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic surfactants) ใช้สำหรับอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ

กระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน โดยทั่วไป วัฏภาคภายในมีลักษณะเป็นเม็ดที่ถูกห่อหุ้มไว้ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 ไมโครเมตร เพื่อให้เกิดเสถียรภาพระหว่างปฏิบัติการ และขนาดของหยดอิมัลชันที่ทำหน้าที่เป็นเชื่อมแผ่นเหลวควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.1 – 2 มิลลิเมตร (Frankenfeld และ Li, 1987: 840-841) ทำให้ได้พื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคภายในกับวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลวประมาณ 10^6 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลวกับวัฏภาคต่อเนื่องประมาณ 3000 – 4000 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นว่าเชื่อมแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมีจุดเด่นที่มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงมาก และสามารถนำสารละลายเชื่อมแผ่นเหลวกลับมาใช้ใหม่ได้

ถึงแม้ว่าเชื่อมแผ่นเหลวชนิดนี้จะมีพื้นที่การถ่ายโอนมวลสูง แต่ก็มีข้อเสียที่เกิดจากการต้องทำให้อิมัลชันมีความเสถียร จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้กลไกการถ่ายโอนมวลมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลต่อพื้นที่สัมผัสมีค่าต่ำ เพราะสารลดแรงตึงผิวจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางบริเวณพื้นผิวสัมผัสมีผลทำให้เกิดความต้านทานการถ่ายโอนมวล และต้องแตกอิมัลชันออกเมื่อวัฏภาคภายในมีความเข้มข้นมาก ทำให้กระบวนการไม่ต่อเนื่อง วิธีการพื้นฐานในการแตกอิมัลชันมีสองวิธีคือ การบำบัดทางเคมี (chemical treatment) โดยการเติมสารลดการประสาน (demulsifier) ลงไปในอิมัลชัน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่สารลดการประสานอาจเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารละลายเชื่อมแผ่นเหลวทำให้เสื่อมประสิทธิภาพ และการบำบัดทางกายภาพ (physical treatment) (Tavlarides, 1987) โดยการใช้ประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกัน และมีความเหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์ แต่อุปกรณ์ที่ใช้จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน

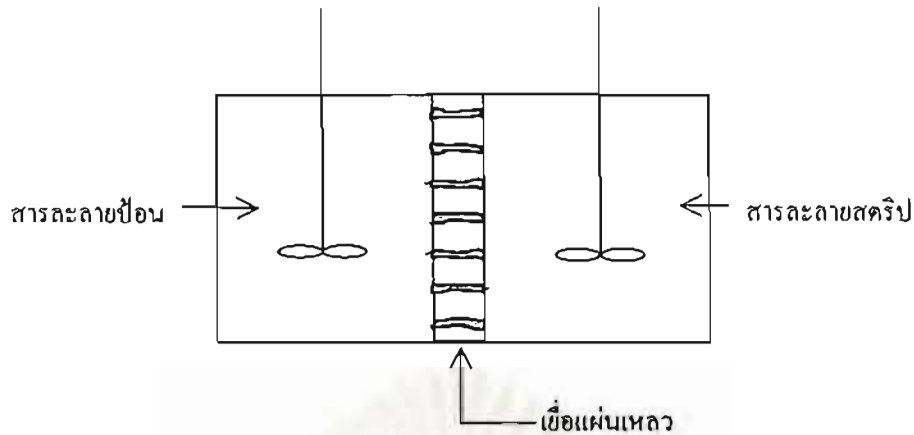
2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ หมายถึง เยื่อแผ่นเหลวที่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคที่ไม่เคลื่อนที่ และถูกยึดตรึงไว้ในรูพรุนจุลภาค (micropore) ของเยื่อแผ่น (solid membrane) ที่ส่วนใหญ่ทำมาจากพอลิเมอร์ โดยสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดตรึงไว้ในรูพรุนจุลภาคด้วยแรงตึงผิวคาпилลารี (capillary force) และแรงยึดเหนี่ยวทางอิเล็กตรอน (electron affinity) ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิต (Schulz, 1988: 191-202; Huang และ Juang, 1987: 209-226) เยื่อแผ่นจะมีคุณสมบัติ 2 ลักษณะตามสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้คือ เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำ เยื่อแผ่นชนิดนี้จะยอมให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำผ่านเข้าไปในรูจุลภาค และเยื่อแผ่นชนิดที่ไม่ชอบน้ำเป็นเยื่อแผ่นที่ยอมให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวถูกละลายเป็นสารอินทรีย์ผ่านเข้าไปในรูพรุนจุลภาคได้

เยื่อแผ่นเหลวชนิดพองด้วยตัวรองรับสามารถแบ่งตามอุปกรณ์ที่เป็นตัวรองรับได้ 3 แบบ ได้แก่ ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (flat sheet), ตัวรองรับชนิดเกลียววน (spiral-wound module) และตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

2.3.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (flat sheet)

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ความพรุน (porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ อาทิเช่น โพลีโพรไพลีน (PP) โพลีซันโฟลน (PF) โพลีเตตระฟลูออโรเอททีลีน (PTFE) เป็นต้น โดยแผ่นตัวรองรับซึ่งยึดพองเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารป้อนและวัฏภาคของสารละลายสตรีป มีลักษณะการนำไปใช้งาน ดังรูปที่ 2.2



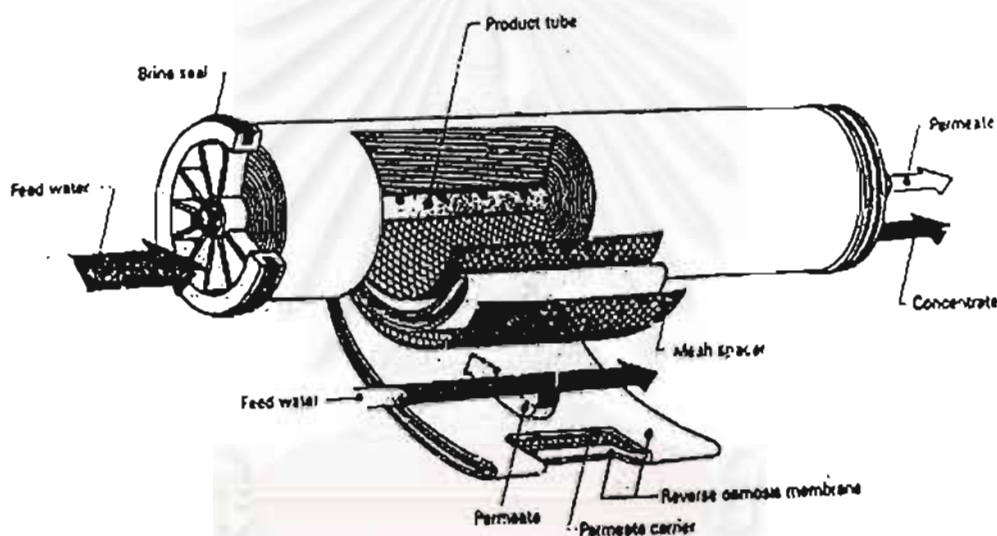
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการเชื้อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

จากรูปที่ 2.2 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง โดยที่เชื้อแผ่นเหลวเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ ในกระบวนการประกอบไปด้วย 3 วัสดุนั้นคือวัสดุของสารป้อนซึ่งเป็นวัสดุของสารละลาย วัสดุของเชื้อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ และวัสดุของสารละลายสตริปซึ่งเป็นวัสดุของสารละลายโดยมีแผ่นตัวรองรับที่มีความพรุนสูงกั้นกลางระหว่างวัสดุของสารป้อนกับวัสดุของสารละลายสตริป รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับจะเป็นแหล่งยึดพองเชื้อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุที่เกิดขึ้นทั้งในฝั่งของสารป้อนกับฝั่งของสารละลายสตริปที่สัมผัสกับเชื้อแผ่นเหลวจะเกิดการถ่ายโอนมวลตามกลไกการสกัด และเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดจากการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลด้วยการปั่นกววนวัสดุของสารป้อนและวัสดุของสารละลายสตริป

จากกระบวนการเชื้อแผ่นเหลวจะถูกยึดพองไว้ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ ทำให้เชื้อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเชื้อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะผ่านเชื้อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัดและยากต่อการบำบัดอีกด้วย ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางจะมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ก็ยังพบว่าเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ยังมีข้อดีอยู่หลายประการ อาทิเช่น มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่ำกว่าเชื้อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันหลายเท่า มีความยุ่งยากในการเตรียม และเสถียรภาพของเชื้อแผ่นเหลวมีขอบเขตจำกัดเช่นกัน (วีรวัดณ์ ปัททวีงศา, 2541: 24-26)

2.3.2 ตัวกรองรับชนิดเกลียววน (spiral-wound module)

ตัวกรองรับชนิดเกลียววนเป็นตัวกรองรับที่พัฒนามาจากตัวกรองรับชนิดแผ่นบางโดยการม้วนห่อตัวกรองรับชนิดแผ่นบางเป็นเกลียววน เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรให้สูงขึ้น และลดการตีควนโดยเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารละลายให้ขนานไปกับผิวสัมผัสของตัวกรองรับ ซึ่งทำให้แรงจากการไหลไม่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น (Teramoto et al., 1987: 2175-2201; Schulz, 1988: 191-202) ลักษณะของตัวกรองรับชนิดเกลียววนและลักษณะการไหลของวัฏภาคต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงตัวกรองรับแบบแผ่นม้วน (Scott, 1995: 153)

จากรูปที่ 2.3 การเรียงและม้วนห่อตัวกรองรับเป็นเกลียววนนอกจากจะทำให้ความยาวของตัวกรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นพื้นที่การถ่ายโอนมวลแล้ว ยังสามารถเรียงซ้อนตัวกรองรับเป็นชั้นๆ โดยการเรียงสลับกันเพื่อแบ่งชั้นวัฏภาคต่างๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ในการสกัด ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (Teramoto et al., 1987: 2175-2201) ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวกรองรับชนิดเกลียววนจะมีเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวได้รับการพุงไว้และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิว และมี

สัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ตาม ยังพบว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนก็ยังมีข้อดีอยู่หลายประการ อาทิเช่น มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาก การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากซับซ้อนและตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ยากกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง อีกทั้งเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวก็มีอายุการใช้งานจำกัดเช่นเดียวกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดเยื่อแผ่นบาง (วีรวุฒิ ปัตทวิวงศ์, 2541: 27-28)

ตัวรองรับชนิดเกลียววนถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในกระบวนการบำบัดน้ำกร่อยและน้ำทะเล โครงสร้างของตัวรองรับชนิดเกลียววนเกือบทั้งหมดเพื่อใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นโดยทั่วไปทำมาจากเซลลูโลสอะซิเตทและโพลีเอไมด์ อุปกรณ์แบบเกลียววนจะทำมาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ถูกม้วนอยู่รอบแกนกลางที่ทำมาจากโพลิไวนิลคลอไรด์ หรือโพลีโพรไพลีน และแกนกลางจะถูกเจาะเป็นรูเพื่อให้สารซึมผ่านรูที่เจาะ เยื่อแผ่นทั้งสองแผ่นจะถูกยึดติดและแยกออกด้วยโครงสร้างที่ทำมาจากจากโพลีเอสเตอร์ หรือดาข่ายพลาสติกอย่างบางที่ถูกปิดแน่นที่ขอบโดยสารยึดติดโพลียูรีเทน การคัดแปลงเยื่อแผ่นให้เป็นชั้น (membrane sandwich) ที่ถูกม้วนอยู่รอบแกนกลางท่อโครงสร้างที่ทำมาจากจากโพลีเอสเตอร์ หรือดาข่ายพลาสติกจะยอมให้สารซึมผ่านเยื่อแผ่นได้ แผ่นดาข่ายจะถูกตั้งไว้เพื่อเสริมความแข็งแรงเมื่ออัดแรงดันสูงๆ แผ่นด้านหนึ่งของชั้นและ เยื่อแผ่นบางหลายๆ ชั้นจะถูกม้วนขึ้นโดยรอบแกนกลาง เพื่อทำการประกอบเป็นโมดูล ซึ่งสามารถถูกติดตั้งภายในท่อความดัน สารจะถูกป้อนเข้าที่ปลายด้านหนึ่งและแผ่นอัดจะถูกปิดแน่นรอบเส้นรอบวงภายนอกของโมดูลเพื่อไม่ให้สารผ่านระหว่างเยื่อแผ่น งานยึดติดจะถูกติดตั้งไว้ที่ปลายโมดูลเพื่อป้องกันการรั่วของโมดูลภายใต้ความดันสูงที่ถูกใช้

การออกแบบจะถูกออกแบบให้ป้อนสารป้อนเข้าที่แกนกลางแล้วผ่านรูของแกนกลาง และไหลเข้าไปในเยื่อแผ่นบางแบบเกลียววนไปยังศูนย์กลาง แผ่นม้วนจะถูกม้วนไว้ในไฟเบอร์กลาสส์ เทป หรือตัวห่อหุ้มที่ยึดตัวได้ เพื่อให้เกิดความแข็งแรงในการปฏิบัติการ โดยทั่วไปโมดูลอาจจะทำงานที่ร้อยละการนำกลับ 8-10 เท่านั้น และสารที่มีองค์ประกอบสีถึงเจ็ดตัวจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันแบบอนุกรมในท่อความดันเดี่ยวซึ่งอาจจะทำการเพิ่มความยาวไปถึง 7 เมตร เพื่อให้ได้ร้อยละการนำกลับ เป็น 50 โมดูล โดยทั่วไปจะมีขนาดพื้นที่ของผิวสัมผัสโดยรอบเท่ากับ 5 ตารางเมตร ที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.1

เมตร เมื่อกระบอกกลมมีความยาว 1 เมตร มีค่าผลิตผลที่ได้เท่ากับ 7 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โมดูลทั้งหมดใหญ่และขนาดเล็กจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 เมตร ถึง 0.3 เมตร การไหลของสารในท่อเกลียววนโดยทั่วไปจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) และ ในบางครั้งจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ซึ่งจะเกิดขึ้นโดยช่องว่างจึงอาจจะเกิดการสะสมความเข้มข้นด้านทานการถ่ายโอน (concentration polarisation) ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องใช้การบำบัดขั้นต้น (Scott, 1995: 152-153)

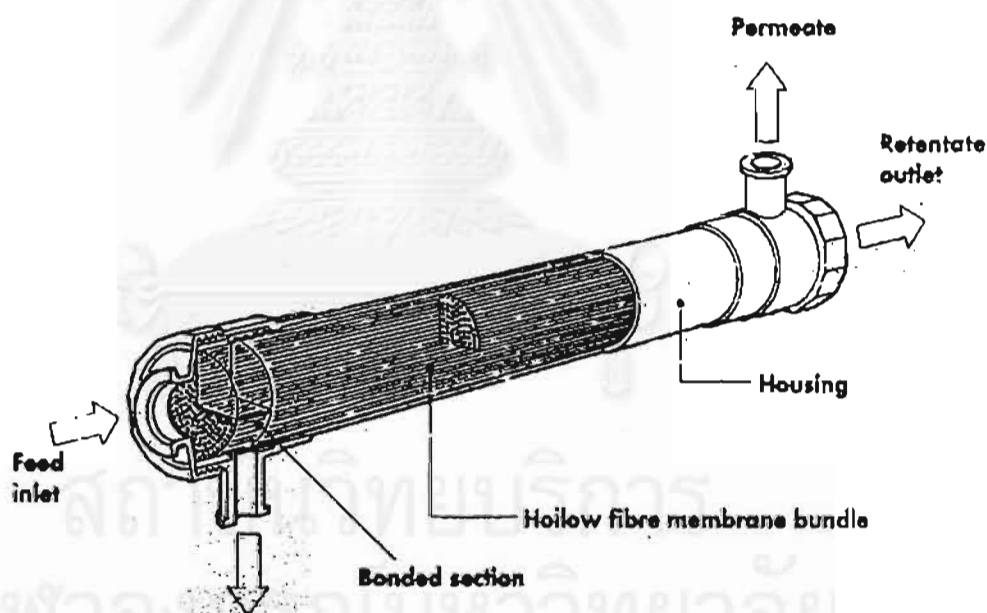
2.3.3 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber)

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบาง เริ่มแรกจะเป็นการม้วนท่อตัวรองรับให้มีลักษณะเป็นท่อกลม (tubular tube) แต่พบว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรมีค่าต่ำจึงมีการพัฒนาเป็นการใช้เส้นใยกลวงซึ่งมีขนาดเล็ก แต่ใช้เส้นใยจำนวนมากประกอบกันเป็นหน่วยเดียวกันทำให้มีสัดส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมออร์ ซึ่งมีความพรุนสูง โดยมีลักษณะของเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.4 แสดงตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง



รูปที่ 2.4 แสดงตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (Scott, 1995: 151)

รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะเป็นแหล่งยึดพุงเยื่อแผ่นเหลวไว้ โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเป็น โมดูลเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวล ซึ่งโมดูลชนิดนี้จะมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าชุดตัวรองรับชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดเท่าๆ กัน (Jianhan and Cangmin, 1988: 87-97; Tanigaki et al., 1988: 1145-1181) แต่ระบบการสกัดจำเป็นต้องมีการกรองแยกขั้นต้น (prefiltration) ที่มีประสิทธิภาพเพื่อป้องกันการอุดตันภายในเส้นใยกลวง เนื่องจากเส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากนั่นเอง (Tanigaki et al., 1988: 1145-1181) และลักษณะการปฏิบัติการโดยใช้เส้นใยกลวงแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 และพบว่าข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะก่อตัวเกิดเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลในการสกัด และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พุงบนตัวรองรับชนิดอื่นที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้นั่นเอง



รูปที่ 2.5 แสดงโมดูลของเส้นใยกลวง (Scott, 1995: 147)

2.4 กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ (coupled transport process)

การถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ คือ กระบวนการถ่ายโอนมวลชนิดหนึ่งผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อการเพิ่มความเข้มข้นและแยกไอออนโลหะจากสารละลายน้ำ เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในกระบวนการจะประกอบด้วยของเหลวที่ไม่ละลายน้ำถูกละลายด้วยสารสกัดชนิดที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) กับไอออนโลหะที่สนใจสกัด ไอออนโลหะจะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสแรกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะและแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้ามและจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ไอออนโลหะและสารสกัด โดยสารสกัดจะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสแรกและไอออนโลหะจะแพร่เข้าไปในสารละลายน้ำด้านสคริป

กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบสามารถแบ่งได้สองลักษณะตามชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวและสารสกัด ได้แก่

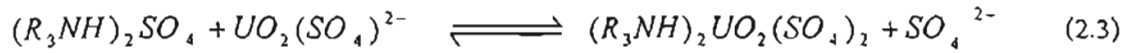
2.4.1 การถ่ายโอนมวลแบบสวนทาง (counter transport) มีลักษณะการถ่ายโอนมวลที่อัตรา การถ่ายโอนมวลของไอออนที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวทั้งสองตัวมีการการแพร่ในทิศทางตรงกันข้าม กรณีนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะดังนี้

สมการแสดงปฏิกิริยาทั่วไป

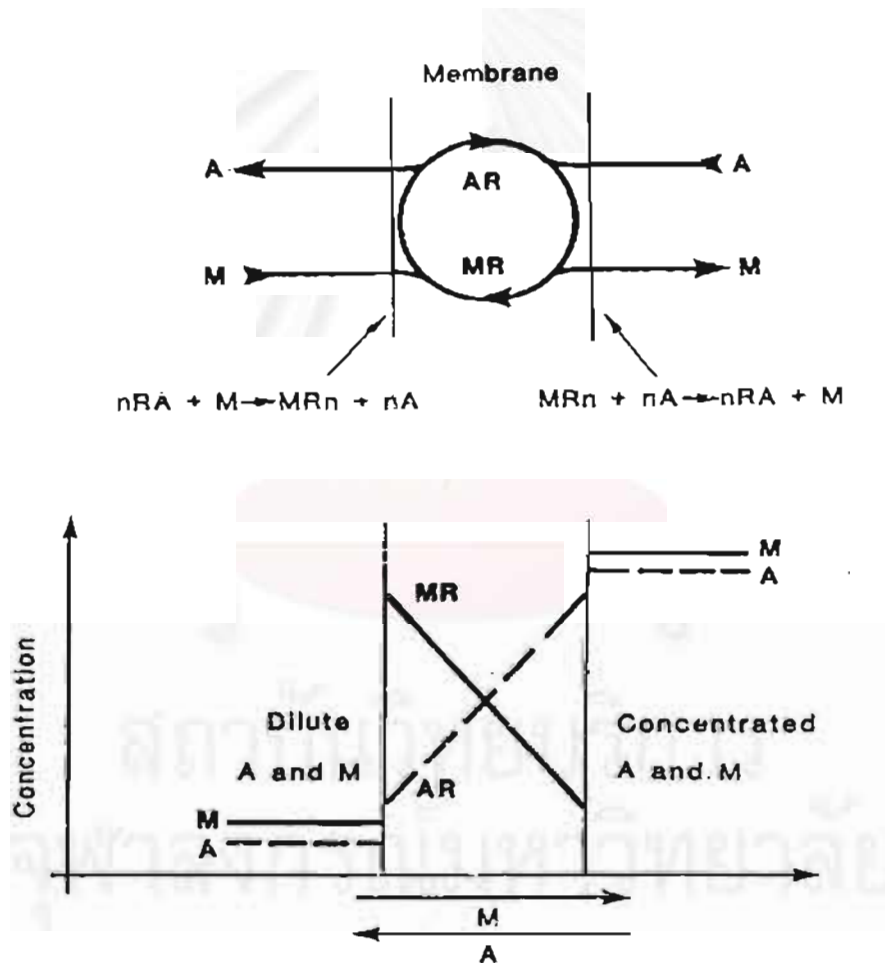


ปฏิกิริยาที่ 2.2 เป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาสำหรับการถ่ายโอนมวลของไอออนทองแดง M คือ Cu^{2+} และ A คือ H^+

การถ่ายโอนมวลชนิดการถ่ายโอนแบบสวนทางไม่ได้จำกัดเฉพาะไอออนที่มีประจุบวกเท่านั้น สำหรับไอออนที่มีประจุลบก็สามารถเกิดการถ่ายโอนมวลได้เช่นกัน แต่ต้องเลือกสารสกัดที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การถ่ายโอนมวลของยูเรนิลไอออน (uranyl ion) โดยเกลือเทอโทรเอไมด์ $((R_3NH)_2SO_4)$



กรณีนี้ M คือ $UO_2(SO_4)^{2-}$ และ A คือ SO_4^{2-}



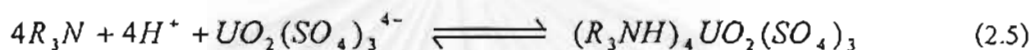
รูปที่ 2.6 แสดงการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน (counter current) (Porter, 1990: 516)

2.4.2 การถ่ายโอนมวลแบบไปด้วยกัน (co-transport) มีลักษณะการถ่ายโอนมวลที่อัตราการถ่ายโอนมวลของไอออนที่แพร่ผ่านทั้งสองตัวมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในทิศทางเดียวกัน

สมการแสดงปฏิกิริยาทั่วไป

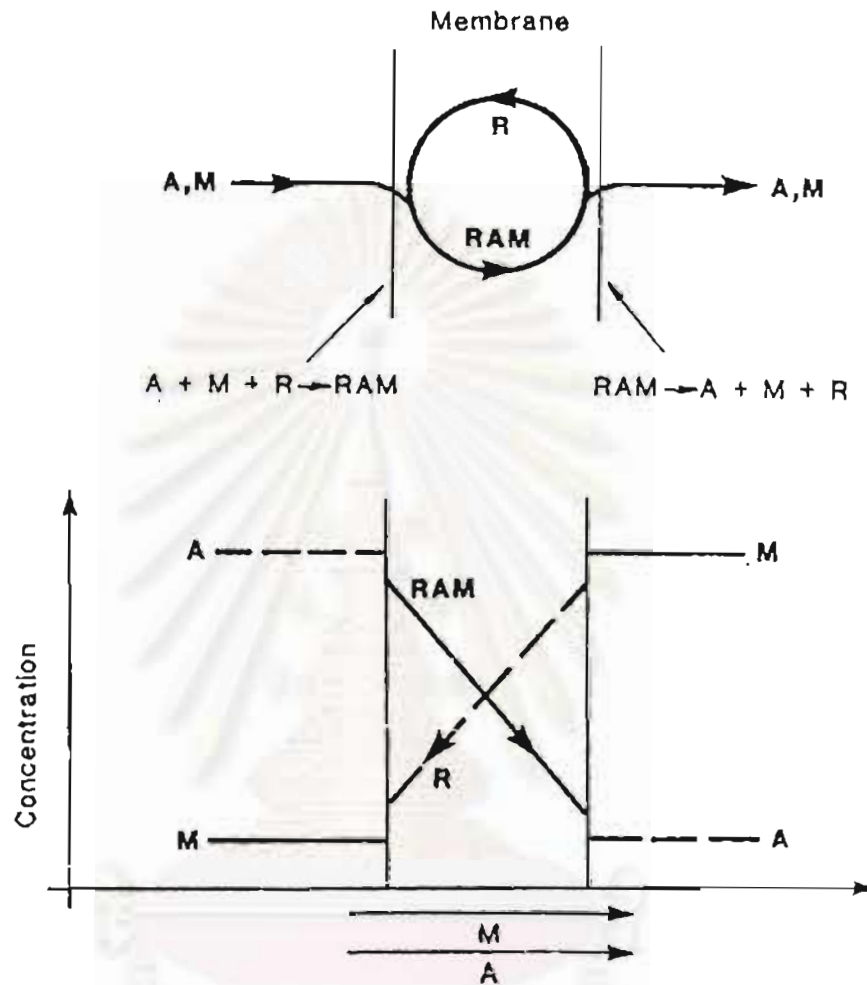


ตัวอย่างของชนิดการถ่ายโอนมวลนี้เป็นการถ่ายโอนมวลของยูเรนิลไอออนโดยสารสกัดประเภทสารประกอบเชิงซ้อนของเทอโทริเอมีน (tertiary amine complexing agents) ดังสมการ



จากตัวอย่างสมการนี้ M คือ $UO_2(SO_4)_3^{4-}$ A คือ H^+

จากปฏิกิริยา (2.3) และ (2.5) จะเห็นว่าเป็นการถ่ายโอนมวลของไอออนชนิดเดียวกัน ต่างกันที่ชนิดของการถ่ายโอนมวล ซึ่งในสมการ (2.3) เป็นการถ่ายโอนมวลชนิดสวนทางกัน แต่ในสมการ (2.5) เป็นชนิดไปด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด (Baker และ Blume, 1990: 515-517)



รูปที่ 2.7 แสดงการถ่ายโอนมวลแบบไปด้วยกัน (co-current) (Porter, 1990: 517)

2.5 กลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน

ปกติกระบวนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน (Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่

1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนผ่านชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังผิวของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสกัด
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสกัด
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสกัดผ่านชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายสกัด

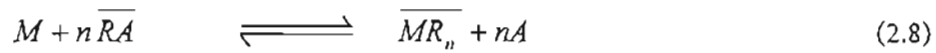
2.5.1 ไอออนคู่ควบที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางในวัฏภาคสารละลายป้อนไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยมีสมการแสดงการแพร่ดังต่อไปนี้

$$J_{MF} = k_M ([M]_F - [M]_0) \quad (2.6)$$

$$J_{AF} = k_A ([A]_0 - [A]_F) \quad (2.7)$$

โดยที่ $[M]_F$ และ $[A]_F$ เป็นความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนและไอออนคู่ควบในสารละลายป้อนตามลำดับ และ $[M]_0$ และ $[A]_0$ เป็นความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนและไอออนคู่ควบที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวตามลำดับ

2.5.2 ไอออนโลหะ (M) จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด (RA) ได้ไอออนคู่ควบ (A) และสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส 0 ของรูป 2.8) มีสมการแสดงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส และสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปยังหน้าดังต่อไปนี้



$$r_f = k_f \left\{ \frac{[M]^n [RA]^n}{[A]^n} - \frac{[MR_n]}{K'} \right\} \quad (2.9)$$

2.5.3 สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นซึ่งละลายได้ในภูมิภาคสารละลายแผ่นเหลวซึ่งมีตัวทำละลายเป็นสารอินทรีย์ที่เท่านั้นจะแพร่ผ่านชั้นของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายสตรีปกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส 1 ของรูปที่ 2.8) ขณะเดียวกันไอออนคู่ควบไอออนที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัสที่เกิดปฏิกิริยาไปยังภูมิภาคสารละลายป้อน เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนคู่ควบไอออน

นักวิจัยหลายท่าน (Smith et al., 1973; Schultz et al., 1974; Cussler, 1976 และ Danesi, 1984) ได้พยายามคิดค้นหาทฤษฎีทั่วไปของการถ่ายโอนแบบคู่ควบ โดยนิยามเริ่มจากการสมมติให้เกิดสมดุลระหว่างองค์ประกอบชนิดต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยากันในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว แล้วนำไปหาความเข้มข้นของสารที่แพร่ (permeant) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งไม่สามารถวัดค่าโดยตรงได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารที่แพร่ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวนั้นกับค่าคงที่ของสมดุล (equilibrium constant) จากนั้นสร้างแบบจำลองของการแพร่สำหรับทุกองค์ประกอบโดยอาศัยกฎของฟิค (Fick's law) สมการที่ได้เหล่านั้นจะถูกรวบรวมอยู่ในค่าเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (distribution coefficients) และค่าความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายโอนมวลในสารละลายที่อยู่ในภูมิภาคสารละลายของน้ำ ผลที่ได้จะเป็นสมการค่าอัตราการถ่ายโอนมวล (flux) ของไอออนที่ถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) ค่าคงที่ของสมดุล

และค่าความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายโอนมวลในสารละลายที่อยู่ในวิภาคสารละลายของน้ำซึ่งสามารถวัดค่าได้โดยตรง

ในพื้นฐานของค่าคงที่สมดุลที่ประกอบทั้งหมดจะเกิดสมดุลกันในวิภาคสารละลายของน้ำหรือวิภาคเชื่อมแผ่นเหลวอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น แต่ในกระบวนการการถ่ายโอนมวลนี้สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) และ สารสกัด (RA) จะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในวิภาคเชื่อมแผ่นเหลว ในขณะที่ไอออนโลหะที่ต้องการสกัด (M) และไอออนคู่ควบ (A) จะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในวิภาคสารละลายของน้ำ สมดุลของสารทั้งหมดในปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิวสัมผัสของวิภาคสารละลายของน้ำและวิภาคเชื่อมแผ่นเหลวเท่านั้น ดังนั้นจึงสมมุติให้ความเข้มข้นของสารที่แพร่ในเชื่อมแผ่นเหลวทั้งหมดที่ผิวสัมผัสนี้ถูกแทนค่าโดยค่าคงที่สมดุลและค่าคงที่สมดุลนี้จะปรากฏอยู่ในสมการการแพร่ของฟิค์

พิจารณากรณีทั่วไป แทนไอออนโลหะด้วยสัญลักษณ์ M ซึ่งมีประจุ n ทำปฏิกิริยากับสารสกัด RA เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n โดยมี A เป็นไอออนที่ถ่ายโอนมวลแบบสวนทางภายในเชื่อมแผ่นเหลว



มีค่าคงที่สมดุลเป็น

$$K = \frac{[MR_n][A]^n}{[RA]^n[M]} \quad (2.10)$$

ค่าคงที่สมดุลของสมดุลนี้สามารถเขียนได้ทั้งในด้านวิภาคเชื่อมแผ่นเหลวและฝั่งวิภาคสารละลายของน้ำ อย่างไรก็ตามในวิภาคเชื่อมแผ่นเหลวจะสามารถวัดค่าของ MR_n และ RA ได้เท่านั้น ในขณะที่ M และ A มีค่าน้อยมาก ในทำนองเดียวกันในวิภาคสารละลายของน้ำจะสามารถวัดค่าของ M และ A ได้เท่านั้น ในขณะที่ MR_n และ RA มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 2.10 ได้ใหม่คือ

$$K' = \frac{[MR_n]' [A]''}{[RA]'' [M]'} = \frac{k_m}{k_d} \cdot K \quad (2.11)$$

โดยตัวยก (superscript) ' หมายถึงวิภาคเยื่อแผ่นเหลว ส่วนตัวยก '' หมายถึงวิภาคสารละลายของน้ำ k_m และ k_d คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficients) ของ M และ A ระหว่างวิภาคเยื่อแผ่นเหลวและวิภาคสารละลายของน้ำ สมการที่ 2.11 สะดวกและง่ายในการนำมาใช้งาน เนื่องจากค่าต่าง ๆ สามารถวัดได้จากการทดลอง ตัวอย่างเช่น $[MR_n]' / [M]'$ ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (distribution coefficient) ของไอออนของโลหะระหว่างวิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวิภาคสารละลายของน้ำ

ค่าคงที่สมดุลในลักษณะเดียวกันนี้ เกิดขึ้นที่ทั้งสองฝั่งของผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายของน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 2.11 ได้ใหม่ในลักษณะดังนี้

$$K' = \frac{[MR_n]'_o [A]''_o}{[RA]''_o [M]'_o} = \frac{[MR_n]'_i [A]''_i}{[RA]''_i [M]'_i} \quad (2.12)$$

เมื่อ ตัวห้อย o และ i หมายถึงผิวสัมผัสทั้งสองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลว

พิจารณากรณีที่ไอออนที่ถ่ายโอนสวนทางถูกถ่ายโอนมวลในทิศทางตรงข้ามกับไอออนโลหะ จนถึงจุดสมดุลระหว่างไอออนที่ถ่ายโอนสวนทางกับไอออนของโลหะ ดังนั้นจึงไม่เกิดการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว เมื่อ $[MR_n]'_o = [MR_n]'_i$ และ $[RA]''_o = [RA]''_i$ และ สามารถเขียนสมการที่ 2.12 ได้เป็น

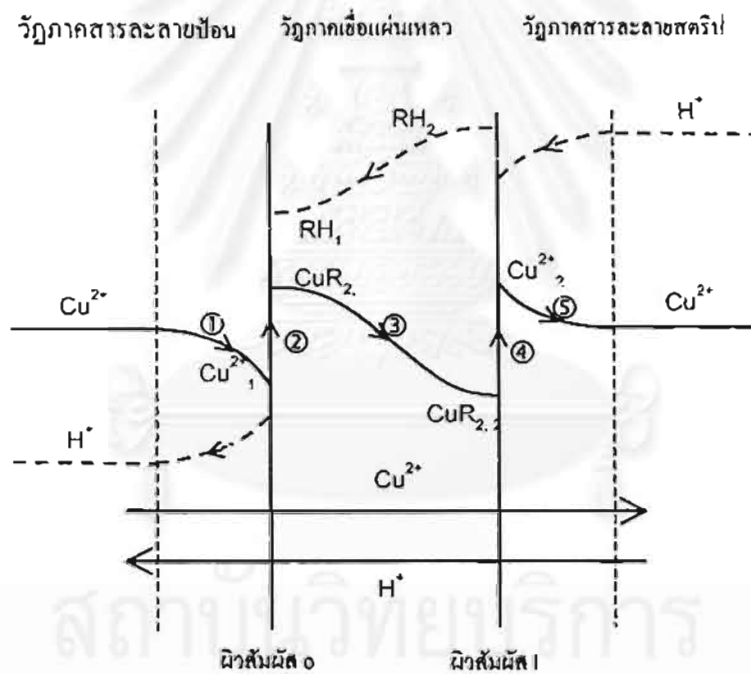
$$\frac{[M]''_o}{[M]'_i} = \left(\frac{[A]''_o}{[A]'_i} \right)^n \quad (2.13)$$

ดังนั้นค่าแฟกเตอร์ของความเข้มข้น (concentration factor) สูงสุดของไอออนของโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะแปรผันตามค่าสัดส่วนความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายโอนสวนทางยกกำลัง n

เมื่อกลับมาพิจารณากฎของฟิคท์ ที่สภาวะสมดุลค่าอัตราการถ่ายโอนมวล J_{MR_n} ของไอออนโลหะในรูป MR_n ที่ถ่ายโอนผ่านเยื่อแผ่นเหลว แสดงได้ตามสมการ

$$J_{MR_n} = \frac{\bar{D}_{MR_n} ([MR_n]'_o - [MR_n]'_i)}{l} \quad (2.14)$$

โดยที่ \bar{D}_{MR_n} คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวที่มีความหนา l ในทางทฤษฎีสามารถหาค่า J_{MR_n} ได้จากการทดลองการซึมผ่าน (permeation experiment) และสามารถวัด $[MR_n]$ ได้จากสัมประสิทธิ์ของการกระจายที่สมดุล (equilibrium distribution coefficient) ดังนั้นสามารถหาค่า \bar{D}_{MR_n} ได้จากความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง และเงื่อนไขสภาวะอื่น ๆ



รูป 2.8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายโอนมวลแบบขนานทางกันของทองแดง (Komasawa et al., 1993)

การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริป เพื่ออธิบายการถ่ายโอนแบบคู่ควบ เราจะพิจารณาสมการที่ 2.14 และกำจัดพจน์ $[MR_n]'$ โดยนำสมการที่ 2.11 มาใช้ ผลที่ได้จะเป็นสมการที่มีเทอมของ $[M]$, $[A]$ และ $[RA]$ อยู่ อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาสมดุลมวลจะให้ความสัมพันธ์

$$n [MR_n]' + [RA]' = \gamma \quad (2.15)$$

เมื่อ γ คือความหนาแน่นเชิงโมล (molar density) ของสารสกัด RA บริสุทธิ์โดยเราตั้งสมมุติฐานว่า ปริมาตรของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสารสกัด RA จำนวน n โมลทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n หนึ่งโมล

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.11 ใหม่ และสำหรับ $n=3$ จะได้

$$[MR_3]' = \frac{K' [RA]'^3 [M]^n}{[A]^{n3}} \quad (2.16)$$

จัดรูปสมการ 2.15 ใหม่ จะได้

$$[RA]' = \gamma - 3[MR_3]' \quad (2.17)$$

กำจัดเทอม $[RA]$ โดยแทนสมการ 2.17 ในสมการ 2.16

$$[MR_3]' = \frac{K' \{\gamma - 3[MR_3]'\}^3 [M]^n}{[A]^{n3}} \quad (2.18)$$

จัดรูปสมการ 2.18 ใหม่จะได้สมการพหุนามอันดับที่ 3 จะสามารถใช้คำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนได้

$$a[MR_n]'^3 - b[MR_n]'^2 + c[MR_n]' - d = 0 \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} a &= 27 K' [M]'' \\ b &= 27 \gamma K' [M]'' \\ c &= [A]''^3 + 9 \gamma^3 K' [M]'' \\ d &= \gamma^3 K' [M]'' \end{aligned}$$

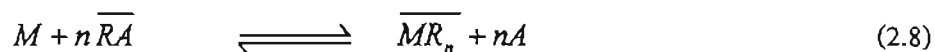
เมื่อทราบความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนแล้วสามารถหาอัตราการถ่ายโอนมวลได้โดยสมการที่ 2.14

สมการนี้แสดงถึงปรากฏการณ์การถ่ายโอนแบบคู่ควบ ดังนั้นค่าอัตราการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะจะมีค่าเป็นบวกในทิศทางเคลื่อนที่จากผิวสัมผัสที่ 0 ไปยังผิวสัมผัสที่ 1 จนกว่าอัตราส่วนของไอออนกับไอออนคู่ควบในสารละลายน้ำในสารละลายป้อนจะมากกว่าในสารละลายสตริป

$$\left(\frac{[M]''}{[A]''} \right)_0 > \left(\frac{[M]''}{[A]''} \right)_1 \quad (2.20)$$

แต่เมื่อเครื่องหมาย > ในสมการที่ 2.20 กลับทิศทางกัน อัตราการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะจะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม

2.5.4 สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไอออนคู่ควบได้ไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสตริป (ผิวสัมผัส 1 ของรูป 2.8) มีสมการแสดงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส และสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปย้อนกลับดังต่อไปนี้



$$r_f = k_f \left\{ \frac{[MR_n]'}{K'} - \frac{[M]'' [RA]'^3}{[A]''^2} \right\} \quad (2.21)$$

2.5.5 สารสกัดที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะแพร่ย้อนกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อน ขณะเดียวกันไอออนโลหะที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัสนี้ ไปยังภูมิภาคสารละลายสตรีปเนื่อง จากผลต่างความเข้มข้นของไอออนโลหะ โดยมีสมการแสดงการแพร่ดังต่อไปนี้

$$J_{MS} = k_M ([M]_I - [M]_S) \quad (2.22)$$

$$J_{AS} = k_A ([A]_S - [A]_I) \quad (2.23)$$

โดยที่ $[M]_I$ และ $[A]_I$ เป็นความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนและไอออนคู่ควบในสารละลาย สตรีปตามลำดับ และ $[M]_S$ และ $[A]_S$ เป็นความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนและไอออนคู่ควบที่ผิว สัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวสารละลายสตรีปกับตามลำดับ

ดังนั้นไอออนของโลหะจึงเคลื่อนที่จากฝั่งสารละลายป้อนไปยังฝั่งสารละลายสตรีป และ ไอออนคู่ควบเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลของระบบ โดยมีผลต่างความ เข้มข้นของไอออนคู่ควบระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคสารละลายสตรีปเป็นแรงขับของการ ถ่าย โอนมวล (Mar และ Kopp, 1982; Schultz, 1988; O' Hara, 1989)

2.6 ชนิดของสารสกัด

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

2.6.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลต (chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์คังสมการ



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acid ; D2EHPA)

สารสกัดประเภทลิเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยคอนเนอร์กรุ๊ป (donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทลิเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (alkaline)

2.6.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

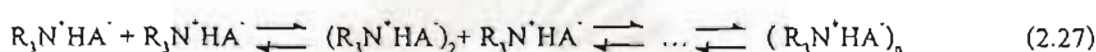
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน และ แอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



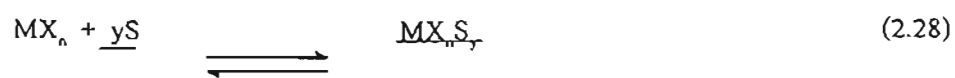
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^n จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุตั้งสมการ (2.25) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่ประจุบวกและประจุลบ (ammonium cation และ anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังปฏิกิริยา 2.27



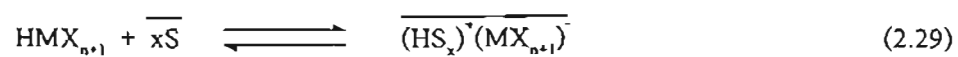
การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

2.6.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (solvating extractant)

สารสกัดประเภทขอลเวท (solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะคอนเนอร์กรุป จึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดค่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (central metal atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอินทรีย์ใน
 วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกริยารวมกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดัง
 ปฏิกริยา 2.28 และปฏิกริยา 2.29 (อิศรา เกษมเศรษฐ, 2541:22-25)



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาศึกษาการสกัดแลนทานัมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

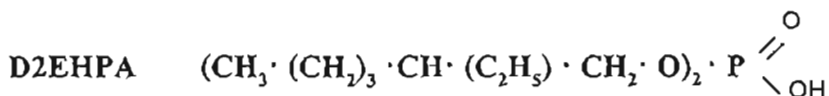
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อ	สูตรเคมี	ระดับคุณภาพ	บริษัท
ไอออนโลหะ	แลนทานัมคลอไรด์	$Cl_3La \cdot 7H_2O$	Analytical	MERCK
กรดในสารละลายสตริป	กรดซัลฟิวริก	H_2SO_4	Analytical	AnalaR [®] BHD
กรดในสารละลายป้อน	กรดอะซิติก	CH_3COOH	Analytical	AnalaR [®] BHD
เกลือของกรด	กรดไฮโดรคลอริก	HCl	Analytical	MERCK
	โซเดียมอะซิเตต	$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	Analytical	CARLO ERBA
	ไนโตรเจน	$C_2H_5NO_2$	Analytical	MERCK
สารสกัด	โซเดียมคลอไรด์	NaCl	Analytical	APS Ajax
	D2EHPA	$C_{16}H_{35}O_4P$	Analytical	SIGMA CHEMICAL
สารละลายอินทรีย์	น้ำมันก๊าด	-	Commercial	ไทยออยล์

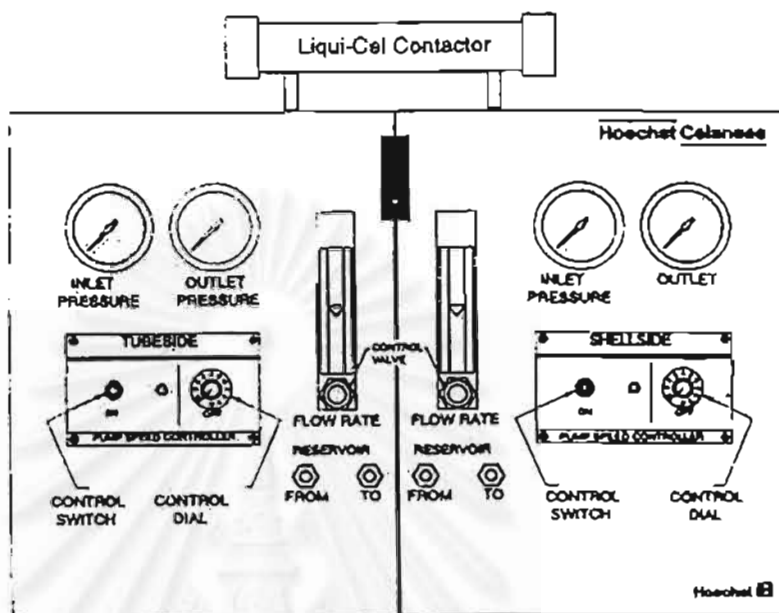
สารสกัด D2EHPA ที่ใช้มีสูตร โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1



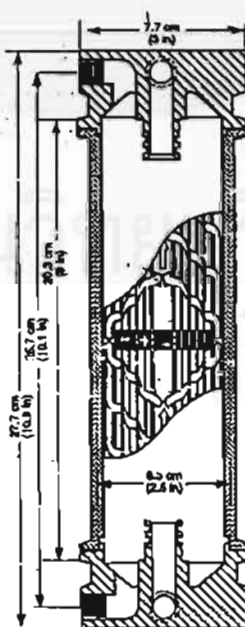
รูปที่ 3.1 สูตร โครงสร้างของสารสกัด D2EHPA

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Laboratory แสดงไว้ในรูป 3.2 ประกอบไปด้วยเครื่องสูบลองสองชุดที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที ชุดควบคุมความเร็วสองชุด มาตรฐานวัดอัตราการไหลสองชุด และมาตรวัดความดันสองชุด
2. ตัวรองรับได้แก่ เส้นใยกลางพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ผลิตโดยบริษัท Hoechst Celanese ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็น โมดูลของเส้นใยกลางดังแสดงในรูป 3.3 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.2
3. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง HI 8417 Microprocessor Bench pH/ °C Meter ของบริษัท Hanna Instrument
4. Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP-AES) Spectroflame รุ่น M, Spectroanalytical Instruments, Germany



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)



รูปที่ 3.3 โมดูลของเส้นใยกลาง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)

ตาราง 3.2 แสดงคุณสมบัติของโมดูลเส้นใยกลาง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)

คุณสมบัติ	ข้อกำหนด
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
ความหนาของผนังของเส้นใยกลาง	30 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลาง	30 %
พื้นที่ผิวสัมผัสที่กำหนดของโมดูลเส้นใยกลาง	1.4 ตารางเมตร
พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อัตราการไหลของสารละลาย	0.95 -14 ลิตรต่อนาที
ขนาดของโมดูล (เส้นผ่านศูนย์กลางxความยาว)	6.3x20.3 เซนติเมตร (2.5 x 8 นิ้ว)
ความดันคร่อมระหว่างเยื่อแผ่นเหลวสูงสุด	4.1 บาร์ (60 psi)
อุณหภูมิของการดำเนินการ	1-60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของ pH ในสารละลายป้อน และการเปรียบเทียบการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ควบคุม pH ให้คงที่กับการปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพียงอย่างเดียว

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายป้อน (feed solution) สารละลายป้อนในการทดลองนี้มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือค่า pH และควบคุมค่า pH ให้มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) โดยแต่ละค่า pH จะเตรียมให้มีปริมาตร 50 ลิตร ซึ่งแบ่งเป็น 2 ช่วงค่า pH คือ

1. ช่วงค่า pH 4 - 6 ใช้ สารละลายบัฟเฟอร์ของเกลือ โซเดียมอะซิเตทคู่กับกรดอะซิติก

1.1 เตรียมสารละลายเกลือโซเดียมอะซิเตทเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร โดยใช้น้ำที่ผ่านการกลั่น 3 รอบ

1.2 เตรียมสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

1.3 นำสารละลายเกลือโซเดียมอะซิเตท และสารละลายกรดอะซิติกจากที่เตรียมไว้ในข้อ 1.1 และ ข้อ 1.2 ตามลำดับ มาผสมกันตามอัตราส่วนที่ต้องการควบคุมค่า pH ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการควบคุม pH 4.0 ให้นำสารละลายเกลือโซเดียมอะซิเตทเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 18 มิลลิลิตร ผสมกับ สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 82 มิลลิลิตร จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 4.0 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

1.4 เติมธาตุแลนทานัมคลอไรด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1.3 ให้มีความเข้มข้น 144.2 ppm

1.5 ละลายสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 1 มิลลิลิตรต่อ 1 ลิตรของ สารละลายในข้อ 1.4 เพื่อให้เกิดการอิมคิวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้มีเยื่อทดลองสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูจุลภาค (micropore) จะไม่ละลายออกมายังสารละลายป้อน

2. ช่วงค่า pH 1 - 4 ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ของไกลซีนผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์คู่กับกรดไฮโดรคลอริก

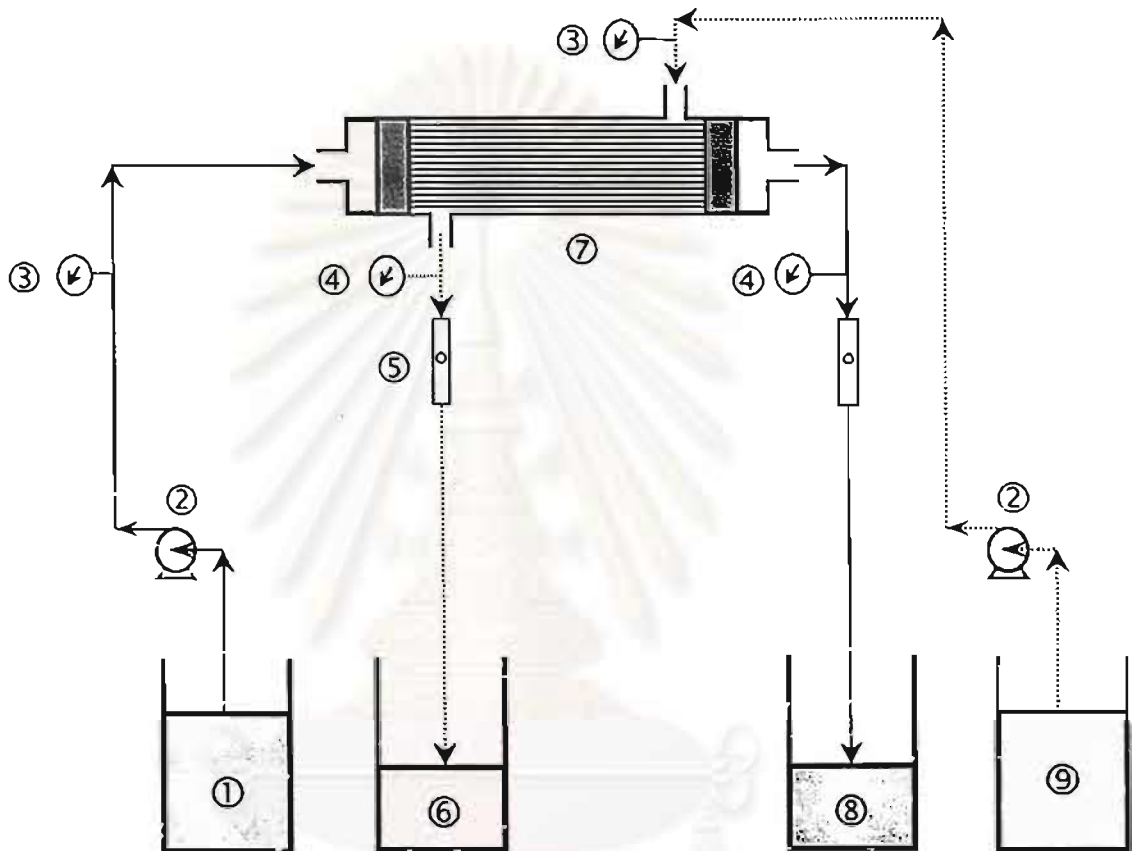
- 2.1 เตรียมสารละลายไกลซีนผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (7.505g Glycine+5.85 g NaCl per liter)
- 2.2 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
- 2.3 นำสารละลายไกลซีนผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ในข้อ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ มาผสมกันตามอัตราส่วนที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการควบคุม pH 3.0ให้นำสารละลายไกลซีนผสมกับเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 82.2 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 มิลลิลิตร ปริมาตร 17.8 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย บัฟเฟอร์ที่ค่า pH 3.0 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- 2.4 เติมธาตุแลนทานัมคลอไรด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 2.3 ให้มีความเข้มข้น 144.2 ppm
- 2.5 ละลายสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 1 มิลลิลิตรต่อ 1 ลิตรของสารละลายในข้อ 2.4 เพื่อให้เกิดการอิมิดัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้เมื่อทดลองสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูจุลภาค (micropore) จะไม่ละลายออกมายังสารละลายป้อน

ในกรณีที่สารละลายป้อนไม่ต้องควบคุม pH ให้คงที่ จะใช้กรดไฮโดรคลอริกปรับ pH เพียงอย่างเดียว ให้ pH มีค่าเป็น 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.6 ในแต่ละค่า pH เตรียมสารละลายป้อนให้มีปริมาตร 50 ลิตร และมีขั้วตอนในข้อที่ 2.4 และ 2.5 เหมือนกันกับในกรณีที่ควบคุม pH ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์

- 3.3.1.2 การเตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane solution) สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย ตัวทำละลาย(solvent) คือ น้ำมันก๊าด (kerosene) ตัวถูกละลายคือ กรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA) ทำหน้าที่เป็นสารสกัดหรือตัวพา (carrier) ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร

- 3.3.1.3 การเตรียมสารละลายสตริป (strip solution) สารละลายสตริปเป็นสารละลายที่ไม่ละลายในเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยตัวทำละลาย คือ น้ำที่ผ่านการกลั่น 3 รอบ และตัวถูกละลายคือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และละลายสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 1 มิลลิกรัมต่อสารละลายสตริป ปริมาตร 1 ลิตร เพื่อให้เกิดการอิ่มตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูจุลภาคไม่ละลายออกมายังสารละลายสตริป
- 3.3.1.4 การฝังสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในรูจุลภาค โดยเริ่มการทดลองจากการฝังสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ไหลเข้าทางด้านในท่อ (tube side) ของเส้นใยกลวง จนแน่ใจว่าสารละลายเยื่อแผ่นเหลวถูกฝังอยู่ในรูจุลภาคแล้ว โดยดูจากการเริ่มมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวไหลออกทางด้านภายนอก (shell side) ของเส้นใยกลวง นำส่วนเกินของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ยังค้างอยู่ในเส้นใยกลวงออกมาเพื่อให้มีเฉพาะสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอยู่ในรูจุลภาคเท่านั้น
- 3.3.1.5 ทำการป้อนสารละลายป้อนเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง ในขณะเดียวกันก็ป้อนสารละลายสตริปเข้าทางด้านนอกท่อ ปรับอัตราเร็วของการไหลให้เท่ากันที่ค่า 200 มิลลิกรัมต่อวินาที การไหลเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว และมีทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสตริปที่สวนทางกัน (counter current) แสดงดังรูปที่ 3.4
- 3.3.1.6 เมื่อการไหลคงตัวแล้ว (steady state) จึงเริ่มเก็บตัวอย่างของสารละลายทางออกทั้งทางด้านป้อนและสตริป และเมื่อได้ตัวอย่างครบ 10 ลิตร จึงหยุดการทดลองและนำสารละลายไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของธาตุแลนทานัม
- 3.3.1.7 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร

3.3.1.8 ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3.3.1.1 ถึง 3.3.1.7 โดยเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายป้อนที่ความคุม pH ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 3.3.1.1 เป็น 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.6 และ สารละลายป้อนที่ปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียวที่ค่า pH 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.6 ตามลำดับ จะทดลองในความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร



รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการไหลที่มีทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน (counter current) เป็นการไหลผ่านครั้งเดียว (one-through-mode) โดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกเส้นใยกลวง (shell side) ; หมายเลข 1 คือถังบรรจุสารละลายป้อนขาเข้า, 2 คือ เครื่องสูบล, 3 คือ มาตรการความดันขาเข้า, 4 คือ มาตรการความดันขาออก, 5 คือ มาตรการวัดอัตราการไหล, 6 คือ ถังบรรจุสารละลายสตริปขาออก, 7 คือ ชุดเส้นใยกลวง, 8 คือ ถังบรรจุสารละลายป้อนขาออก, 9 คือ ถังบรรจุสารละลายสตริปขาเข้า (วีรวัดน์ ปัททวิทกคา, 2541:47)

3.3.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว และความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.2.1 การเตรียมสารละลายป้อน (feed solution) มีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้น้ำกลั่นที่ผ่านการกลั่น 3 รอบจำนวน 300 ลิตร ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ให้ได้ pH 2.5 จากนั้นจึงแบ่งใส่ในถังขนาด 100 ลิตร จำนวน 6 ถัง ถึง ละ 60 ลิตร
2. ในถังแต่ละใบในข้อ 1 เติมธาตุแลนทานัมคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนของถังใบที่ 1 ถึง 6 เป็น 17.47, 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm ตามลำดับ
3. เติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 60 มิลลิลิตร ลงไปในถังแต่ละใบในข้อ 3.3.2.2 เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูปจุลภาคไม่ละลายออกมายังสารละลายป้อน

3.3.2.2 การเตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane solution) สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย ตัวทำละลาย คือ น้ำมันก๊าด ตัวถูกละลายคือ กรดโคเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก เป็นสารสกัดความเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร

3.3.2.3 การเตรียมสารละลายสตริบ (strip solution) สารละลายสตริบประกอบด้วย ตัวทำละลาย คือ น้ำที่ผ่านการกลั่น 3 รอบ ปริมาตร 350 ลิตรและและ ตัวถูกละลายคือกรดซัลฟูริก ปรับความเข้มข้นเป็น 0.5 โมลต่อลิตร และเติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 350 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูปจุลภาคไม่ละลายออกมายังสารละลายสตริบ

- 3.3.2.4 การฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้าไปในรูจุลภาค ทำการป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เข้าทางด้านภายในท่อของเส้นใยกลวง จนแน่ใจว่าสารละลายเชื้อแผ่นเหลวถูกฝังอยู่ในรูจุลภาคแล้ว โดยดูจากการเริ่มมีสารละลายเชื้อแผ่นเหลวไหลออกทางด้านภายนอกท่อของเส้นใยกลวง นำส่วนเกินของสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ยังค้างอยู่ในเส้นใยกลวงออกมาเพื่อให้มีเฉพาะสารละลายเชื้อแผ่นเหลวอยู่ในรูจุลภาคเท่านั้น
- 3.3.2.5 ทำการป้อนสารละลายป้อนจากถังใบแรกที่มีความเข้มข้น 17.47 ppm ปริมาตร 10 ลิตร และเมื่อครบ 10 ลิตร จึงเปลี่ยนการป้อนของสารละลายป้อนในถังที่มีความเข้มข้น 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm ตามลำดับ ไหลเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง ป้อนสารละลายสตริปเข้าทางด้านภายนอกเส้นใยกลวง ปรึบอัตราเร็วของการไหลให้เท่ากับที่ค่า 200 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว และมีทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสตริปที่สวนทางกันมีรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 3.3.2.6 ล้างโมดูลเชื้อแผ่นเส้นใยกลวงด้วยน้ำยาล้างจาน และล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจึงถอดโมดูลออกเพื่อให้แห้ง
- 3.3.2.7 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.3.2.4 ถึง 3.3.2.6 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเป็น 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีป

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.3.1 การเตรียมสารละลายป้อน (feed solution) มีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้น้ำกลั่นที่ผ่านการกลั่น 3 รอบจำนวน 40 ลิตร ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ให้ได้ pH 2.5
2. เติมธาตุแลนทานัมคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้นเป็น 144.3 ppm
3. เติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 40 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูจุลภาคไม่ละลายออกมายังสารละลายป้อน

3.3.3.2 การเตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane solution) สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นเพียงค่าเดียวคือ ประกอบด้วย ตัวทำละลาย คือ น้ำมันก๊าด ตัวถูกละลายคือ กรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

3.3.3.3 การเตรียมสารละลายสตรีป (strip solution) สารละลายสตรีปเป็นสารละลายต้องการศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่มีผลต่อการสกัด ดังนั้นจึงต้องเตรียมให้มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันโดยเตรียมจากน้ำที่ผ่านการกลั่น 3 รอบ เช่นเดียวกันกับในสารละลายป้อน จากนั้นจึงปรับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 0.05, 1.0, 0.25, และ 0.5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เตรียมให้แต่ละความเข้มข้นให้ได้ปริมาตร 10 ลิตร ในถังขนาด 10 ลิตรและเติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 10 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลายสตรีปในแต่ละถัง เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

- 3.3.3.4 การฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้าไปในรูจุลภาค ทำการป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง จนแน่ใจว่าสารละลายเชื้อแผ่นเหลวถูกฝังอยู่ในรูจุลภาคแล้ว โดยดูจากการเริ่มมีสารละลายเชื้อแผ่นเหลวไหลออกทางด้านนอกท่อของเส้นใยกลวง นำส่วนเกินของสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ยังค้างอยู่ในเส้นใยกลวงออกมาเพื่อให้มีเฉพาะสารละลายเชื้อแผ่นเหลวอยู่ในรูจุลภาคเท่านั้น
- 3.3.3.5 ทำการป้อนสารละลายป้อนเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง ในขณะที่เดียวกันก็ป้อนสารละลายสตรีปในถังใบแรกที่มีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 0.05 M ทางด้านนอกท่อ ปรับอัตราเร็วของการไหลให้เท่ากับที่ค่า 200 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว และมีทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสตรีปที่สวนทางกันมีรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.4
- 3.3.3.6 เมื่อการไหลคงตัวแล้ว จึงเริ่มเก็บตัวอย่างของสารละลายทางออกทั้งทางด้านป้อนและสตรีป และเปลี่ยนสารละลายสตรีปในถังที่มีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลต่อลิตรตามลำดับ

3.3.4 การทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีป

ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

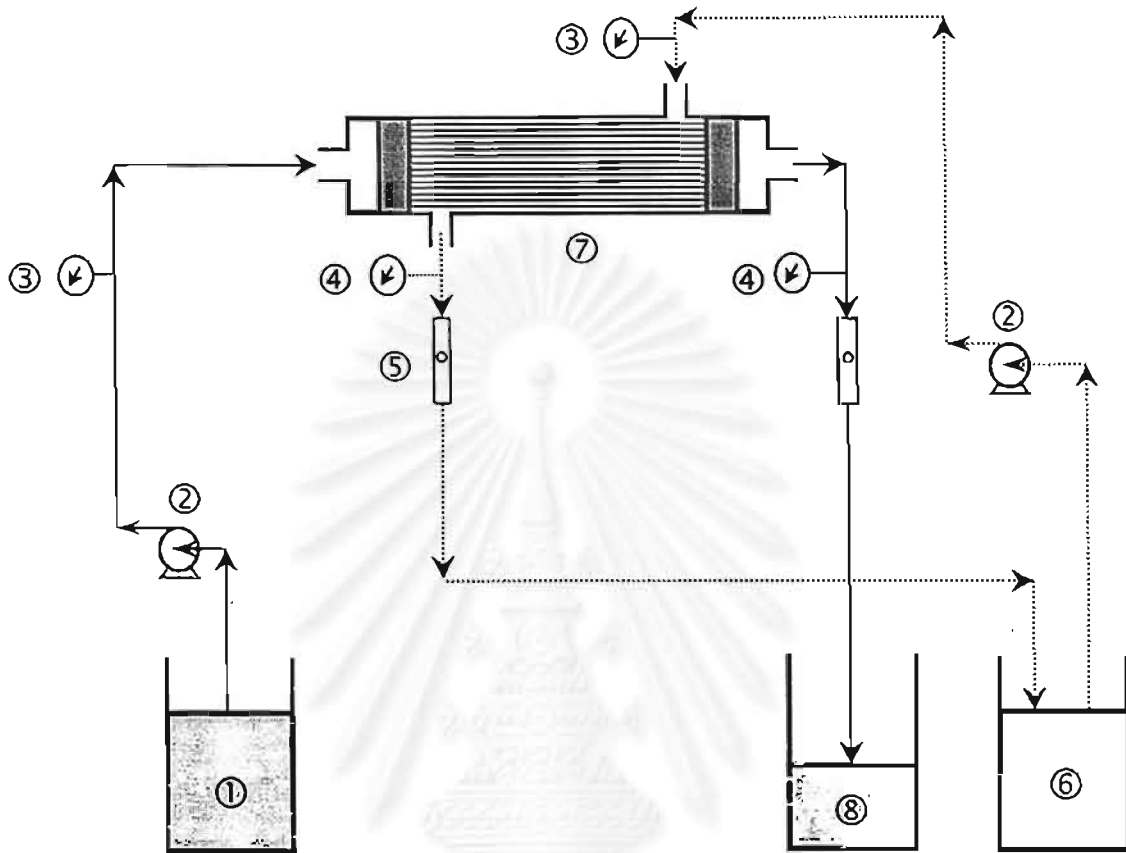
3.3.4.1 การเตรียมสารละลายป้อน (feed solution) มีขั้นตอนดังนี้

1. ใช้น้ำกลั่นที่ผ่านการกลั่น 3 รอบจำนวน 24 ลิตร ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ให้ได้ pH 2.5
2. เติมธาตุแลนทานัมคลอไรด์ ให้มีความเข้มข้นเป็น 144.2 ppm
3. เติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 24 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูจุลภาคไม่ละลายออกมายังสารละลายป้อน

3.3.4.2 การเตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane solution) สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นเพียงค่าเดียวคือ ประกอบด้วย ตัวทำละลายคือ น้ำมันก๊าด ตัวถูกละลายคือ กรดไดเอทิลเฮกซิลฟอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

3.3.4.3 การเตรียมสารละลายสตรีป (strip solution) ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีปเป็นตัวแปรที่ศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นให้กับแลนทานัมไอออน ดังนั้นจึงต้องเตรียมให้มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันโดยเตรียมจากน้ำที่ผ่านการกลั่น 3 รอบ ปริมาตร 6 ลิตร จากนั้นจึงปรับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ให้มีความเข้มข้นเป็น 0.5 โมลต่อลิตร แบ่งสารละลายนี้ให้มีปริมาตรเท่ากันคือ 3 ลิตร ในถังสองใบและเติมธาตุแลนทานัมให้มีความเข้มข้นเป็น 142.3 และ 1450 ppm จากนั้นจึงเติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในการทดลองจำนวน 3 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลายสตรีปในแต่ละถัง เพื่อให้เกิดการอิมตัวเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

- 3.3.4.4 การฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้าไปในรูจุลภาค ทำการป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง จนแน่ใจว่าสารละลายเชื้อแผ่นเหลวถูกฝังอยู่ในรูจุลภาคแล้ว โดยดูจากการเริ่มมีสารละลายเชื้อแผ่นเหลวไหลออกทางด้านนอกท่อของเส้นใยกลวง นำส่วนเกินของสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ยังขังอยู่ในเส้นใยกลวงออกมาเพื่อให้มีเฉพาะสารละลายเชื้อแผ่นเหลวอยู่ในรูจุลภาคเท่านั้น
- 3.3.4.5 ทำการป้อนสารละลายป้อนเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง ในขณะที่เดียวกันก็ป้อนสารละลายสตรีปในถังใบแรกที่มีความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนเป็น 142.3 ppm ไหลเข้าทางด้านนอกท่อ ปรับอัตราเร็วของการไหลให้เท่ากับที่ค่า 200 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียวในด้านสารละลายป้อน แต่ในสารละลายสตรีปมีรูปแบบการไหลแบบไหลวนกลับ และมีทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสตรีปที่สวนทางกัน มีรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.5
- 3.3.4.6 เมื่อการไหลคงตัวแล้ว จึงเริ่มเก็บตัวอย่างของสารละลายทางออกทั้งทางด้านป้อนและสตรีปหยุดการทดลองเมื่อสารละลายป้อนไหลครบ 12 ลิตร
- 3.3.4.7 ล้างโมดูลเชื้อแผ่นเส้นใยกลวงด้วยน้ำยาล้างจาน และล้างออกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นจึงถอดโมดูลออกเพื่อให้แห้ง
- 3.3.4.8 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3.3.4.4 ถึง 3.3.4.7 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีปเป็น 1450 ppm

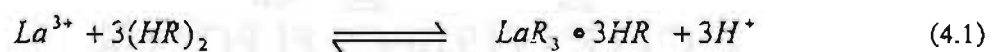


รูปที่ 3.5 แสดงรูปแบบการไหลที่มีทิศทางตรงกันข้าม (counter current) โดยสารละลายด้านสตริปมีการไหลวนเพื่อเพิ่มความเข้มข้น ให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในท่อของเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกเส้นใยกลวง (shell side) ; หมายเลข 1 คือถังบรรจุสารละลายป้อนเข้า, 2 คือ เครื่องสูบล, 3 คือ มาตรการความดันเข้า, 4 คือ มาตรการความดันออก, 5 คือ มาตรการวัดอัตราการไหล, 6 คือ ถังบรรจุสารละลายสตริปขาออกและขาเข้า, 7 คือ ชุดเส้นใยกลวง, 8 คือ ถังบรรจุสารละลายป้อนขาออก (วิวัฒน์ ปัดทวีคงคา, 2541:77)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและบทวิจารณ์ได้นำเสนอในบทนี้ มีปัจจัยต่างๆ ที่ได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ผลกระทบของ pH ในสารละลายป้อน ผลของความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีป และผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีป

กระบวนการสกัดในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ (coupled transport) ชนิดการถ่ายโอนแบบสวนทาง (counter transport) มีสารที่แพร่ผ่าน (permeant) เป็นไอออนสองตัวคือ แลนทานัมไอออน (La^{3+}) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) โดยแลนทานัมไอออนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว จากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายสตรีป มีทิศทางตรงข้ามกับไฮโดรเจนไอออนซึ่งแพร่จากด้านสารละลายสตรีปไปยังด้านสารละลายป้อน มีสมการที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออน คือ



ทิวสัมพันธ์ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า มีแลนทานัมเป็นสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งอยู่ในรูปไดเมอร์ (dimeric) ได้ผลิตภัณฑ์สองตัว คือ สารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนมีสูตรโมเลกุล $LaR_3 \cdot 3HR$ ซึ่งจะละลายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ต่างจากธาตุในกลุ่มเดียวกันที่มักมีสูตรโมเลกุลเป็น CeR_3, NdR_3 (Urbanski et al., 1996 และ Kataka et al., 1995) และ

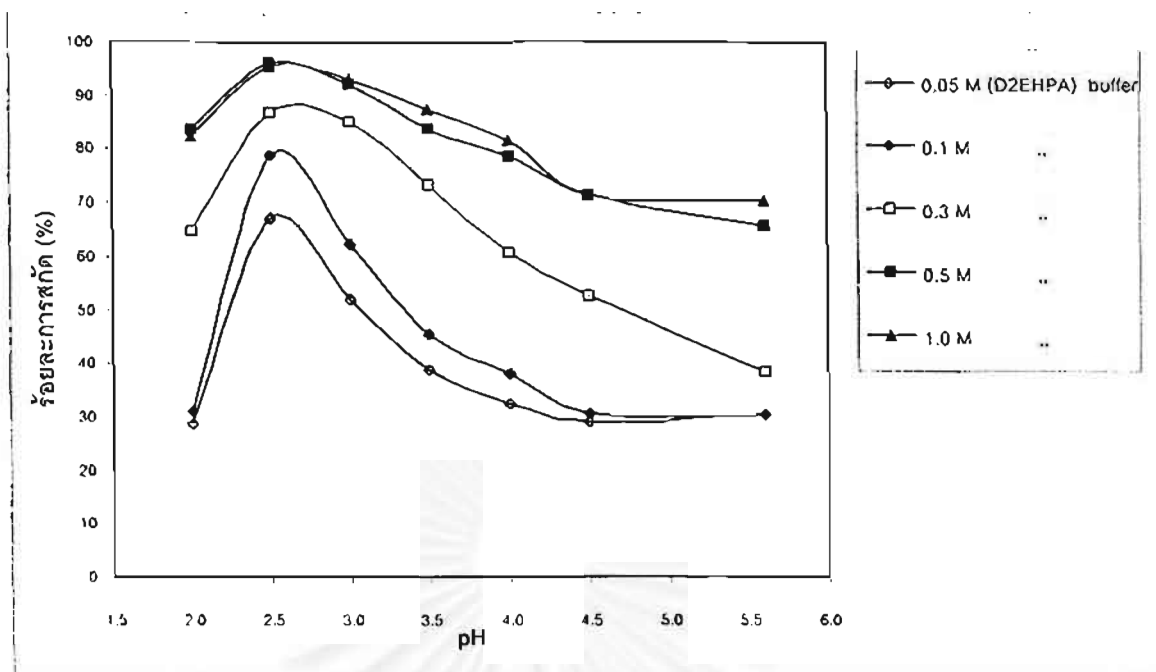
ไฮโดรเจนไอออนจะละลายในวัฏภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆ จนกว่าจะเข้าสู่สมดุล โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{cx} = \frac{[LaR_3 \cdot 3HR]' [H^+]^{n_3}}{[La^{3+}]^n [(HR)_2]^{n_3}} \quad (4.2)$$

ในทำนองเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหล็กกับวัฏภาคสารละลายสตรีปจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุล และมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้า ดังนั้นจึงไม่เกิดการถ่ายโอนมวลของไอออนผ่านเชื่อมแผ่นเหล็ก เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนในทั้งสองด้านเท่ากัน $([LaR_3 \cdot 3HR]_a' = [LaR_3 \cdot 3HR]_b')$ และความเข้มข้นของสารสกัดในทั้งสองด้านเท่ากัน $([(HR)_2]_a' = [(HR)_2]_b')$ และกล่าวได้ว่ากระบวนการถ่ายโอนมวลแบบนี้เป็นกระบวนการที่ยังไม่เกิดสมดุล (non equilibrium)

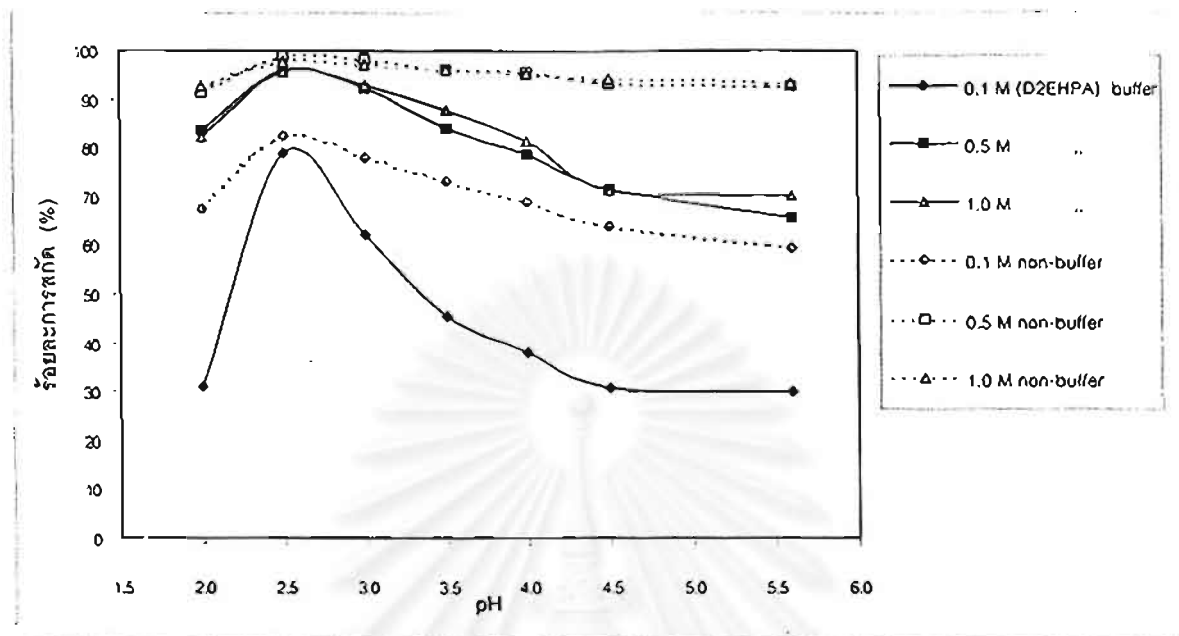
4.1 การทดลองเพื่อหาช่วงของ pH ในสารละลายป้อนที่เหมาะสม

การทดลองนี้เพื่อหาช่วงของ pH ในสารละลายป้อนที่ทำให้การสกัดด้วยเชื่อมแผ่นเหล็กที่พุงด้วยเส้นใยกลวงได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุด โดยการทดลองอยู่ในช่วงของ pH ที่มีความเป็นกรด ได้แก่ pH 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 และ 5.6 โดยควบคุม pH ให้คงที่ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ตลอดจนทดลองทั้งหมดให้ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าคงที่ 144.2 ppm (ประมาณ 0.001 โมลต่อลิตร) และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปเป็นการไหลแบบสวนทางกัน โดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าด้านในของเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตรีปไหลเข้าทางด้านนอกเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.05, 1.0, 0.3, 0.5, และ 1.0 โมลต่อลิตร ตลอดจนช่วงของ pH ที่ทดลอง นอกจากนี้แล้วยังได้ทดลองในช่วง pH เดียวกันแต่ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพียงอย่างเดียวและเปรียบเทียบกับผลการทดลองในช่วง pH ที่ควบคุมให้คงที่โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละการสกัดกับค่า pH ของสารละลายป้อน ได้แก่ pH 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.6 ในช่วงของ pH ที่ทดลองได้เปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร; ทดลองในสภาวะ $[La^{3+}]_f = 144.2$ ppm, $[H_2SO_4]_f = 0.5$ โมลต่อลิตร, $Q_f = Q_r = 200$ มิลลิลิตรต่อ นาที และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดเป็นแบบสวนทางกัน

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่าร้อยละการสกัดเพิ่มขึ้นจนได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ค่า pH เป็น 2.5 จากนั้นค่าร้อยละการสกัดจะเริ่มลดลง และมีแนวโน้มเหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA แต่ในช่วงค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีค่า 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร จะได้ค่าร้อยละการสกัดที่ใกล้เคียงกันตลอดช่วง pH ที่ทดลอง และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร จะได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ pH 2.5 เป็นร้อยละ 67, 78, 87, 96 และ 96 ตามลำดับ

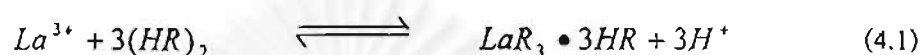


รูปที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการสกัดของการใช้สารละลายบัฟเฟอร์กับการปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียว ในช่วงของ pH 2 ถึง 5.6 และตลอดช่วง pH ได้เปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น: 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลต่อลิตร; ทดลองในสภาวะ $[La^{3+}]_i = 144.2$ ppm, $[H_2SO_4]_i = 0.5$ โมลต่อลิตร, $Q_i = Q_e = 700$ มิลลิกรัมต่ออนาที และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดเป็นแบบสวนทางกัน

อย่างไรก็ตามจากการทดลองแสดงในรูป 4.2 เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่มีการควบคุม pH โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์กับการทดลองที่ปรับ pH โดยใช้กรดเพียงอย่างเดียว พบว่าการปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียวจะได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดมากกว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์เพียงเล็กน้อยที่ค่า pH 2.5 แต่ในค่า pH อื่นๆ จะมีความแตกต่างของค่าร้อยละการสกัดมากโดยการไม่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์จะให้ค่าร้อยละการสกัดสูงกว่า

จากผลการทดลองสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

กรณีช่วง pH มีค่าต่ำ (pH 2 ถึง 2.5) การลดลงของค่า pH จะทำให้การสกัดลดลง สามารถอธิบายได้ว่า การสกัดถูกกำหนดโดยค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) จากสมการแสดงปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนและสมการค่าคงที่สมดุล ดังนี้



$$K_{ex} = \frac{[LaR_3 \cdot 3HR]'[H^+]^3}{[La^{3+}]^n[(HR)_2]^3} \quad (4.2)$$

เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมากเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]'[H^+]^3}{[La^{3+}]^n[(HR)_2]^3}$ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่สมดุล (K_{ex}) โดยมีค่า 2.95 (อ้างอิงที่ $pH_f = 2.0$) น้อยกว่าค่าคงที่สมดุลที่มีค่า 3.0 (Kataoka, Nishiki, Muto et al. 1995: 628) ดังนั้นที่ผิวสัมผัสนี้จึงยังคงเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าอย่างช้าเพราะใกล้จุดสมดุล ซึ่งสอดคล้องกับหลักของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เฮนรี หลุยส์ เลอ ชาเตอลิเยร์ (Henri Louis Le Chatelier) และเมื่อ pH มีค่าต่ำ จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายมีค่ามากขึ้น เทอม $\frac{[H^+]^3}{[La^{3+}]^n}$ ซึ่งเป็นคู่ไอออนที่แพร่สวนทางกัน (counter ions) จึงมีค่ามาก ไฮโดรเจนไอออนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตัวหนึ่งเมื่อมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ตามค่า pH ที่ลดลง จะทำให้ปฏิกิริยาเข้าใกล้จุดสมดุล และเมื่อถึงจุดสมดุลเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]'[H^+]^3}{[La^{3+}]^n[(HR)_2]^3}$ จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่สมดุล ดังนั้นเมื่อปฏิกิริยาคำเนินไปถึงจุดสมดุลเทอม $\frac{[H^+]^3}{[La^{3+}]^n}$ จะมีค่ามาก และเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]'}{[(HR)_2]^3}$ จะมีค่าน้อย สารประกอบเชิงซ้อนแลนทานัมซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อีกตัวหนึ่งจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ตามสมการ

$$r_f = k_f \left\{ \frac{[La^{3+}]^n [(HR)_2]^{n-3}}{[H^+]^{n-3}} - \frac{[LaR_3 \cdot 3HR]'}{K'} \right\} \quad (4.3)$$

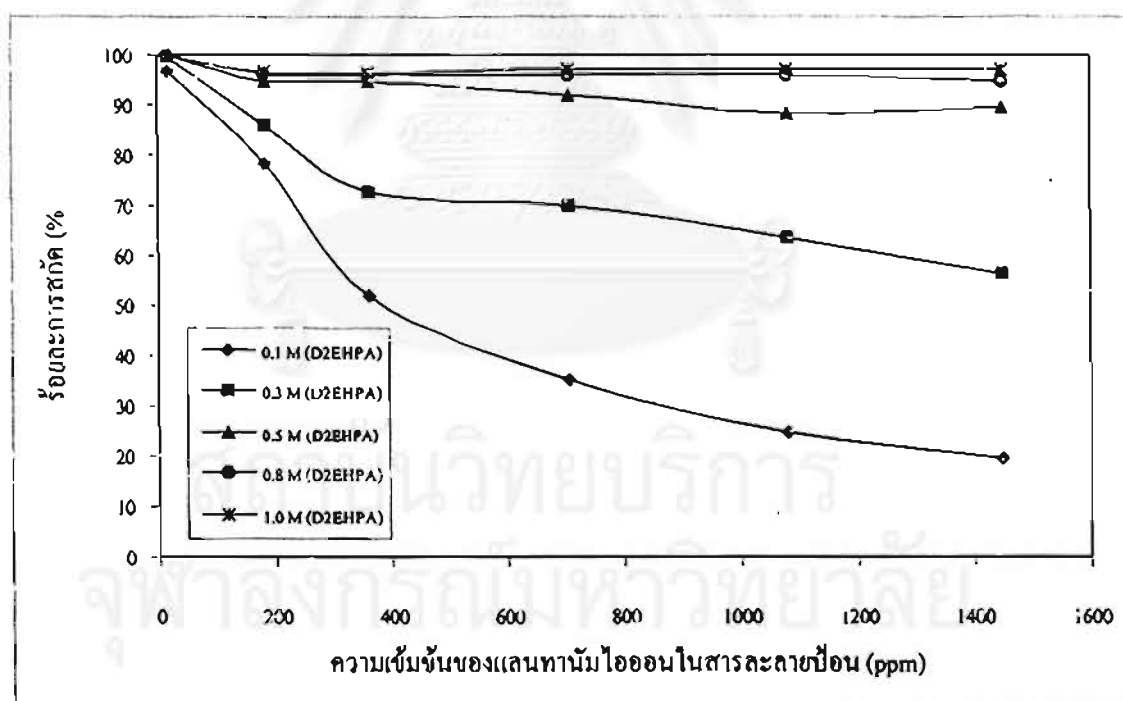
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะแปรผกผันกับไฮโดรเจนไอออนยกกำลังสาม ทำให้เทอม $\frac{[La^{3+}]^n [(HR)_2]^{n-3}}{[H^+]^{n-3}}$ มีค่าน้อย ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าจึงเกิดช้า จึงได้ค่าร้อยละการสกัดต่ำ

อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีค่า pH มีค่าสูง (pH 2.5 ถึง 5.6) แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนต่ำแต่จะได้ค่าร้อยละการสกัดลดลงเนื่องจากสารสกัด D2EHPA เป็นสารสกัดประเภทที่เป็นกรด (acidic acid) ซึ่งตามคุณสมบัติเฉพาะของมันจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนโลหะในช่วงที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient) ของแลนทานัมไอออนกับสารสกัด D2EHPA จึงทำให้ได้ค่าการสกัดที่ดีที่สุดที่ค่า pH ประมาณ 2.5 สอดคล้องกับ Powell ที่ใช้สารสกัดประเภทฟอสเฟตพบว่าสกัดธาตุแลนทานัมและซีเรียมได้ดีในช่วง pH 2.4 (Powell, 1979: 106) และแม้ว่าจะใช้สารสกัดตัวเดียวกันกับไอออนต่างชนิดกันก็ตาม แต่ค่า pH ที่สกัดได้ดีที่สุดจะมีค่าไม่เท่ากัน (Baker และ Blume, 1990: 525-526)

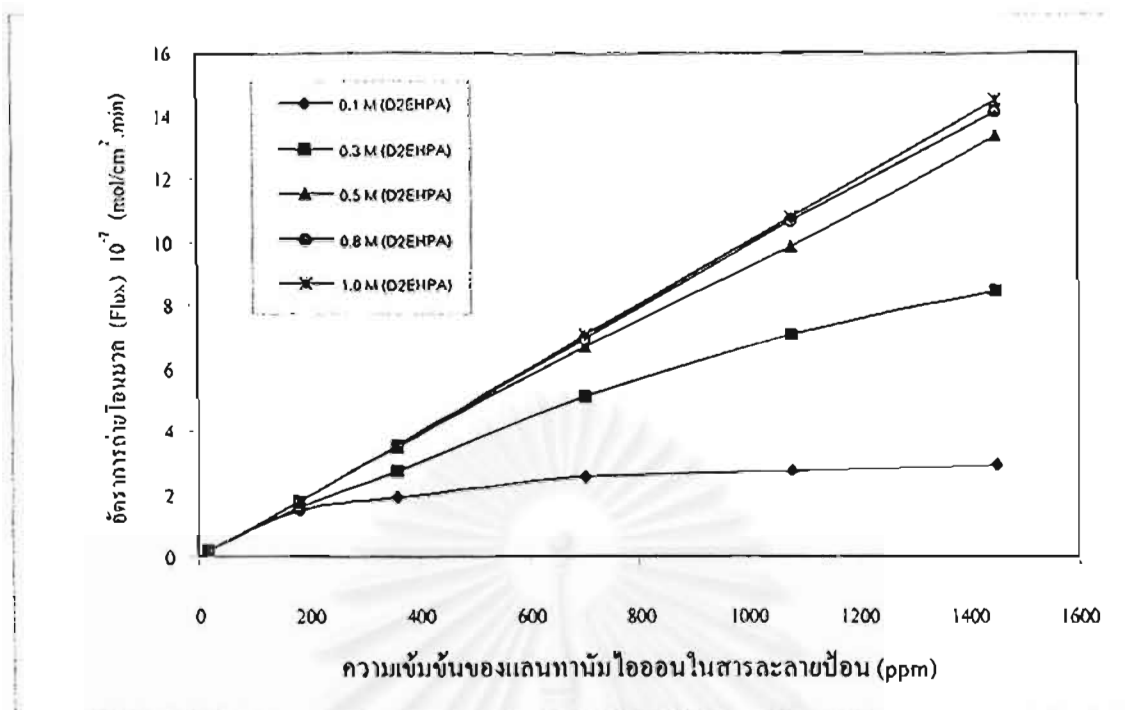
สำหรับกรณีที่มีการควบคุม pH ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์จะทำให้ได้ค่าร้อยละการสกัดต่ำกว่ากรณีที่ใช้กรดเพียงอย่างเดียว เพราะว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์จะต้องเติมเกลือของกรคนั้น และเกลือของกรคนั้นเมื่อละลายในสารละลายจะแตกตัวกลายเป็นไอออนประจุลบ (anions) โดยพื้นฐานของสารสกัด D2EHPA จะไม่เกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะเมื่อมีไอออนประจุลบอื่นอยู่

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน

การทดลองนี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่มีต่อการถ่ายโอนมวลและค่าร้อยละการสกัด ดำเนินการทดลองโดยให้ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าต่างกัน ได้แก่ 17.47, 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm (ประมาณ 0.0001, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075 และ 0.01 โมลต่อลิตร) ในทุกค่าความเข้มข้นดังกล่าวถูกควบคุม pH ให้มีค่าเท่ากับที่ pH 2.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายสตริปมีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 0.5 โมลต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าด้านในเส้นใยกลวง และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกเส้นใยกลวง และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากับเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้แล้วยังได้เปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ให้มีค่าเป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตรในทุกช่วงค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่ทดลอง



รูปที่ 4.3 แสดงค่าร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน, $[La^{3+}]$, ได้แก่ 17.47, 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm ในช่วง $[La^{3+}]$, ได้มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร; $pH_p = 2.5$, $[H_2SO_4]_r = 0.5$ โมลต่อลิตร, $Q_r = Q_p = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นแบบสวนทางกัน



รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลกับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน, $[La^{3+}]_f$ ได้แก่ 17.47, 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm ในช่วง $[La^{3+}]_f$ ได้มีการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ; $pH_f = 2.5$, $[H_2SO_4]_f = 0.5$ โมลต่อลิตร, $Q_f = Q_s = 200$ มิลลิลิตรต่อ นาที และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดเป็นแบบสวนทางกัน

ผลของค่าร้อยละการสกัดแสดงในรูปที่ 4.3 จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนมีค่า 17.47 ppm จะได้ค่าร้อยละการสกัดสูงถึงร้อยละ 99 ในทุกค่าของความเข้มข้นของสารสกัดที่ทดลอง แต่เมื่อความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนสูงขึ้นจะพบแนวโน้มของค่าร้อยละการสกัดแบ่งเป็นสองแนวโน้มตามความเข้มข้นของสารสกัด แนวโน้มแรกเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร จะได้ค่าร้อยละการสกัดที่มีค่าคงที่ทุกค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เพิ่มขึ้นที่ค่าร้อยละการสกัดที่มากกว่าร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าร้อยละการสกัดจะคงที่แต่ค่าการถ่ายโอนมวลดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีค่าไม่เท่ากัน โดยอัตราการถ่ายโอนมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เพิ่มขึ้น และมีความชันใกล้เคียงกันมีค่าประมาณ 0.0095 ในสำหรับค่าความเข้มข้นของสารสกัด 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าในความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่มีค่ามากที่สุดในการทดลองนี้ค่าการถ่ายโอนมวลจะเริ่มต่างกันแต่มีค่าไม่มากนัก

และแนวโน้มที่สองค่าร้อยละการสกัดจะมีค่าลดลงตามค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เพิ่ม เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่ำกว่า 0.5 โมลต่อลิตร จากรูปที่ 4.4 ถึงแม้ว่าค่าร้อยละการสกัดจะลดลงแต่สำหรับความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.3 โมลต่อลิตร ค่าการถ่ายโอนมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนแต่จะมีลักษณะที่เป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ที่มีความชัน 0.0068 ซึ่งน้อยกว่าในกรณีความเข้มข้นของสารสกัดที่มากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะเริ่มเป็นเส้นโค้ง และสำหรับความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1 โมลต่อลิตร ค่าการถ่ายโอนมวลจะเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน 17.47 ถึง 181.3 ppm หลังจากนั้นจะเริ่มโค้งในค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนประมาณ 181.3 ppm และมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนมีค่าสูง

จากผลการทดลองกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวลในทุกช่วงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร และจะมีผลกระทบเฉพาะในช่วงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่มีค่าต่ำๆ เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่ำกว่า 0.1 โมลต่อลิตร สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยสมการ

$$J_{M_i} = k_M ([M]_F - [M]_O) \quad (4.4)$$

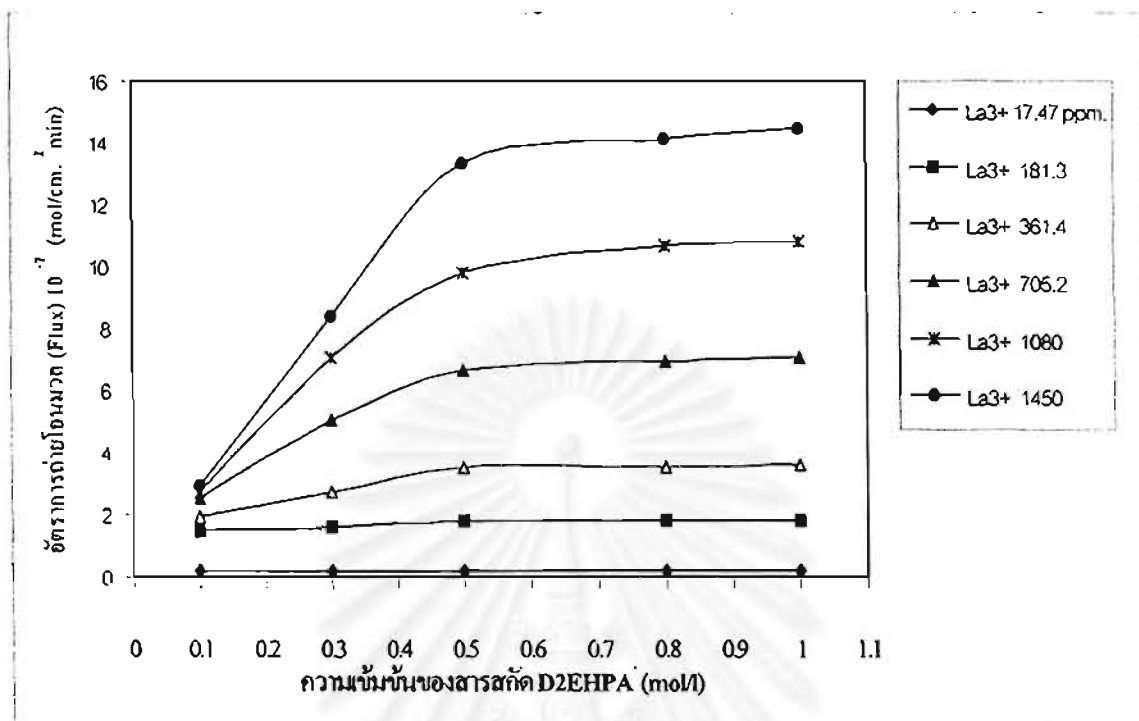
$$J_{A_i} = k_A ([A]_O - [A]_F) \quad (4.5)$$

โดยที่สมการที่ 4.4 และ 4.5 เป็นสมการแสดงการแพร่ของแลนทานัมไอออนและไฮโดรเจนไอออนในสารละลายน้ำของสารละลายป้อน จากสมการเมื่อความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนเพิ่มขึ้นเทอม $[M]_F$ ในสมการจะมีค่ามากทำให้ความแตกต่างระหว่างไอออนแลนทานัมในสารละลายป้อนและในชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ค่าการถ่ายโอนมวลสูง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าในกรณีนี้การแพร่ของแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตราการถ่ายโอนมวล แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าจาก 0.5 ลดลงถึง 0.1 โมลต่อลิตร ความสำคัญของผลกระทบของความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่มีต่อการถ่ายโอนมวลจะน้อยลง และขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายโอนมวลจะเปลี่ยนจากขั้นตอนการแพร่ของแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำมาเป็นขั้นตอนการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะอธิบายขั้นตอนนี้ในหัวข้อต่อไป

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

การทดลองนี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนมวล ดำเนินการทดลองโดยให้ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด มีค่าต่างกัน ได้แก่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร สารละลายป้อนปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับที่ pH 2.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก พร้อมทั้งเปลี่ยนความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนเป็นค่า 17.47, 181.30, 361.40, 705.20, 1080 และ 1450 ppm (ประมาณ 0.0001, 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075 และ 0.01 โมลต่อลิตร) ในแต่ละค่าความเข้มข้นของสารสกัด และสารละลายสตริปมีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 0.5 โมลต่อลิตรตลอดการทดลอง โดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าด้านในเส้นใยกลวง และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกเส้นใยกลวง และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากับเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าสูงมากกว่า 361.4 ppm ขึ้นไป การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจากช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร จะมีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง โดยในค่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนเป็น 361.4, 705.2, 1080 และ 1450 ppm จะมีค่าความชันเป็น 4.0, 10.89, 19.64 และ 26.84 ตามลำดับ แสดงว่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการถ่ายโอนมวลจะเริ่มมีค่าคงที่ โดยในความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนมีค่าเป็น 361.4, 705.2, 1080 และ 1450 โมลต่อลิตร จะมีอัตราการถ่ายโอนมวลที่คงที่ที่เป็น 3.5×10^{-7} , 6.9×10^{-7} , 10.6×10^{-7} และ 14.2×10^{-7} โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าเป็น 17.47 และ 181.3 ppm พบว่าตลอดช่วงความเข้มข้นของสารสกัดที่ทดลองจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวล โดยในความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนมีค่าเป็น 17.47 และ 181.3 ppm มีค่าอัตราการถ่ายโอนมวลที่คงที่ที่เป็น 0.17×10^{-7} และ 1.7×10^{-7} โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลกับความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA ไล่ตั้งแต่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดที่ทดลองได้เปลี่ยน $[La^{3+}]_r$ เป็น 17.47, 181.3, 705.2, 1080 และ 1450 ppm ; $pH_r = 2.5$, $[H_2SO_4]_r = 0.5$ โมลต่อลิตร, $Q_r = Q_s = 200$ มิลลิกรัมต่อนาฬิกา และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นแบบสวนทางกัน

จากผลการทดลองสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

กรณีที่ความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการถ่ายโอนมวลควรจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืด (viscosity) เพิ่มขึ้น เพราะค่าความหนืดของสารสกัดชนิดที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมักจะมีค่าสูงกว่าตัวทำละลาย จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนในสารละลายมีค่าลดลง

ดังแสดงโดยสมการของ Nernst (Schulz, 1988: 194)

$$D = \frac{RT}{6 \pi \eta r} \quad (4.6)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของสารละลาย, η คือ ค่าความหนืดของสารละลาย, r คือ ขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่

จากสมการที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดมีผลทำให้การถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ลดลงเนื่องมาจากความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้นจึงได้อัตราการถ่ายโอนมวลที่ในช่วงที่สารสกัดมีความเข้มข้นสูงจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (อิสรา, 2541)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่ำ (0.1 โมลต่อลิตร) อัตราการถ่ายโอนมวลถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว สามารถอธิบายโดยกฎของฟิคส์ (Fick's law) มีความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออออนในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นแรงขับ แสดงได้ตามสมการ

$$J_{LaR_3 \cdot 3HR} = \frac{\bar{D}_{LaR_3 \cdot 3HR} ([LaR_3 \cdot 3HR]_o' - [LaR_3 \cdot 3HR]_i')}{l} \quad (4.7)$$

โดยที่ $\bar{D}_{LaR_3 \cdot 3HR}$ คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวที่มีความหนา l

อย่างไรก็ตามเทอมความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน $[LaR_3 \cdot 3HR]'$ ไม่สามารถวัดค่าโดยตรงได้ แต่มีความสัมพันธ์ของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนกับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาซึ่งสามารถวัดค่าได้ สมการที่ 4.2 และจัดรูปใหม่จะได้

$$[LaR_3 \cdot 3HR]' = \frac{K'_{cs} [(HR)_2]'^3 [La^{3+}]^n}{[H^+]^{n3}} \quad (4.8)$$

ในสมการนี้ยังมีเทอม $[(HR)_2]'$ ซึ่งไม่สามารถวัดค่าได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาสมดุลจะให้ความสัมพันธ์

$$3[LaR_3 \cdot 3HR]' + [(HR)_2]' = \gamma \quad (4.9)$$

เมื่อ γ คือความหนาแน่นเชิงโมล (molar density) ของสารสกัด $(HR)_2$ บริสุทธิ์โดยเราตั้งสมมุติฐานว่าปริมาตรของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสารสกัด $(HR)_2$ จำนวนสามโมลทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $(LaR_3 \cdot 3HR)$ หนึ่งโมล

จัดรูปสมการ 4.9 ใหม่จะได้

$$[(HR)_2]' = \gamma - 3[LaR_3 \cdot 3HR]' \quad (4.10)$$

ถ้าจัดเทอม $[(HR)_2]'$ โดยแทนสมการ 4.10 ในสมการ 4.8 จะได้สมการที่ 4.11 ดังนี้

$$[LaR_3 \cdot 3HR]' = \frac{K'_{cs} \{\gamma - 3[LaR_3 \cdot 3HR]'\}^3 [La^{3+}]^{n3}}{[H^+]^{n3}} \quad (4.11)$$

จัดรูปสมการ 4.11 ใหม่จะได้สมการพหุนามอันดับที่ 3 จะสามารถหาความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนได้

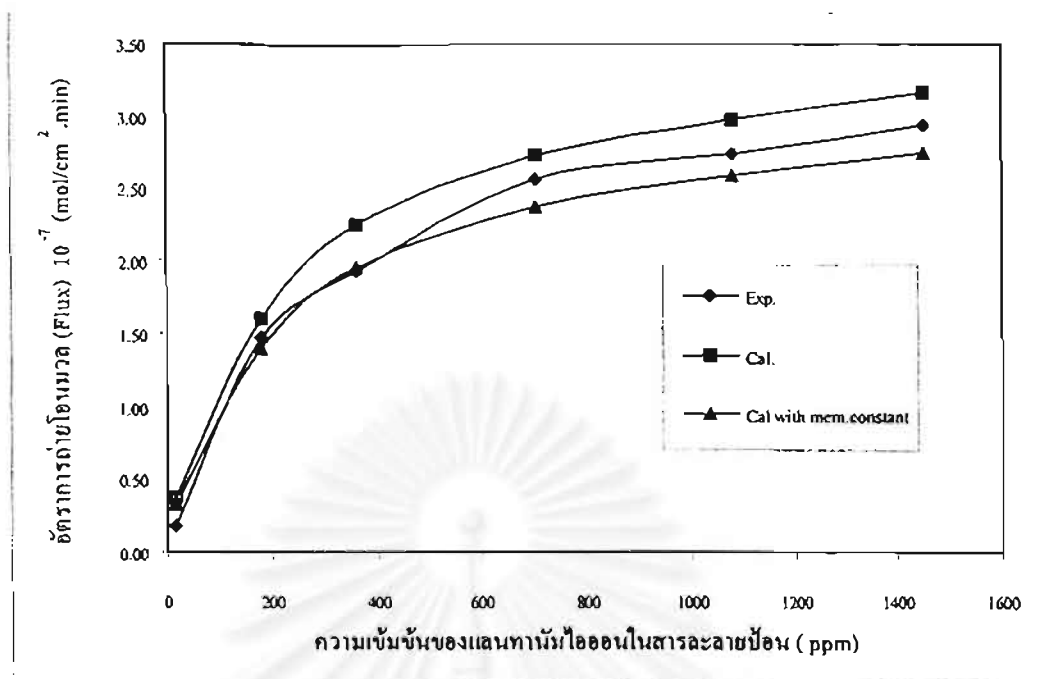
$$a[LaR_3 \cdot 3HR]'^3 - b[LaR_3 \cdot HR]'^2 + c[LaR_3 \cdot 3HR]' - d = 0 \quad (4.12)$$

เมื่อ

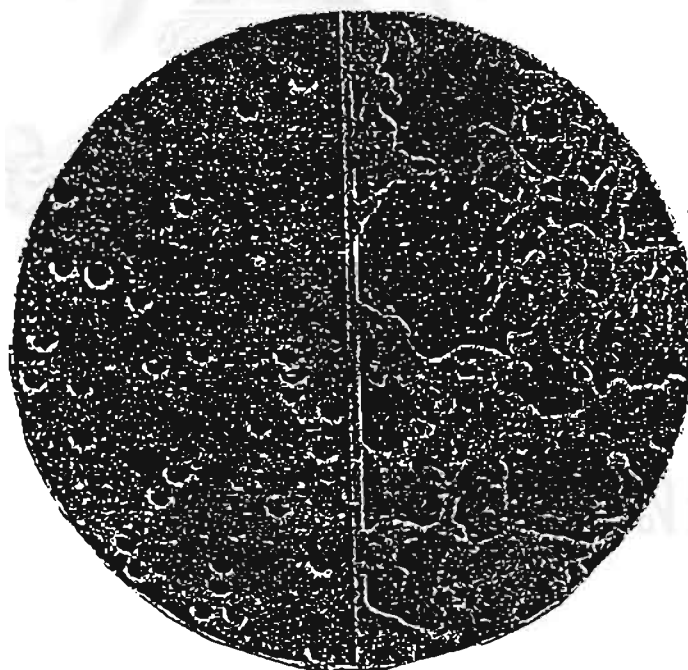
$$\begin{aligned} a &= 27 K_{ex} [La^{3+}]^n \\ b &= 27 \gamma K_{ex} [La^{3+}]^n \\ c &= \{H^+\}^n + 9\gamma^3 K_{ex} [La^{3+}]^n \\ d &= \gamma^3 K_{ex} [La^{3+}]^n \end{aligned}$$

เมื่อทราบความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนแล้วสามารถหาอัตราการถ่ายโอนมวลได้โดยสมการที่ 4.7

จากรูป 4.6 จะพบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลจากการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกันกับการคำนวณ แต่จะได้ค่าต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณาเยื่อแผ่น (solid meinbrane) ที่เป็นตัวรองรับแล้วจะพบว่าทำด้วยพอลิเมอร์ชนิดโพลีโพลีลีน ผลิตโดยบริษัท Hoechst Celanese มีโครงสร้างของรูพรุนแสดงดังรูป 4.7 โครงสร้างของเยื่อแผ่นจะเป็นแบบ tortuous pore จะมีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายยึดเกาะกันทำให้รู้จุดภาคมีขนาดใกล้เคียงน้ำเสมอ



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับการคำนวณจากทฤษฎี



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะรูขุมภาค (pore size) ของเยื่อแผ่นรองรับ; ด้านซ้ายแสดงรูขุมภาคแบบ capillary pore, ด้านขวาแสดงรูขุมภาคแบบ tortuous pore (Porter, 1990: 63)

จากการผลิตโดยวิธีนี้จะพบว่าเมื่อสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะมีระยะทางที่ไม่เท่ากับความหนาของเยื่อแผ่น ซึ่งเยื่อแผ่นนี้มีค่าคงที่เป็น 1.25 ดังนั้นการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นจริงจึงมีค่าน้อยกว่าการคำนวณ ดังนั้นถ้าให้สมการที่ 4.7 มีค่าคงที่ของเยื่อแผ่น (τ) เป็นตัวหาร จะได้สมการการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวใหม่ดังนี้

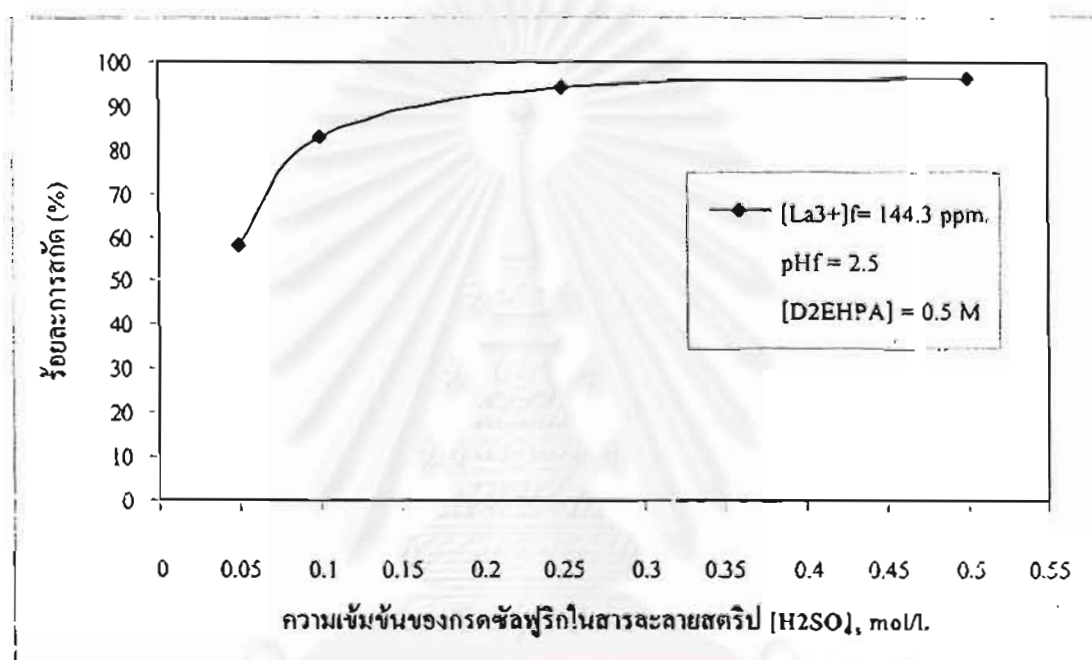
$$J_{LoR_3, \cdot 3HR} = \frac{\bar{D}_{LoR_3, \cdot 3HR} ([LaR_3 \cdot 3HR]_o' - [LaR_3 \cdot 3HR]_i')}{l\tau} \quad (4.13)$$

เมื่อใช้สมการนี้มาคำนวณค่าการถ่ายโอนมวลจะทำให้ได้ค่าอัตราการถ่ายโอนมวลที่น้อยกว่าการทดลอง เนื่องมาจากการที่สารละลายน้ำอาจเข้าไปในรูจุลภาคเล็กน้อยจึงทำให้ระยะทางอาจจะสั้นกว่าความเป็นจริงเพียงเล็กน้อยทำให้การทดลองได้อัตราการถ่ายโอนมวลที่สูงกว่า ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่าอัตราการถ่ายโอนมวลในกรณีที่สารสกัดมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 โมลต่อลิตร ถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีป

กระบวนการถ่ายโอนมวลของการสกัดแลนทานัมไอออน โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนี้ เป็นการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบชนิดที่ไอออนเคลื่อนที่สวนทางกัน ซึ่งแลนทานัมไอออนและไฮโดรเจนไอออนเป็นไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่น โดยที่แลนทานัมจะเคลื่อนที่จากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายสตรีป ส่วนไฮโดรเจนไอออนจะเคลื่อนที่จากด้านสารละลายสตรีปไปยังด้านสารละลายป้อน การถ่ายโอนมวลชนิดนี้จะต้องให้สารละลายสตรีปมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนสูงกว่าด้านสารละลายป้อน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ตรวจสอบผลกระทบของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปที่มีต่อการถ่ายโอนมวล และหาช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมในระบบนี้ ซึ่งได้ดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ คือ สารละลายป้อนมีความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน 144.3 ppm และปรับ pH 2.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.5 โมลต่อลิตรตลอดการทดลองนี้ สำหรับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ทำการศึกษาในการทดลองนี้คือ 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลต่อลิตร

จากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.8 จะพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก จากช่วงความเข้มข้น 0.05 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร จะได้ค่าร้อยละการสกัดที่เพิ่มตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก โดยในช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.05 ถึง 0.25 โมลต่อลิตร จากรูปที่ 4.8 เป็นช่วงที่มีความชันสูงแสดงว่าในช่วงนี้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกมีผลต่อการสกัดมาก หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกมีค่ามากกว่า 0.25 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตริป; [D2EHPA] = 0.5 M, [La³⁺]_f = 144.3 ppm, pH_f = 2.5, Q_r = Q_e = 200 มิลลิกรัมต่ออนาที และการไหลของสารละลายฟีดและสารละลายสตริปเป็นแบบสวนทางกัน

จากสมการแสดงปฏิกิริยา



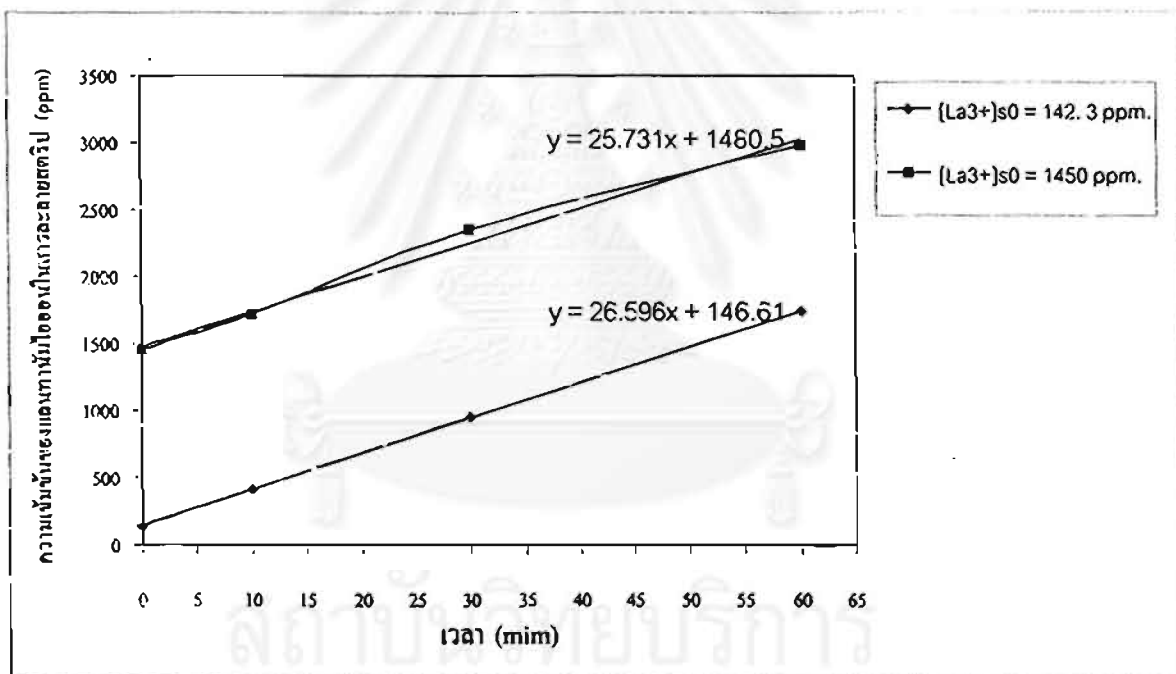
และจากสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

$$r_r = k_r \left\{ [LaR_3 \cdot 3HR]' - \frac{K_{ca} [La^{3+}]^n [(HR)_2]'^3}{[H^+]^3} \right\} \quad (4.14)$$

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ตามหลักของเฮนรี หลุยส์ เลอ ชาเตอร์ลิเยร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปจะทำให้มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจึงถูกกำหนดโดยค่าคงที่สมดุล เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมากเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]' [H^+]^3}{[La^{3+}]^n [(HR)_2]'^3}$ จะมีค่ามากกว่าค่าคงที่สมดุล โดยมีค่า 63.14 (อ้างอิงที่ $pH_x = 0.67$) ขณะที่ค่าคงที่สมดุลมีค่า 3.0 ดังนั้นที่ผิวสัมผัสนี้จึงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพื่อทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมีค่าลดลง ดังนั้นจึงได้เลนทานัมไอออนออกวาและจะละลายในสารละลายสตรีปและสารสกัดจะยังคงอยู่ในสารละลายเชื้อแผ่นเหลว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปมากขึ้นเรื่อย ๆ เทอม $\frac{[H^+]^3}{[La^{3+}]^n}$ จะมีค่ามากขึ้นทำให้เทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]' [H^+]^3}{[La^{3+}]^n [(HR)_2]'^3}$ ยังมีค่ามากกว่าค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาจึงเกิดการย้อนกลับมากขึ้น และจากสมการแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ถ้าเทอม $\frac{[La^{3+}]^n [(HR)_2]'^3}{[H^+]^3}$ มีค่ามากจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดได้ช้าลง การเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทำให้มีไฮโดรเจนไอออนในสารละลายป้อนมีค่ามากขึ้นเทอมนี้จึงมีค่าลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเร็วขึ้น จึงได้ค่าร้อยละการสกัดที่สูง

4.5 การทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตริป

การทดลองนี้ศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออน ทำการทดลองโดยการให้สารละลายสตริปไหลวนเพื่อเพิ่มความเข้มข้น โดยสารละลายสตริปมีความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.5 โมลต่อลิตร มีความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตริป เป็น 142.3 และ 1450 ppm (0.001, 0.010 โมลต่อลิตร) และมีปริมาตรที่ไหลวนเป็น 1 ลิตร สารละลายป้อนไหลผ่านครั้งเดียว ปรับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนมีความเข้มข้นเป็น 144.3 ppm และปรับ pH 2.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก สารละลายเชื่อมแผ่นเหลวมมีความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด 0.5 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.9 แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายสตริป โดยมีความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายสตริป ดังต่อไปนี้ $[La^{3+}]_0 = 142.3$ และ 1450 ppm ; $[La^{3+}]_t = 144.2$ ppm, $pH_t = 2.5$, $(D2EHPA) = 0.5$ M, $[H_2SO_4]_t = 0.5$ M, $Q_p = Q_r = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที และการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นแบบสวนทางกัน แต่สารละลายสตริปไหลวน

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทานัมไอออนในสารละลาย สตรีปมีค่าเป็น 142.3 และ 1450 ppm ซึ่งมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลาย ป้อนที่มีค่า 144.2 ppm มีอัตราส่วนของความเข้มข้นในสารละลายสตรีปต่อสารละลายป้อนเป็น 1 และ 10 เท่า จะไม่มีผลต่อการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีป อัตราการเพิ่ม ความเข้มข้นจะมีค่าคงที่เป็น 26 ppm/min ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงในทุกค่าความเข้มข้นของแลนทานัมใน สารละลายสตรีป

จากผลการทดลองสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ดังนี้ การที่แลนทานัมไอออนสามารถเคลื่อน ที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังด้านสารละลายสตรีปที่มีความเข้มข้น สูงกว่าได้ เนื่องจากเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]' [H^+]^3}{[La^{3+}]'' [(HR)_2]^3}$ ในด้านสารละลายป้อนยังมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ สมดุล เพราะที่ผิวสัมผัสนี้มีอัตราส่วนของความเข้มข้นเหมือนกับผลจากการทดลอง 5.4 ดังนั้นที่ผิว สัมผัสนี้จึงยังลงเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ในทำนองเดียวกันที่ผิวสัมผัสด้านเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลาย สตรีปยังคงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เมื่อตรวจสอบค่าของเทอม $\frac{[LaR_3 \cdot 3HR]' [H^+]^3}{[La^{3+}]'' [(HR)_2]^3}$ จะพบว่ามีค่า 6.46 (อ้างอิงจาก $[La^{3+}]_s^0 = 1450$) ซึ่งยังคงมีค่ามากกว่าค่าคงที่สมดุลซึ่งมีค่า 3.0 ดังนั้นที่ผิวสัมผัสนี้จึง ยังคงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ทำให้แลนทานัมไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากความ เข้มข้นในสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำมายังสารละลายสตรีปที่มีความเข้มข้นสูงกว่าได้ และจากสมการ

$$K_{ex} = \frac{[LaR_3 \cdot 3HR]_o' [H^+]_o^3}{[La^{3+}]_o'' [(HR)_2]_o^3} = \frac{[LaR_3 \cdot 3HR]_i' [H^+]_i^3}{[La^{3+}]_i'' [(HR)_2]_i^3} \quad (4.15)$$

ภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้ไม่เกิดการถ่ายโอนมวลของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว เมื่อความเข้มข้นของสาร ประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนในทั้งสองด้านเท่ากัน ($[LaR_3 \cdot 3HR]_o' = [LaR_3 \cdot 3HR]_i'$) และความเข้มข้นของสาร สกัดในทั้งสองด้านเท่ากัน ($[(HR)_2]_o'' = [(HR)_2]_i''$) จะได้สมการ

$$\frac{[La^{3+}]_l''}{[La^{3+}]_o''} = \left(\frac{[H^+]_l''}{[H^+]_o''} \right)^3 \quad (4.16)$$

ใส่ log ในสมการ (4.16) ทั้งสองข้างของจะได้

$$\log \left(\frac{[La^{3+}]_l''}{[La^{3+}]_o''} \right) = \log \left(\frac{[H^+]_l''}{[H^+]_o''} \right)^3 = 3(pH_2'' - pH_1'') = 3\Delta pH \quad (4.17)$$

จากการทดลอง pH ในสารละลายป้อนมีค่า 2.5 และ pH ในสารละลายสตรีปมีค่าเป็น 0.67 เมื่อแทนในสมการจะได้ว่าอัตราส่วนของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีปต่อสารละลายป้อนที่สามารถทำให้เพิ่มความได้มีค่ามากถึง 330000 เท่า อัตราส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมในการทดลองนี้จึงยังไม่เกินอัตราส่วนที่สามารถเพิ่มความเข้มข้นได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดได้นำมาสรุปดังนี้

1. ค่า pH ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ร้อยละการสกัดสูงสุดในกระบวนการสกัดนี้ คือ pH 2.5 แต่ในช่วง pH ต่ำกว่านี้จะได้รับร้อยละการสกัดที่ลดลงตามค่า pH เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวมียอตราที่ลดลงเมื่อไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่ลดลง และในช่วง pH ที่สูงกว่านี้อัตราการสกัดจะลดลงเช่นกันเนื่องจากสารสกัด D2EHPA ซึ่งเป็นสารสกัดที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดจะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะได้ดีในสภาวะที่มีไฮโดรเจนไอออน
2. เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ควบคุม pH ในสารละลายป้อนกับการปรับ pH โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเพียงอย่างเดียว สามารถสรุปได้ว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ควบคุม pH จะได้รับร้อยละการสกัดที่ต่ำกว่าการปรับ pH ด้วยกรดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในสารละลายบัฟเฟอร์จะมีไอออนมีประจุลบที่เป็นคู่เบสของกรดด้านทานการถ่ายโอนมวล
3. การเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน มีผลต่อร้อยละการสกัดและอัตราการถ่ายโอนมวล โดยในช่วงความเข้มข้นค่าจะได้รับร้อยละการสกัดที่สูงกว่าแต่อัตราการถ่ายโอนมวลจะมีค่าต่ำ

4. การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร จะทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการถ่ายโอนมวลจะเริ่มคงที่เนื่องมาจากเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูง
5. เมื่อสารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 โมลต่อลิตร ขั้นตอนการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมในเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นขั้นตอนการควบคุมการถ่ายโอนมวล และอัตราการถ่ายโอนมวลจากสมการการแพร่ของฟิคก์จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง
6. เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายสตรีปมาก จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายสตรีปมีค่าสูง จึงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตรีปโดยในช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกมีค่าตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.25 โมลต่อลิตรขึ้นไปจะทำให้ร้อยละการสกัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.25 โมลต่อลิตร ร้อยละการสกัดมีค่าคงที่ที่ค่าร้อยละ 99
7. การใช้กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่เร่งด้วยเส้นใยกลวง สามารถสกัดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นได้ โดยจะเกิดการถ่ายโอนมวลจากสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังด้านสารละลายสตรีปซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าถึง 10 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติม โดยให้สารละลายป้อนมีองค์ประกอบของธาตุหายากที่มีอัตราส่วนของแต่ละธาตุ เป็นจริงตามแหล่งต่าง ๆ ของประเทศไทยเพื่อพัฒนาไปสู่กระบวนการที่สามารถนำไปใช้ได้ โดยนำ สภาวะที่สกัดธาตุแลนทานัมจากการทดลองนี้มาประยุกต์ได้จะทำให้เกิดประโยชน์ในอนาคตต่อไป
2. ควรมีการศึกษาผลของกรรณชนิดอื่น ๆ ที่นำมาใช้เป็นสารละลายสตริป เพื่อให้ระบบการสกัดด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางนี้มีความยืดหยุ่นได้ดี
3. ควรมีการศึกษาผลของชนิดของเยื่อแผ่นเส้นใยกลางที่นำมาทำเป็นตัวรองรับ หรือศึกษาการผลิต เยื่อแผ่นเหลวที่เป็นตัวรองรับ เพื่อพัฒนาให้เป็นตัวรองรับที่ดีจะทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพที่ดี และอยู่ในจุลภาคได้นาน
4. เพื่ออธิบายขั้นตอนการแพร่ของไอออนผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อนที่อยู่ติดกับเยื่อแผ่นเหลว จะต้องมีการทดลองเปลี่ยนอัตราการไหลในสารละลายป้อนเพื่อทำให้ชั้นฟิล์มหายไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จดหมายข่าว, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก, 2539, ปีที่3 ฉบับที่ 3

จดหมายข่าว, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก, 2538, ปีที่2 ฉบับที่ 3

ไพศาล อภินิพนธ์. 2541. การสกัดและการนำกลับโครมตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงใน
หอเดี่ยว. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รายงานประจำปีของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2539-2540.

วีรวัฒน์ ปัททวิทกศา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับโซเดียม
อะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

อิสรา เกษมเศรษฐ. 2541. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พอง
ด้วยเส้นใยกลวง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารเผยแพร่, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ภาษาอังกฤษ

Baker, R., and Blume, I. 1990. Couple Transport Membrane. in Porter, M. C., Handbook of Industrial
Membrane Technology. New Jersey: Noyes Publication.

Correa, S.M., Arbilla, G., and Carralho, M.S. 1998. Modeling and Separation of Rare Earth Elements
by Countercurrent Electromigration: A New Separation Column. Separation Science and
Technology, 33(10):1551-1569.

Frankenfeld, J.W., and Li, N.N. 1987. Recent Advances in Liquid Membrane Technology. in
Rousseau, R.W., Handbook of Separation Process Technology. New York: John Wiley &
Sons.

Gaikwad, A.G., and Damodaram, A.D. 1993. Solvent Extraction Studies of Holmium with Acidic
Extractants. Separation Science and Technology, 28(4): 1019-1030.

Hara, P.A., and Bohrer, M.P. 1989. Supported Liquid Membrane for Copper Transport. Journal of
Membrane Science. 44: 273-287.

- Hoechst Celanese Corporation. 1995. Operating Manual : Laboratory Liquid/Liquid Extraction System. n.p. (Typewritten)
- Ho, W.S.W. and Li, N.N. 1992. Emulsion Liquid Membranes: Definitions. In Wintson Ho, W.S. and Sirkar, K.K. (eds.), Membrane Handbook, pp. 656-700. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Hoechst Celanese Corporation. 1995. Operating Manual: Laboratory Liquid Extraction System. n.p.
- Huang, T.C., and Juang, R.S. 1987. Transport of Zinc through a Supported Liquid Membrane using Di (2-ethylhexyl) phosphoric acid as a mobile carrier. Journal of Membrane Science 31: 209-226.
- Kataoka, T., Nishiki, T, and Muto, A. 1995. Permeation of Lanthanum through Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology, 30(4): 621-636.
- Kirk, O. 1996. Encyclopedia of Chemical Technology. 4th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Komasawa, Isao, Otake, Tsutao and Yamashita, Tomohiro. 1983. Mechanism Kinetic of Copper Permeation through a Supported Liquid Membrane Containing a Hydroxyoxime as a Mobile Carrier. Ind. Eng. Chem. Fundam. 22 :127-131. Porter, M. C. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology. New Jersey: Noyes Publication.
- Konishi, Y., Asai, S., Midow, Y., and Oku M. 1993. Recovery of Zinc, Cadmium, and Lanthanum by Biopolymer Gel Particles Of Alginic Acid. Separation Science and Technology, 28(9): 1691-1702.
- Kubota, F., Goto, M., and Nakashio, F. 1995. Extraction Kinetics of Rare Earth Metals with 2-Ethylhexyl Phosphonic Acid Mono-2-ethylhexyl Ester Using a Hollow Fiber Membrane Extractor. Separation Science and Technology, 30(5): 777-792.
- Li, N.N., Chain, R.P., Naden and Lai, R.W.M. 1983. Liquid Membrane Process for Copper Extraction. Hydrometallurgy. 9:277-305.
- Liu, X. and Zhang, X. 1997. Simplified model for extraction of rare-earth ions using emulsion liquid membrane. Journal of Membrane Science. 128:223-229.
- Marr, R. and Kopp, A. 1989. Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanism and

- Models. International Chemical Engineering. 22(1): 44-59.
- Marr, R., and Kopp, A. 1982. Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanism and Models. International Chemical Engineering. 22(1): 44-59.
- Nopphakorn Thamphiphit. 1996. Batch Extraction of Cobalt Ions in Hydrochloric acid Solution with a Hollow Fiber Supported Liquid Membrane in a Single Column. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Schultz, G. 1988. Separation Techniques with Supported Liquid Membranes. Desalination. 68: 191-202.
- Scott, K. 1995. Handbook of Industrial Membranes. Oxford: Elsevier Science Publishers Ltd.
- Sugiura, M. 1993. Effect of Quaternary Ammonium Salts on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes. Separation Science and Technology, 28(7): 1453-1463.
- Sugiura, M. and Hirata H. 1993. Effect of Phospholipids on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes. Separation Science and Technology, 28 (10):1933-1937.
- Tanigaki, M., Shiod, T., Ueda, M., and Euchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part 1. Transport mechanism. Separation Science and Technology 23(10&11): 1145-1159.
- Tavlarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. 1987. Solvent Extraction, Membranes and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology. 22 (2&3): 581-617.
- Teramoto, Masaaki, Masuyama, Hideto, Takaya, Hitoshi, and Asano, Shigehiro. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology. 22(11): 2175-2201.
- Topp, N.E. 1965. The Chemistry of The Rare-Earth Elements. Amsterdam, Elsevier Publishing.
- Urbanski, T.S., Fomari, P., and Abbruzzese, C. 1996. The extraction of cerium(III) and lanthanum (III) from chloride solutions with LIX 54. Hydrometallurgy. 40: 169-179.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

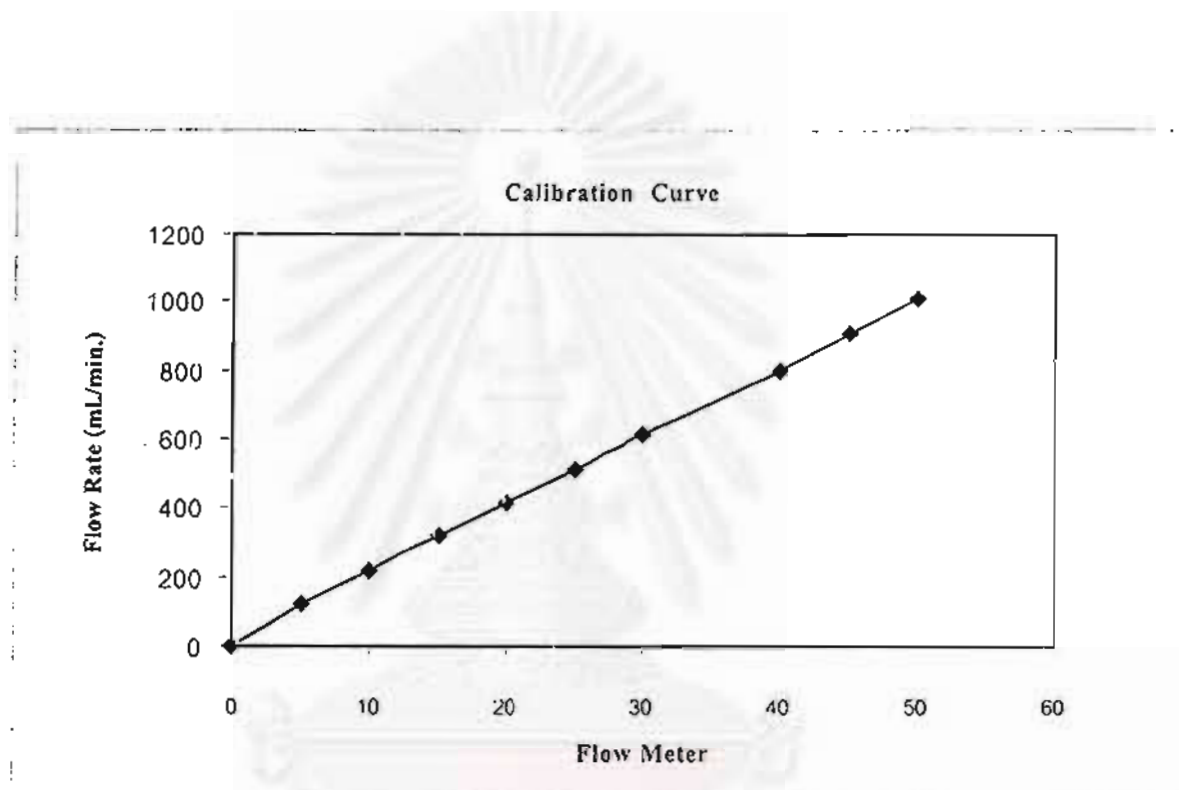
ข้อมูลการปรับมาตรฐานของมาตรวัดอัตราการไหล

ตาราง ก-1 ข้อมูลการปรับมาตรฐานของมาตรวัดอัตราการไหลด้านท่อ (TUBE SIDE)

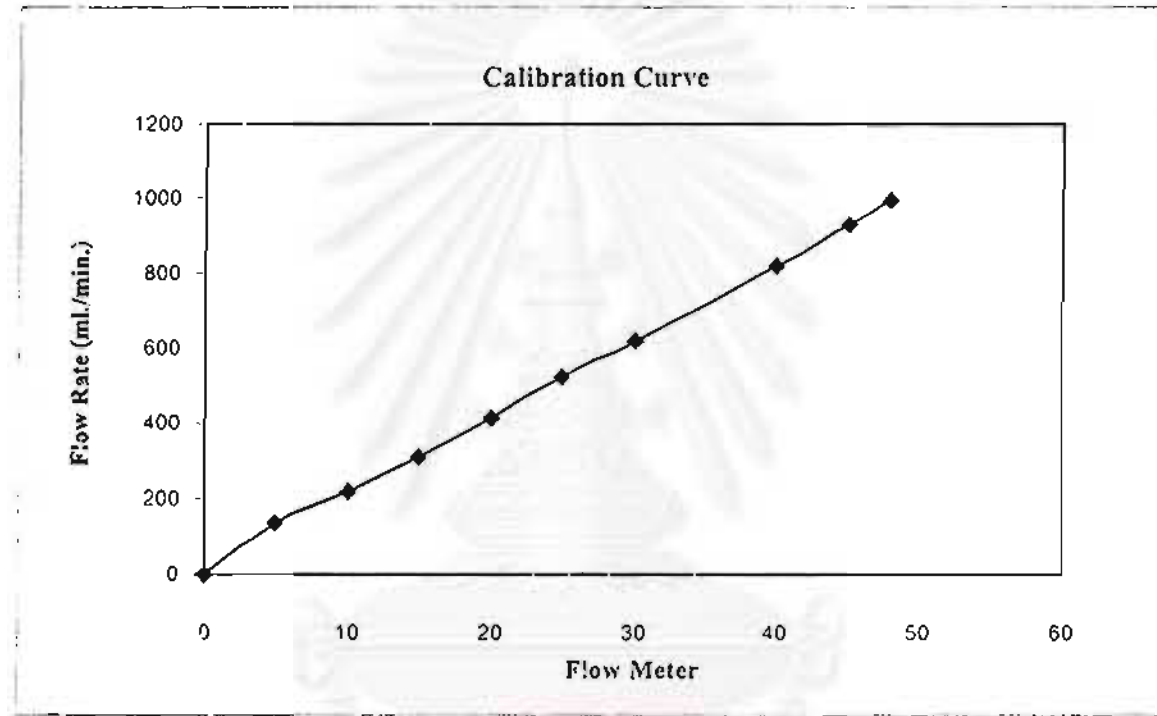
Pump Speed	Flow meter	Pressure Drop		vol ml.	time sec.	Flowrate (ml./min)
		in	out			
2	5	4.9	4.8	251	120	125.75
				252	120	
3	10	10.5	10.4	428	120	215.00
				432	120	
	15	3.5	3.4	625	120	317.50
				645	120	
4	15	17	16.5	640	120	319.50
				638	120	
	20	8.8	8.5	414	60	413.50
				413	60	
5	25	13.6	13.4	511	60	512.50
				514	60	
6	30	20	19.5	311	30.26	614.90
				308	30.14	
7	40	18	17.5	402	30.23	798.48
				403	30.26	
8	45	25	24	454	30.13	909.60
				460	30.16	
	50	14.2	13.5	502	30.1	1006.80
				509	30.15	

ตาราง ก-2 ข้อมูลการปรับมาตรฐานของมาตรวัดอัตราการไหลด้านเปลือก (SHELL SIDE)

Pump Speed	Flow meter	Pressure Drop		vol ml.	time sec.	Flowrate (ml./min)
		in	out			
2	5	2.5	2.4	262	120	133.00
				270	120	
3	10	5.18	5.19	439	120	221.75
	15	1.1	1.3	448	120	315.00
				620	120	
640	120					
4	15	10	10	610	120	311.25
	20	3.9	4	635	120	415.50
				416	60	
415	60					
5	25	6.5	6.5	523	60	524.00
				525	60	
6	30	9.5	9.4	312	30.26	618.87
				311	30.14	
7	40	6.4	6.2	414	30.23	822.28
				415	30.26	
8	45	9.6	9.4	466	30.13	931.50
	48	3.5	3.5	470	30.16	993.86
				498	30.1	
500	30.15					



รูปที่ ก-1 แสดงการปรับมาตรฐานอัตราการไหลด้านในเส้นใยกลวง (TUBE SIDE)



รูปที่ ก-2 แสดงการปรับมาตรฐานอัตราการไหลด้านนอกเส้นโยกลวง(SHELL SIDE)

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 แสดงความเข้มข้นของแกนทานัม ไอออนที่เหลือ ที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก mol/l	0.05	0.10	0.25	0.50
ความเข้มข้นของแกนทานัม ไอออนที่เหลือ ppm.	60.57	24.65	8.76	5.483

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าร้อยละการสกัดของแกนทานัม ไอออน ที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก mol/l	0.05	0.10	0.25	0.50
ค่าร้อยละการสกัด (%)	58.02	82.92	93.93	96.20

ตารางที่ ข-3 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลของแกนทานัม ไอออน ที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก mol/l	0.05	0.10	0.25	0.50
อัตราการถ่ายโอนมวล (mol/cm ² .min)*10 ⁷	0.861	1.230	1.393	1.427

ตารางที่ ข-4 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนหลังจากผ่านการสกัด ที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก mol/l	0.05 M		0.1 M		0.25 M		0.5 M	
	pH _f	pH _s	pH _f	pH _s	pH _f	pH _s	pH _f	pH _s
ค่า pH	2.21	0.68	2.13	0.76	2.01	0.75	1.98	0.79

ตารางที่ ข-5 แสดงความเข้มข้นของเลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เหลือ (ppm.) ที่ค่า pH และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่างๆ

pH	[D2EHPA] (mol/l)							
	0.05 M buffer	0.1 M	0.3 M	0.5 M	1.0 M	0.1 M non-buffer	0.5 M non-buffer	1.0 M non-buffer
2.0	103.20	99.36	51.23	23.71	25.92	46.76	12.43	10.58
2.5	47.64	30.40	19.03	5.37	6.17	25.10	1.71	3.20
3.0	69.26	54.62	21.48	11.26	9.86	31.89	2.37	4.28
3.5	89.00	78.97	38.49	23.57	17.88	38.95	5.76	5.38
4.0	98.67	90.63	57.37	31.25	26.84	45.46	6.38	6.88
4.5	103.81	101.40	69.58	41.62	41.84	52.67	9.57	8.32
5.6	102.09	102.10	90.07	50.35	43.26	59.42	10.56	9.47

ตารางที่ ข-6 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปหลังจากผ่านการสกัด

pH _r ⁰	D2EHPA															
	0.05 M Buffer		0.1 M		0.3 M		0.5 M		1.0 M		0.1 M non-buffer		0.5 M non-buffer		1.0 M non-buffer	
	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s
1.97	1.95	0.67	1.56	0.63	1.96	0.89	1.97	0.63	1.95	0.78	1.60	0.76	1.63	0.65	1.58	0.68
2.48	2.42	0.66	2.43	0.74	2.40	0.87	2.40	0.61	2.42	0.61	2.11	0.73	2.92	0.66	1.98	0.64
3.05	2.98	0.65	2.94	0.65	2.97	0.76	2.92	0.63	2.97	0.66	2.48	0.77	2.51	0.69	2.38	0.67
3.56	3.54	0.63	3.53	0.88	3.46	0.66	3.49	0.71	3.47	0.63	3.07	0.69	3.11	0.65	3.02	0.71
3.98	3.99	0.61	3.97	0.78	3.96	0.63	3.91	0.73	3.93	0.64	3.55	0.68	3.24	0.61	3.32	0.70
4.53	4.50	0.68	4.49	0.87	4.38	0.61	4.39	0.68	4.38	0.63	4.03	0.73	4.10	0.65	4.09	0.69
5.67	5.61	0.65	5.78	0.98	5.70	0.67	5.68	0.69	5.66	0.66	5.43	0.74	5.13	0.66	5.31	0.68

ตารางที่ ข-7 แสดงร้อยละการสกัดของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน ที่ค่า pH และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่างๆ

pH	[D2EHPA] (mol/l)							
	0.05 M buffer	0.1 M	0.3 M	0.5 M	1.0 M	0.1 M non-buffer	0.5 M non-buffer	1.0 M non-buffer
2.0	28.48	31.14	64.50	83.57	82.04	67.60	91.39	92.67
2.5	65.96	78.92	86.80	96.27	95.72	82.59	98.81	97.78
3.0	51.97	62.12	85.10	92.19	93.16	77.88	98.36	97.03
3.5	38.71	45.61	73.49	83.77	87.69	73.17	96.03	96.29
4.0	32.46	37.97	60.73	78.61	81.63	68.88	95.63	95.29
4.5	28.99	30.64	52.41	71.53	71.38	63.97	93.45	94.31
5.6	30.22	30.21	38.43	65.58	70.43	59.38	92.78	93.53

ตารางที่ ข-8 แสดงอัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออน ที่ค่า pH และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่างๆ 10^{-7} mol/(cm².min)

pH	[D2EHPA] (mol/l)							
	0.05 M buffer	0.1 M	0.3 M	0.5 M	1.0 M	0.1 M non-buffer	0.5 M non-buffer	1.0 M non-buffer
2.0	0.422	0.462	0.957	1.239	1.217	1.002	1.355	1.374
2.5	0.992	1.170	1.286	1.427	1.419	1.224	1.464	1.449
3.0	0.770	0.921	1.261	1.366	1.381	1.154	1.458	1.438
3.5	0.578	0.681	1.097	1.250	1.309	1.092	1.433	1.437
4.0	0.487	0.570	0.912	1.180	1.226	1.034	1.436	1.431
4.5	0.436	0.460	0.787	1.075	1.073	0.961	1.404	1.417
5.6	0.454	0.454	0.578	0.986	1.059	0.893	1.395	1.406

ตารางที่ ข-9 แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เหลือ (ppm)

ที่ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่างๆ กัน

[La] mg./ml (ppm)	[D2EHPA] (mol/l)				
	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0
17.47	0.55	0.07	0.03	0.02	0.04
181.3	38.88	25.33	9.39	6.42	5.98
361.4	174.00	98.37	19.26	14.74	12.38
705.2	455.60	210.87	55.71	29.34	20.63
1080	813.00	393.46	123.50	43.85	30.97
1450	1165.00	630.50	151.30	75.92	39.38

ตารางที่ ข-10 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนและสารละลายศตริปหลังจากการสกัด

[La] (ppm)	D2EHPA									
	0.1 M		0.3 M		0.5 M		0.8 M		1.0 M	
	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s
17.47	2.21	0.63	2.06	0.66	2.10	0.68	2.08	0.68	2.12	0.69
181.3	2.03	0.71	2.07	0.63	2.02	0.69	2.06	0.67	1.99	0.69
361.4	2.23	0.69	1.98	0.71	1.99	0.71	1.97	0.78	2.05	0.75
705.2	2.05	0.68	2.06	0.72	1.98	0.77	1.89	0.75	1.91	0.71
1080	1.89	0.75	1.93	0.75	2.01	0.69	1.96	0.69	1.89	0.78
1450	1.96	0.77	1.86	0.69	1.93	0.75	1.91	0.78	1.93	0.81

ตารางที่ ข-11 แสดงค่าร้อยละการสกัดของแลนทานัมไอออน

ที่ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่างๆ กัน

[La] mg./ml (ppm)	[D2EHPA] (mol/l)				
	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0
17.47	96.829	99.623	99.806	99.876	99.764
181.3	78.555	86.029	94.821	96.458	96.701
361.4	51.854	72.781	94.671	95.921	96.574
705.2	35.394	70.098	92.100	95.839	97.075
1080	24.722	63.569	88.565	95.940	97.132
1450	19.655	56.517	89.566	94.764	97.284

ตารางที่ ข-12 แสดงค่าอัตราการถ่ายโอนมวลของแก๊สทานัมไอออน 10^{-7} mol/(cm².min)

ที่ความเข้มข้นของแก๊สทานัมไอออนในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าต่างๆ กัน

[La] mg./ml (ppm)	[D2EHPA] (mol/l)				
	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0
17.47	0.1739	0.1789	0.1792	0.1793	0.1791
181.3	1.4637	1.6030	1.7668	1.7973	1.8018
361.4	1.9260	2.7033	3.5163	3.5628	3.5871
705.2	2.5653	5.0805	6.6751	6.9461	7.0357
1080	2.7441	7.0559	9.8304	10.6490	10.7814
1450	2.9291	8.4224	13.3474	14.1221	14.4976

ตาราง ข-13 แสดงความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองเพื่อเพิ่มความเข้มข้น

time (min.)	ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตรีป		
	$[La^{3+}]_s^0 = 142.3 \text{ ppm.}$	$[La^{3+}]_s^0 = 1450 \text{ ppm.}$	$[La^{3+}]_s^0 = 6958 \text{ ppm.}$
0	142.3	1450	6958
10	414	1714	7080
30	950.7	2353	7751
60	1739	2978	8441

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

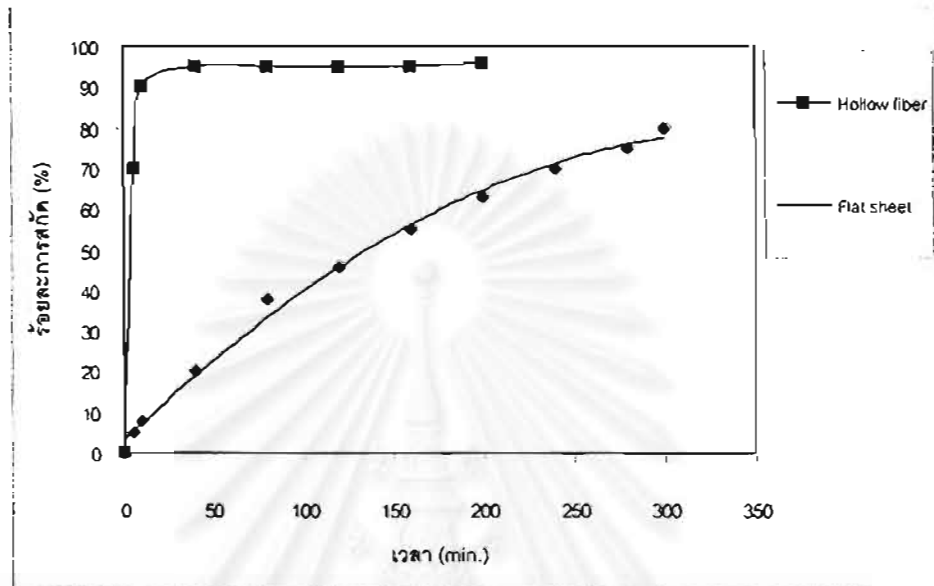
ตาราง ข-14 แสดงค่า pH ของสารละลายป้อนและสตรีปที่เวลาใด ๆ

time (min.)				
	$[La^{3+}]_s^0 = 142.3 \text{ ppm.}$		$[La^{3+}]_s^0 = 1450 \text{ ppm.}$	
	pH _r	pH _s	pH _r	pH _s
0	2.48	0.67	2.46	0.67
10	2.01	0.85	2.12	0.78
30	2.08	0.83	1.98	0.89
60	2.05	0.84	2.01	0.81

ตาราง ข-15 แสดงค่าการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลจากทฤษฎี

$[La^{3+}]_r$	a	b	c	d	[D2EHPA]	$LaR_{3,3HR} \cdot 10^3$ (mol/l)	$\text{flux} \cdot 10^7$ (mol/cm ² .min)
17.47	8538	-1.2807E+06	9.1636E+07	-1.0673E+09		14.3404	4.59E-07
181.3	85381	-1.2807E+07	6.6736E+08	-1.0673E+10		29.05649	9.30E-07
361.4	213454	-3.2018E+07	1.6279E+09	-2.6682E+10		33.775478	1.08E-06
705.2	426907	-6.4036E+07	3.2288E+09	-5.3363E+10	d0.3	36.75187	1.18E-06
1080	640361	-9.6054E+07	4.8297E+09	-8.0045E+10		38.27059	1.22E-06
1450	853815	-1.2807E+08	6.4306E+09	-1.0673E+11		39.25337	1.26E-06
17.47	8538	-2.1345E+06	2.0488E+08	-4.9411E+09		35.21942	1.13E-06
181.3	85381	-2.1345E+07	1.8058E+09	-4.9411E+10		57.08987	1.83E-06
361.4	213454	-5.3363E+07	4.4740E+09	-1.2353E+11		63.320515	2.03E-06
705.2	426907	-1.0673E+08	8.9209E+09	-2.4705E+11	d0.5	67.17233	2.15E-06
1080	640361	-1.6009E+08	1.3368E+10	-3.7058E+11		69.02882	2.21E-06
1450	853815	-2.1345E+08	1.7815E+10	-4.9411E+11		70.22389	2.25E-06
17.47	8538	-4.2691E+06	7.3851E+08	-3.9528E+10		98.81014	3.16E-06
181.3	85381	-4.2691E+07	7.1421E+09	-3.9528E+11		131.9397	4.22E-06
361.4	213454	-1.0673E+08	1.7815E+10	-9.8821E+11		140.6376	4.50E-06
705.2	426907	-2.1345E+08	3.5603E+10	-1.9764E+12	d1.0	145.44	4.65E-06
1080	640361	-3.2018E+08	5.3390E+10	-2.9646E+12		148.2702	4.74E-06
1450	853815	-4.2691E+08	7.1176E+10	-3.9528E+12		149.9316	4.80E-06
17.47	8538	-4.2691E+05	3.4115E+07	-3.9528E+07		1.175555	3.76E-08
181.3	85381	-4.2691E+06	9.8151E+07	-3.9528E+08		5.009377	1.60E-07
361.4	213454	-1.0673E+07	2.0488E+08	-9.8821E+08		7.04404	2.25E-07
705.2	426907	-2.1345E+07	3.8276E+08	-1.9764E+09	d0.1	8.526231	2.73E-07
1080	640361	-3.2018E+07	5.6063E+08	-2.9646E+09		9.337476	2.99E-07
1450	853815	-4.2691E+07	7.3851E+08	-3.9528E+09		9.880914	3.16E-07

ภาคผนวก ค



รูปที่ ค-1 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดระหว่างตัวรองรับแบบ Flat sheet และ Hollow fiber

ตาราง ก-1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวรองรับ Flat sheet และ Hollow fiber

conditions	$[La^{3+}]_f$ (mol/l)	D2EHPA (mol/l)	[H ₂ SO ₄] (mol/l)	pH _f	t (min.)	V (cm. ³)	ร้อยละการสกัด
Flat sheet	0.001	0.40	1.00	2.10	330	370	80
Hollow fiber	0.001	0.50	0.50	2.48	1.85	370	95

ประวัติผู้วิจัย

นาย วิทยา นามสว่าง เกิดวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ เป็น บุตรคนที่หนึ่งในจำนวนสองคน สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประสาทวิทยาคาร หลังจากนั้นได้มาศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อปี 2541 และในปีเดียวกันนี้ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

